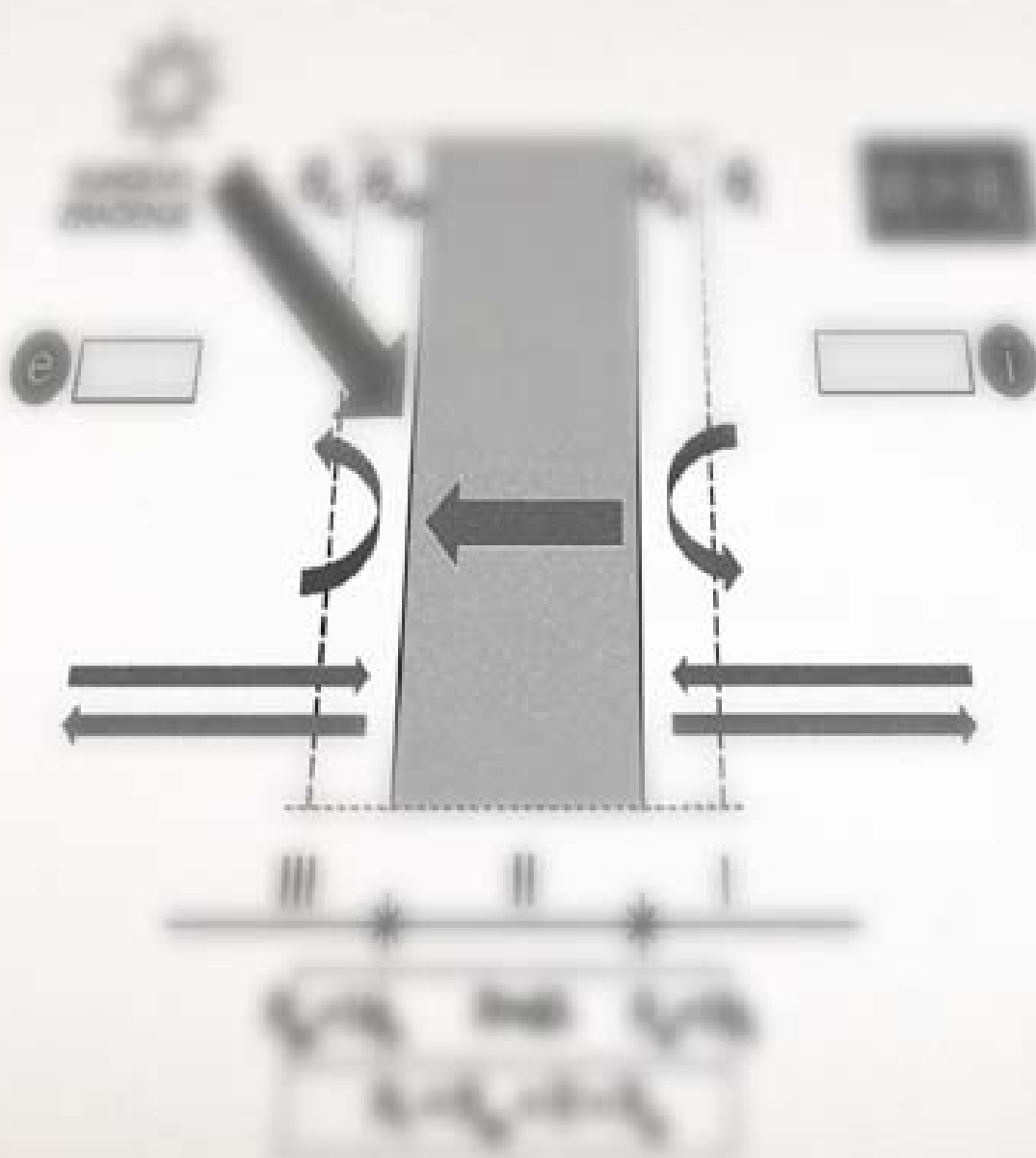


Vladimir Šimetin

Građevinska fizika

ZGRADA I ENERGIJA



Vladimir Šimetin
Građevinska fizika
ZGRADA I ENERGIJA

Nakladnik: **FRONTA IMPRESS**

Za nakladnika: **Saša Kušter**

Sunakladnik: **PDM Savjetovanje d.o.o.**

Za sunakladnika: **Željko Štromar**

Urednik: **Stanislav Šmaguc**

ISBN: **978-953-480-520-6**

CIP zapis je dostupan u računalnome katalogu
Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu pod brojem 001058858.

Vladimir Šimetin

Građevinska fizika

ZGRADA I ENERGIJA

Zagreb, 2020.

SADRŽAJ

Predgovor	15

1 ENERGIJA I ZGRADA

1.1 Što je energija	17
1.2 Mjerne jedinice energije	17
1.3 Izvori i oblici energije	18
1.4 Potrošnje energije kroz povijest	21
1.5 Energija i njen utjecaj na okoliš	22
1.6 Energetski problem	24
1.7 Osnovne karakteristike neobnovljivih izvora energije	25
1.7.1 Općenito	25
1.7.2 Ugljen i treset	26
1.7.3 Nafta i prirodni plin	27
1.7.4 Naftonosni škriljevac i bituminozni pijesak	27
1.7.5 Nuklearna goriva	27
1.7.6 Geotermalna energija	28
1.8 Osnovne karakteristike obnovljivih izvora energije	28
1.8.1 Općenito	28
1.8.2 Vodne snage (energija položaja vode)	29
1.8.3 Biomasa, bioplin, biodizel	30
1.8.4 Energija vjetra	30
1.8.5 Energija Sunčeva zračenja	30
1.9 Energijske rezerve i potrošnja energije	31
1.9.1 Svjetske rezerve i svjetska potrošnja energije	31
1.9.2 Potrošnja energije u Europskoj Uniji	35
1.9.3 Potrošnja energije u Republici Hrvatskoj	37
1.10 Zgrada kao potrošač energije	40
1.11 Pokazatelji energetske i ekološke kvalitete zgrade	41
1.11.1 Pokazatelji potrošnje energije i emisije CO ₂	41
1.11.2 Energetski standardi zgrade	42
1.11.2.1 Općenito	42
1.11.2.2 Niskoenergetska kuća	43
1.11.2.3 Pasivna kuća	43
1.11.2.4 Kuća nulte energije	44
1.11.2.5 Kuća s viškom energije	45
1.11.2.6 Energijski samodostatna (neovisna, autarkična, autonomna) kuća	46
1.11.2.7 Zgrada s gotovo (skoro) nultom potrošnjom energije	46
1.12 Siva energija	48
1.13 Održiva gradnja	51

2 TOPLINA I TEMPERATURA

2.1 Znanost o toplini	53
2.2 Toplina	53
2.3 Unutarnja energija	54
2.4 Temperatura	55
2.5 Količina topline	57
2.6 Specifični toplinski kapacitet	58
2.7 Latentna toplina	59
2.8 Entalpija	61

2.9	Načini prijenosa topline	63
2.9.1	Uvod	63
2.9.2	Prijenos topline vođenjem (kondukcijom)	64
2.9.3	Prijenos topline strujanjem (konvekcijom)	68
2.9.4	Prijenos topline zračenjem (radijacijom)	70
2.9.4.1	Općenito	70
2.9.4.2	Ponašanje prijemnika zračenja	72
2.9.4.3	Ponašanje zračila	75
2.9.4.4	Prijenos (izmjena) topline zračenjem	79

3 GRAĐEVNI MATERIJALI, PROIZVODI I SUSTAVI ZA TOPLINSKU IZOLACIJU ZGRADA

3.1	Uvod	81
3.2	Razvoj i uporaba građevnih materijala tijekom povijesti	82
3.3	Podjela građevnih materijala	84
3.4	Toplinsko-izolacijski materijali	85
3.5	Proizvodi i sustavi za toplinsku izolaciju	87
3.6	Područja primjene toplinsko-izolacijskih materijala	90
3.7	Prikaz uređenja tržišta građevnih materijala i proizvoda u Europskoj Uniji (Uredba EU br. 305/2011)	92
3.7.1	Uvod	92
3.7.2	Kratki prikaz Uredbe o građevnim proizvodima	93
3.7.3	Građevni proizvodi u smislu Uredbe o građevnim proizvodima	94
3.7.4	Usklađene norme	95
3.7.5	Europski dokumenti za ocjenjivanje i europske tehničke ocjene	96
3.7.6	Sustavi ocjenjivanja i provjere stalnosti svojstava	97
3.7.7	Izjava o svojstvima	99
3.7.8	Uporaba oznake CE	100
3.8	Tehnička svojstva toplinsko-izolacijskih materijala i proizvoda	101
3.8.1	Uvod	101
3.8.2	Gustoća tvari, specifični obujam i porozitet	102
3.8.3	Toplinska vodljivost, λ	102
3.8.4	Toplinski otpor, R	106
3.8.5	Mehanička svojstva	106
3.8.6	Upijanje vode	108
3.8.7	Otpornost na izmjenično zamrzavanje – odmrzavanje	109
3.8.8	Faktor otpora difuziji vodene pare	109
3.8.9	Stabilnost dimenzija	109
3.8.10	Dinamička krutost	110
3.8.11	Ponašanje u uvjetima požara	111
3.8.11.1	Gorenje	111
3.8.11.2	Nastanak i razvoj požara	111
3.8.11.3	Ponašanje građevnih materijala i proizvoda te građevnih dijelova zgrade u uvjetima požara	112
3.8.11.4	Reakcija na požar	113
3.9	Objavljene toplinske vrijednosti	116
3.10	Projektne toplinske vrijednosti	121
3.11	Kratak opis toplinsko-izolacijskih materijala	125
3.11.1	Celuloza	125
3.11.2	Čvrsta poliuretanska pjena	125
3.11.3	Drvena vlakna	126
3.11.4	Drvena vuna	127

3.11.5	Ekspandirana glina	129
3.11.6	Ekspandirani perlit	129
3.11.7	Ekspandirani polistiren	130
3.11.8	Ekspandirani vermikulit	132
3.11.9	Ekspandirano pluto	133
3.11.10	Ekstrudirani polistiren	134
3.11.11	Fenolna pjena	135
3.11.12	Kalcijev silikat	135
3.11.13	Kokos	136
3.11.14	Konoplja	137
3.11.15	Lan	137
3.11.16	Mineralna vuna	138
3.11.17	Pamuk	140
3.11.18	Pjenasto staklo	141
3.11.19	Porasti beton ili porobeton	142
3.11.20	Ovčja vuna	144
3.11.21	Slama	145
3.11.22	Trstika	145
3.11.23	Ostali toplinsko-izolacijski materijali, proizvodi i sustavi	146
3.11.23.1	Aerogel	146
3.11.23.2	Vakuumski izolacijski panel	148
3.11.23.3	Transparentna (providna / prozirna) toplinska izolacija	150
3.11.23.4	Reflektirajuća tankoslojna toplinska izolacija	155
3.11.23.5	Fazno promjenjivi materijali	156

4 TOPLINSKA SVOJSTVA GRAĐEVNIH DIJELOVA ZGRADE 161

4.1	Uvod	161
4.2	Jednodimenzionalni i stacionarni prijenos topline kroz neprozirni građevni dio zgrade ...	161
4.2.1	Plošni koeficijent prolaska topline, U , neprozirnog građevnog dijela koji se sastoji od paralelnih homogenih slojeva	161
4.2.2	Otpori unutarnjeg i vanjskog prijelaza topline	166
4.2.3	Toplinski otpor zračnih slojeva	168
4.2.4	Toplinski otpori negrijanih prostora	172
4.2.5	Koeficijent prolaska topline, U , neprozirnog građevnog dijela koji se sastoji od homogenih i nehomogenih slojeva	173
4.2.6	Ispravljanje plošnog koeficijenta prolaska topline U	177
4.2.7	Temperaturna krivulja	179
4.3	Ponašanje građevnih dijelova zgrade u odnosu na vodu	183
4.3.1	Uvod	183
4.3.2	Svojstva vlažnog zraka	184
4.3.3	Izbjegavanje kritične vlažnosti na površini građevnog dijela zgrade	186
4.3.4	Sadržaj vlage u građevnom materijalu	198
4.3.5	Higroskopna vlažnost materijala	199
4.3.6	Prijenos vlage kapilarnim procesom	202
4.3.7	Difuzija vodene pare kroz građevne dijelove zgrade	202
4.4	Toplinski mostovi u građevnim dijelovima zgrade	218
4.4.1	Definicija toplinskog mosta	218
4.4.2	Razredba toplinskih mostova	219
4.4.3	Posljedice toplinskih mostova	221
4.4.4	Koncept koeficijenta toplinske veze	222
4.4.5	Modeliranja zgrade za numerički proračun	224
4.4.6	Određivanje koeficijenta toplinske veze i toplinskog toka iz 3-D proračuna	226

4.4.7	Određivanje koeficijenta toplinske veze uporabom duljinskih i točkastih koeficijenata prolaska topline iz 3-D proračuna	227
4.4.8	Određivanje koeficijenta toplinske veze, toplinskog toka i duljinskog koeficijenta prolaska topline iz 2-D proračuna	230
4.4.9	Metode određivanja duljinskog koeficijenta prolaska topline	230
4.4.10	Temperature na površini toplinskog mosta sa strane prostorije	235
4.4.10.1	Određivanje temperature na unutarnjoj površini iz 3-D proračuna	236
4.4.10.2	Određivanje temperature na unutarnjoj površini iz 2-D proračuna	236
4.5	Proračun koeficijenta prolaska topline, U , prozirnih građevnih dijelova	237
4.5.1	Uvod	237
4.5.2	Proračun koeficijenta prolaska topline prozora, U_w	239
4.5.3	Proračun koeficijenta prolaska topline ostakljenja	244
4.5.4	Proračun koeficijenta prolaska topline prozora sa zatvorenim zaslonom s vanjske strane	246
4.5.5	Koeficijent prolaska topline vrata	248
4.5.6	Koeficijent prolaska topline okvira prozora / vrata	249
4.5.7	Duljinski koeficijent prolaska topline linijskog toplinskog mosta na spoju elementa ostakljenja ili neprozirne ispune s okvirom krila prozora	253
4.6	Prijenos topline u nestacionarnim uvjetima	254
4.6.1	Stacionarna i nestacionarna stanja	254
4.6.2	Akumulacija topline u građevnim dijelovima zgrade	256
4.6.3	Toplinska inercija (toplinska tromost)	260
4.6.4	Dinamičke toplinske karakteristike građevnih materijala	263
4.6.5	Kratkotrajni događaji prijenosa topline, temperatura dodira	265
4.6.6	Vremenska konstanta	266
4.6.7	Dinamičke toplinske karakteristike građevnog dijela zgrade uz sinusne rubne uvjete	268
4.6.7.1	Uvod	268
4.6.7.2	Sinusni rubni uvjeti	269
4.6.7.3	Periodički koeficijent toplinske veze	270
4.6.7.4	Periodički toplinski kapacitet	271
4.6.7.5	Vremenski pomak	272
4.6.7.6	Matrica prijenosa topline za građevni dio koji se sastoji od ravnih slojeva od homogenog materijala	272
4.6.7.7	Dinamičke toplinske karakteristike građevnog dijela zgrade od ravnih i homogenih slojeva (jednodimenzionalni toplinski tok)	277
5	IZMJENA ZRAKA U PROSTORU ZGRADE	285
5.1	Uvod	285
5.2	Kvaliteta unutarnjeg zraka	285
5.2.1	Sastav zraka	285
5.2.2	Izvori onečišćenja zraka	287
5.2.2.1	Općenito	287
5.2.2.2	Kemijsko onečišćenje zraka	287
5.2.2.3	Osjetilno onečišćenje zraka	288
5.2.3	Zdravstveni aspekti kvalitete unutarnjeg zraka	289
5.2.4	Osjetilna kvaliteta zraka	291
5.2.4.1	Mjerna jedinica za osjetilnu kvalitetu zraka	291
5.2.4.2	Kategorije osjetilne kvalitete unutarnjeg zraka	291
5.2.4.3	Ugljikov dioksid kao pokazatelj ljudskih bioloških izlučina	292
5.2.4.4	Vlažnost zraka	293
5.2.5	Upravljanje kvalitetom unutarnjeg zraka	294
5.2.6	Kvaliteta vanjskog zraka	295

5.2.7	Zona boravka	296
5.2.8	Učinkovitost ventilacije	297
5.2.9	Potrebni protok zraka za ventilaciju	298
5.2.10	Postupna metoda za određivanje potrebnog protoka zraka za ventilaciju	299
5.3	Zahtijevani i preporučeni projektni protoci zraka za ventilaciju	300
5.3.1	Općenito	300
5.3.2	Nestambene zgrade	300
5.3.3	Stambene zgrade	303
5.4	Vrednovanje kvalitete unutarnjeg zraka i ventilacije	305
5.5	Proračun protoka zraka u zgradama	307
5.5.1	Ventilacija, infiltracija i prozračivanje	307
5.5.2	Modeliranje strujanja zraka u zgradi	308
5.5.3	Protok zraka za prisilnu ili mehaničku ventilaciju	311
5.5.4	Protok zraka izazvan prirodnim mehanizmima (infiltracija, eksfiltracija i protok ventilacijskim otvorima)	314
5.5.4.1	Uvod	314
5.5.4.2	Tlak zraka	315
5.5.4.3	Promjena hidrostatskog tlaka zraka	317
5.5.4.4	Bernoullijeva jednadžba	318
5.5.4.5	Brzina vjetra	319
5.5.4.6	Tlak vjetra	320
5.5.4.7	Razlika između tlaka zraka unutar zgrade i tlaka zraka u vanjskom prostoru	325
5.5.4.8	Analiza razlika hidrostatskog tlaka	327
5.5.4.9	Karakteristike ovojnice zgrade u pogledu propuštanja zraka	332
5.5.4.10	Protok zraka kroz zgradu / zonu	335
5.5.5	Protok zraka uslijed izgaranja u ložištima	340
5.5.6	Protok zraka uslijed otvaranja prozora	341
5.5.6.1	Proračun protoka zraka prozračivanjem	341
5.5.6.2	Tipična uporaba otvaranja prozora	342
5.5.7	Određivanje prosječnih vrijednosti protoka zraka	342

6	POTREBNA KORISNA ENERGIJA ZA GRIJANJE I HLAĐENJE PROSTORA ZGRADE	345
6.1	Uvod	345
6.2	Proračunska granica zgrade i proračunske zone zgrade	346
6.3	Određivanje granica zone zgrade, ploštine građevnih dijelova i obujma zone zgrade	347
6.4	Bilanca energije na razini zone zgrade	349
6.5	Različiti tipovi metoda proračuna	350
6.6	Postavne temperature zone zgrade	352
6.7	Opći prikaz postupka proračuna	353
6.8	Mjesečna i sezonska metoda proračuna potrebne korisne energije za grijanje prostora zone zgrade	353
6.8.1	Potrebna korisna energija za grijanje	353
6.8.2	Prijenos topline transmisijom	354
6.8.3	Prijenos topline ventilacijom	355
6.8.4	Dinamički parametri	355
6.8.4.1	Uvod	355
6.8.4.2	Faktor iskorištenja toplinskih dobitaka za grijanje	355
6.8.4.3	Efektivni toplinski kapacitet zgrade	357
6.8.4.4	Vremenska konstanta zgrade	359
6.8.5	Grijanje s prekidima i razdobljima nekorištenja	360

6.8.6	Godišnja potrebna korisna energija za grijanje	361
6.8.7	Trajanje sezone grijanja za potrebe proračuna parametara koji ovise o trajanju sezone	362
6.8.7.1	Mjesečna metoda proračuna	362
6.8.7.2	Sezonska metoda proračuna	363
6.8.7.3	Stupanj – dan metoda	365
6.9	Mjesečna i sezonska metoda proračuna potrebne korisne energije za hlađenje prostora zone zgrade, ...	366
6.9.1	Potrebna korisna energija za hlađenje	366
6.9.2	Prijenos topline transmisijom	367
6.9.3	Prijenos topline ventilacijom	367
6.9.4	Dinamički parametri	368
6.9.4.1	Uvod	368
6.9.4.2	Faktor iskorištenja toplinskih gubitaka za hlađenje	368
6.9.4.3	Vremenska konstanta zgrade i efektivni toplinski kapacitet zgrade	370
6.9.5	Hlađenje s prekidima i razdobljima nekorištenja	370
6.9.6	Godišnja potrebna korisna energija za hlađenje, mjesečna metoda	371
6.9.7	Trajanje sezone hlađenja za potrebe proračuna parametara koji ovise o trajanju sezone	371
6.9.7.1	Mjesečna metoda proračuna	371
6.9.7.2	Sezonska metoda proračuna	372
6.10	Međudjelovanja tijela zgrade i tehničkih sustava te međudjelovanje između više zona	373
6.10.1	Uvod	373
6.10.2	Načela proračuna vraćenih toplinskih gubitaka tehničkih sustava	373
6.10.3	Proračun više zona s toplinskom vezom između zona – mjesečna metoda ...	374
6.11	Jednostavna satna dinamička metoda proračuna	375
6.11.1	Uvod	375
6.11.2	Opis proračunskog modela	377
6.11.3	Glavne varijable	377
6.11.4	Unutarnji i Sunčevi dobitci topline	379
6.11.5	Određivanje temperature zraka i radne temperature za danu vrijednost $\Phi_{HC,nd}$	380
6.11.5	Proračun unutarnje temperature i zahtijevane snage grijanja i hlađenja	381
6.11.6	Postupak proračuna	381
6.11.7	Godišnja potrebna korisna energija za grijanje i hlađenje	382
6.12	Ukupni koeficijent prijenosa topline transmisijom	383
6.12.1	Uvod	383
6.12.2	Koeficijent prijenosa topline transmisijom izravno između unutarnjeg i vanjskog prostora	384
6.12.3	Koeficijent prijenosa topline transmisijom kroz građevne dijelove u dodiru s tlom	385
6.12.3.1	Uvod	385
6.12.3.2	Ulazni podaci za proračun	388
6.12.3.3	Metode proračuna prijenosa topline preko tla	390
6.12.3.4	Proračun koeficijenata prolaska topline, U , kroz pod na tlu, između unutarnjeg i vanjskog prostora	391
6.12.3.5	Proračun koeficijenata prolaska topline, U , kroz pod na tlu s rubnom toplinskom izolacijom, između unutarnjeg i vanjskog prostora	392
6.12.3.6	Proračun koeficijenata prolaska topline, U , kroz uzdignuti pod, između unutarnjeg i vanjskog prostora	395
6.12.3.7	Proračun koeficijenata prolaska topline, U , kroz grijani podrum, između unutarnjeg i vanjskog prostora	398

6.12.3.8	Proračun koeficijenata prolaska topline, U , kroz negrijani podrum, između unutarnjeg i vanjskog prostora	400
6.12.3.9	Djelomično grijani podrum	400
6.12.3.10	Proračun toplinskog toka kroz tlo odvojeno za svaki mjesec	401
6.12.3.11	Proračun toplinskog toka kroz tlo primjenom prosječnih mjesečnih temperatura	404
6.12.3.12	Proračun toplinskog toka kroz tlo tijekom sezone grijanja (ili hlađenja)	404
6.12.3.13	Proračun prosječnog godišnjeg toplinskog toka kroz tlo	404
6.12.3.14	Najveći mjesečni toplinski tok	405
6.12.3.15	Mjesečni koeficijent prijenosa topline kroz tlo	405
6.12.3.16	Ukupni prijenos topline tijekom sezone grijanja i hlađenja	405
6.12.3.17	Utjecaj tekuće podzemne vode	406
6.12.3.18	Podovi na tlu s ugrađenim sustavom grijanja ili hlađenja	407
6.12.3.19	Hladne komore (i klizališta)	408
6.12.3.20	Toplinski tok kroz pod za pojedinačne prostorije	409
6.12.4	Koeficijent prijenosa topline transmisijom kroz nekondicionirane prostore	409
6.12.5	Koeficijent prijenosa topline transmisijom prema susjednim zgradama	411
6.13	Ukupni koeficijent prijenosa topline ventilacijom	412
6.14	Unutarnji toplinski dobitci	415
6.14.1	Općenito	415
6.14.2	Ukupni unutarnji toplinski dobitci	415
6.14.3	Unutarnji toplinski dobitci od korisnika i od uređaja	416
6.14.4	Toplina koju disipiraju ili apsorbiraju sustavi hladne i tople vode i odvodnje	419
6.14.5	Toplina koju disipiraju sustavi grijanja, hlađenja i ventilacije	419
6.14.6	Toplina iz procesa i dobara	420
6.15	Toplinski dobitci od Sunčevog zračenja	420
6.15.1	Uvod	420
6.15.2	Proračunski postupak	420
6.15.3	Toplinski tok Sunčevih dobitaka preko građevnog dijela zgrade	421
6.15.4	Efektivna sunčana sabirna ploština za ostakljene (prozirne) građevne dijelove	421
6.15.5	Prolazak Sunčeve energije kroz ostakljene (prozirne) građevne dijelove	421
6.15.6	Pomični elementi za zaštitu od Sunčeva zračenja (pomična sjenila)	423
6.15.7	Faktori smanjenja zbog vanjskih sjenila	424
6.15.8	Efektivna sunčana sabirna ploština za neprozirne građevne dijelove	427
6.15.9	Toplinsko zračenje prema nebu	428
6.15.10	Sunčevi toplinski dobitci nekondicioniranih osunčanih ostakljenih prostora (zimskih vrtova)	428

7 TEHNIČKI SUSTAVI ZGRADE

7.1 Uvod

7.2 SUSTAVI GRIJANJA PROSTORA

7.2.1	Uvod	432
7.2.2	Tipologija sustava grijanja	433
7.2.3	Lokalni ili pojedinačni sustavi grijanja	433
7.2.4	Sustavi centralnog grijanja	434
7.2.4.1	Općenito	434
7.2.4.2	Izvori topline za sustave centralnog grijanja	437
7.2.4.3	Cijevni razvod	445
7.2.4.4	Ogrjevna tijela	448
7.2.4.5	Dimovodni sustavi	450

7.2.4.6	Regulacija sustava grijanja	450
7.2.4.7	Sigurnosna oprema sustava grijanja	451
7.2.5	Daljinsko grijanje	451
7.2.6	Potrebna konačna energija za rad sustava za grijanje prostora zgrade	452
7.2.6.1	Principi proračuna	452
7.2.6.2	Pokazatelji energetske učinkovitosti (energetskog svojstva) sustava ili podsustava za grijanje prostora	457
7.2.6.3	Energetski gubici sustava za grijanje prostora	458
7.2.6.4	Pojednostavnjene i detaljne metode za proračun energetskih gubitaka sustava	459
7.2.6.5	Podsustav proizvodnje topline – toplinski kotao	459
7.2.6.6	Podsustav proizvodnje topline – toplinski solarni sustav	460
7.2.6.7	Metode proračuna za daljinsko grijanje	462
7.2.6.8	Podsustav proizvodnje topline – kogeneracijski sustav u zgradi	464
7.3	SUSTAVI ZA PRIPREMU POTROŠNE TOPLE VODE (PTV)	465
7.3.1	Uvod	465
7.3.2	Sustavi za zagrijavanje potrošne tople vode	465
7.3.3	Potrebna korisna toplota za zagrijavanje potrošne tople vode (PTV)	467
7.3.3.1	Potrebna korisna energija za PTV zasnovana na dnevnim programima	467
7.3.3.2	Potrebna korisna energija za PTV zasnovana na potrebnom obujmu tople vode	467
7.3.3.3	Potrebna korisna energija za PTV zasnovana na ploštini neto korisne površine poda zgrade	470
7.3.3.4	Tablični prikaz potrebne korisne energije za PTV	470
7.3.4	Potrebna konačna energija za rad sustava za pripremu potrošne tople vode ...	470
7.4	SUSTAVI VENTILACIJE PROSTORA	473
7.4.1	Tipovi sustava ventilacije prostora	473
7.4.2	Principi rada sustava ventilacije	474
7.4.3	Sustav prirodne ventilacije	475
7.4.3.1	Općenito	475
7.4.3.2	Komponente sustava prirodne ventilacije	478
7.4.3.2.1	Ventilacijski otvori za dovod zraka	478
7.4.3.2.2	Otvori za prestrujavanje zraka između prostorija	479
7.4.3.2.3	Otvori za odvođenje zraka i ventilacijski kanali	479
7.4.4	Sustav prisilne ventilacije	480
7.4.4.1	Pregled sustava prisilne ventilacije	480
7.4.4.2	Sustav tlačne ventilacije	481
7.4.4.3	Sustav odsisne ventilacije	482
7.4.4.4	Sustav odsisno-tlačne ventilacije	482
7.4.4.5	Komponente sustava prisilne ventilacije	485
7.4.5	Potrebna energija za obradu zraka kod sustava ventilaciju	486
7.4.5.1	Općenito	486
7.4.5.2	Transmisijski gubici topline zračnih kanala koji se nalaze u kondicioniranoj zoni	487
7.4.5.3	Transmisijski gubici topline zračnih kanala koji se nalaze izvan kondicionirane zone.....	487
7.4.5.4	Gubici kroz mjesta propuštanja zraka zračnih kanala	487
7.4.5.5	Ventilator	488
7.4.5.6	Izmjenjivač topline za isključivo osjetilnu toplinu	488
7.4.5.7	Aspekti odleđivanja	489

7.4.5.8	Ograničavanje temperature dobavnog zraka	490
7.4.5.9	Komora za miješanje	490
7.4.5.10	Predgrijanje	490
7.4.5.11	Predhlađenje	491
7.4.5.12	Ovlaživanje u zimi	491
7.4.5.13	Odvlaživanje	492
7.4.6	Potrebna konačna energija za rad sustava za ventilaciju	492
7.5	SUSTAVI HLAĐENJA PROSTORA	493
7.5.1	Uvod	493
7.5.2	Kompresijski rashladni uređaj	494
7.5.3	Apsorpcijski rashladni uređaji	495
7.5.4	Rashladnici vode (rashladni agregati)	495
7.5.5	Spremnici rashladne energije	495
7.5.6	Potrebna konačna energija za rad sustava hlađenja	496
7.6	SUSTAVI KLIMATIZACIJE PROSTORA	496
7.6.1	Uvod.....	496
7.6.2	Centralni sustav klimatizacije	498
7.6.2.1	Sustavi samo sa zrakom (zračni sustavi)	498
7.6.2.2	Sustavi s vodom i zrakom (zračno – vodni sustavi).....	501
7.6.3	Lokalni sustavi klimatizacije	501
7.6.3.1	Kompaktni sustavi	501
7.6.3.2	Split (razdvojeni) sustavi	502
7.6.4	Komponente sustava klimatizacije	502
7.6.4.1	Klima komora	502
7.6.4.2	Kanalni razvod	505
7.6.4.3	Istrujni i odsisni otvori	506
7.6.4.4	Cirkulacijska pumpa / crpka	506
7.6.4.5	Armatura	506
7.6.4.6	Ventilokonvektori	506
7.6.4.7	Indukcijski uređaji	507
7.6.4.8	Rashladne / ogrjevne plohe	507
7.6.4.9	Prigušivač zvuka	507
7.6.4.10	Zbirni prikaz komponenata sustava klimatizacije i njihove funkcije ...	507
7.6.5	Proračun potrebne konačne energije za rad HVAC sustava	509
7.6.5.1	Pregled sustava HVAC	509
7.6.5.2	Odnos metoda proračuna potrebne korisne energije za prostor zgrade i konačne energije za rad sustava	511
7.6.5.3	Proračun potrebne konačne energije za rad sustava	512
7.7	SUSTAVI ELEKTRIČNE RASVJETE ZGRADA	515
7.7.1	Uvod	515
7.7.2	Osnovne fotometrijske veličine	516
7.7.3	Proračun energije utrošene za rasvjetu prostora zgrade	516
8	ENERGETSKA UČINKOVITOST (ENERGETSKO SVOJSTVO) ZGRADE	521
8.1	Energetska učinkovitost (energetska efikasnost)	521
8.2	Stupanj djelovanja.....	522

8.3. Ocjenjivanje energetske učinkovitosti (energetskog svojstva) zgrade	523
8.4 Potrošnja energije u zgradi	525
8.5 Granica sustava	526
8.6 Vrste karakteristika energetske učinkovitosti zgrade (vrste energetske karakteristike zgrade)	527
8.7 Energetska karakteristika zgrade određena proračunom	528
8.7.1 Postupak proračuna	528
8.7.2 Proračun potrebnih korisnih toplinskih energija zgrade	528
8.7.3 Proračun potrebnih konačnih energija za rad tehničkih sustava zgrade	529
8.7.3.1 Podaci o tehničkim sustavima zgrade bez dijela sustava za proizvodnju topline	529
8.7.3.2 Podaci o sustavima za proizvodnju toplinske energije	530
8.8 Energetska karakteristika zgrade određena mjerenjem	532
8.9 Ponderirane karakteristike energetske učinkovitosti (energetskog svojstva) zgrade ...	534
8.9.1 Primarna energija kao energetska karakteristika zgrade	534
8.9.2 Emisija ugljikovog dioksida, CO ₂ , kao energetska karakteristika zgrade	535
8.9.3 Energetska karakteristika zgrade definirana politikom	536
8.10 Izvješćivanje o ocjenjivanju potrošnje energije neke zgrade	536
 Prilog 2.1 Grčki alfabet	541
Prilog 2.2 Predmetci za tvorbu decimalnih jedinica	541
Prilog 3.1 Projektne vrijednosti za najčešće korištene građevne materijale (prema HRN EN ISO 10456)	542
Prilog 3.2 Koeficijenti pretvorbe za temperaturu (prema HRN EN ISO 10456)	546
Prilog 3.3 Vlažnosna svojstva i specifični toplinski kapacitet toplinsko-izolacijskih materijala i materijala za zide (prema HRN EN ISO 10456)	550
Prilog 4.1 Temperature rosišta za vodenu paru u zraku u ovisnosti o temperaturi i relativnoj vlažnosti zraka	552
Prilog 4.2 Tlak zasićene vodene pare i obujamska vlažnost zraka kod zasićenja	553
Prilog 4.3 Prikaz kompleksnih brojeva	554
 Kazalo pojmova	557
Literatura	567
O autoru	577

Predgovor

Vrijeme izobilja energije i jeftine energije je prošlo. Prirodni resursi fosilnog i nuklearnog goriva se postupno iscrpljuju. Njihova cijena pokazuje trend stalnog rasta. S druge strane, izgaranjem fosilnih goriva u atmosferu odlaze goleme količine ugljikova dioksida što ima za posljedicu značajne klimatske promjene: velike poplave, suše, ekstremne vrućine, uragane, ... Te klimatske pojave će se nezaustavljivo još i pogoršavati. Uz sadašnji porast ekološkog zagađenja predviđa se da bi već u ovom stoljeću planet Zemlja mogao postati neprikladan za život.

Da bi se spriječio razvoj takvog scenarija, međunarodna zajednica je dogovorila određene zajedničke mjere za hitno smanjenje antropogeno uvjetovane emisije plinova s efektom staklenika. Imperativ je ograničiti uzroke globalnog klimatskog zatopljenja, a to znači drastično smanjiti potrošnju fosilnih goriva, ali istovremeno i osigurati daljnji razvoj društva.

Sektor zgradarstva u zemljama EU odgovoran je za oko 40 % potrošnje konačne energije i za oko jednu trećinu emisije CO₂. Zgrade su tako najveći sektorski potrošač energije. Značajne uštede energije, a time i smanjenje emisije ugljikova dioksida u sektoru zgradarstva može se postići građenjem kuća s toplinski dobro izoliranom ovojnicom, s inteligentnim tehničkim sustavima, učinkovitom obnovom zraka, većim korištenjem obnovljivih izvora energije te visokom razinom prirodne osvijetljenosti prostora zgrade. U EU od 2020. godine sve nove zgrade morati će zadovoljiti standard „skoro nul-energetske kuće“. Ovakvo drastično smanjenje uporabe energije u zgradi nipošto nije u suprotnosti s osnovnim ciljevima građenja zgrada: dobivanjem prostora s optimalnom ugodnosti boravka, s malim rizicima u pogledu zdravlja njenih korisnika, visokom kvalitetom tijela zgrade bez građevinskih šteta, zadovoljavajućom zaštitom okoliša i sve to s optimiranim ukupnim troškovima.

Ova knjiga analizira međusobno djelovanje zgrade i energije, dakle, povezanost energije i arhitekture. Arhitektonski koncept zgrade utječe na uvjete toplinskog komfora u zgradi i na potrošnju energije. Zadovoljenje potreba korisnika zgrade uz racionalno korištenje energije jednako je značajno kao i mehanička stabilnost zgrade, oblikovno-estetski aspekt zgrade te njena integracija u prostor. Pomoću multidisciplinarnog integralnog pristupa projektiranju zgrada moguće je osigurati istovremeno i dobru arhitektonsku kvalitetu i optimalnu unutarnju klimu i malu potrošnju energije.

Ova knjiga treba pomoći da se utvrde i istraže procesi kretanja energije u zgradi. Knjiga je podijeljena u osam poglavlja u kojima su detaljno objašnjeni osnovni pojmovi, fizikalni procesi vezani uz uporabu energije u zgradi te njihova matematička interpretacija. Kod toga je prihvaćen i prikazan koncept sadržan u relevantnim obvezujućim europskim dokumentima i brojnim europskim normama prihvaćenim od strane Hrvatskog zavoda za norme, koji uređuju ovo područje. Prikazane su mogućnosti modernog europskog „proračunskog alata“ i njegova primjena. Konačna mjera ocjene energetske kvalitete zgrade je potrebna primarna energija svedena na ploštinu grijane površine zgrade, kod čega se bilanciraju svi tokovi energije u zgradi.

Knjiga je namijenjena potrebama studenata građevinskog i arhitektonskog fakulteta, ali i studentima drugih tehničkih fakulteta koji se susreću s problemima potrošnje energije u zgradama. Knjiga će kao priručnik biti korisno pomagalo i inženjerima u praksi, posebno onima koji provode energetske preglede i energetske certificiranje zgrada, a korisno će poslužiti i za izobrazbu osoba koji se na to pripremaju. Knjiga je, dakle, namijenjena širokoj čitalačkoj populaciji tj. svima onima koji se zanimaju za problematiku međudjelovanja zgrade i energije.

Svim učesnicima u gradnji želim mnogo uspjeha u realizaciji energetske učinkovitih zgrada. Svaka takva zgrada vaš je doprinos rješavanju energijskog problema.

U Zagrebu, lipanj 2016.

Autor

Vladimir Šimetin

1 ENERGIJA I ZGRADA

1.1 Što je energija

Stvarno bogatstvo neke države je energija s kojom raspolaže. Energija je kamen temeljac današnje civilizacije te pokretač svih aktivnosti na Zemlji. Postoji vrlo uska povezanost između potrošnje energije te gospodarskog i društvenog razvitka neke države. Proces gospodarskog razvitka znači ustvari uporabu sve više energije radi povećanja proizvodnje. Zato je sigurna i trajna opskrba energijom s prihvatljivom cijenom preduvjet gospodarskog rasta, tehnološkog napretka i rasta životnog standarda. Opskrba energijom značajna je kao što je to proizvodnja hrane i osiguranje potrebne količine pitke vode. Raspoloživost energijom ili njena nedostatnost znače razvoj ili zaostajanje, napredak ili siromaštvo. Zbog velikog utjecaja na gospodarski razvoj i kvalitetu življenja, energija je postala glavni strateški resurs razvijenih država.

U fizici se **energija** (od grčke riječi *energos* što znači aktivnost) definira kao sposobnost tijela da obavlja rad. To znači da se rad može vršiti samo na račun energije. Što tijelo ima više energije, to je sposobnije da izvrši veći rad. Energija može, dakle, prelaziti u rad, ali i obrnuto, ako okolica vrši rad na tijelu, povećava se energija tijela.

Brzinu promjene energije nazivamo snagom. **Snaga** je, dakle, energija podijeljena s vremenom promjene tj. omjer rada i vremena tijekom kojeg se taj rad obavi.

Jedan od temeljnih prirodnih zakona je zakon o očuvanju ukupne energije prema kojem zbroj svih oblika energije u zatvorenom sustavu (sustav koji ne prima energiju iz okolice niti joj je predaje) je konstantan. To znači da se energija ne može stvoriti niti uništiti već samo može prelaziti iz jednog oblika u drugi. Zato izrazi kao „proizvodnja energije“, „potrošnja energije“, ili „gubitci energije“ nisu točni u fizikalnim smislu, iako se koriste u svakodnevnom govoru.

Ako sustav A nije zatvoren već izmjenjuje energiju sa sustavom B, tada je smanjenje ukupne energije sustava A jednako radu koji sustav A obavi na sustavu B i toplini koja je prešla sa sustava A na sustav B. Smanjenje ukupne energije sustava A jednako je povećanju ukupne energije sustava B.

1.2 Mjerne jedinice energije

Mjerna jedinica za energiju je ista kao i za rad. U Međunarodnom sustavu mjernih jedinica, oznaka SI [1] (zakonite mjerne jedinice u RH [2], [3]), jedinica za energiju / rad je džul (etimološki: joule), oznaka J. 1 J je rad što ga obavi sila 1 N (jedinica za silu njutn, etimološki: newton, oznaka N) na putu duljine 1 m u smjeru sile:

$$J = N \times m = 1kg \times m^2 \times s^{-2} \quad (1.1)$$

Jedinica SI za snagu je vat (etimološki: watt), oznaka W. 1 W je snaga koja u 1 s obavi rad od 1 J ili se koristi energijom 1 J, dakle:

$$W = \frac{J}{s} \quad (1.2)$$

Iz jednadžbe (1.2) slijedi da je:

$$J = W \times s \quad (1.3)$$

Budući da je jedinica J vrlo mala za praktično mjerenje energije, ona često dobiva prefikse koji naznačuju njene višekratnike: P (peta) = 10^{15} , T (tera) = 10^{12} , G (giga) = 10^9 , M (mega) = 10^6 ili k (kilo) = 10^3 .

Osim jedinice J i njenih višekratnika, svaki tip energije ima i svoju privilegiranu tradicionalnu jedinicu. To su za:

- naftu: tona ekvivalentne nafte (toe odnosno Mtoe)
- prirodni plin: British thermal unit (Btu)

- ugljen: tona ekvivalentnog ugljena (tce)
- električnu energiju: kilovatsat (kWh).

Tradicionalna standardizirana mjerna jedinica za energiju koja se koristi u statističko-komparativne svrhe je tona ekvivalentne nafte (eng: ton of oil equivalent, oznaka toe) ili njen višekratnik – milijun tona ekvivalentne nafte (Mtoe). Tona ekvivalentne nafte jednaka je količini energije koja se oslobodi izgaranjem jedne tone sirove nafte s neto ogrjevnom vrijednosti 41 868 kJ/kg, što odgovara toni „srednje“ nafte. Vrijede slijedeći odnosi:

$$1 \text{ toe} = 41,855 \text{ GJ} \text{ (zaokruženo } 42 \text{ GJ)} \quad (1.4)$$

$$1 \text{ toe} = 39,68 \text{ MBtu} \quad (1.5)$$

$$1 \text{ toe} = 1,43 \text{ tce} \quad (1.6)$$

$$1 \text{ toe} = 11\,628 \text{ kWh} \quad (1.7)$$

$$1 \text{ toe} = 1\,000 \text{ m}^3 \text{ prirodnog plina (ekvivalent u energetskom pogledu).} \quad (1.8)$$

British thermal unit je tradicionalna angloamerička jedinica za energiju, a jednaka je približno:

$$1 \text{ Btu} = 1055 \text{ J} \quad (1.9)$$

Jedinica energije tona ekvivalentnog ugljena (eng.: ton of coal equivalent, oznaka tce) je jednaka energiji tone ugljena donje ogrjevne vrijednosti 29 307,6 kJ/kg, dakle:

$$1 \text{ tce} = 29,3076 \text{ GJ} \quad (1.10)$$

$$1 \text{ tce} = 8\,141 \text{ kWh} \quad (1.11)$$

Od jedinica za mjerenje energije koje su izvan Međunarodnog sustava jedinica dopuštena je upotreba i jedinice vatsat, oznaka Wh, kao i njenih dekadskih višekratnika: kilovatsat (oznaka kWh), megavatsat (oznaka MWh), gigavatsat (oznaka GWh) itd. Jedan kilovatsat odgovara energiji koju potroši uređaj snage jedan kilovat za vrijeme rada od jednog sata. Vrijedi:

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \times 10^6 \text{ J} = 3,6 \text{ MJ} \quad (1.12)$$

odnosno:

$$1 \text{ MJ} = 0,278 \text{ kWh} \quad (1.13)$$

Primjer 1.1

Koliko energije potroši elektrouređaj snage 2,5 W koji radi neprekidno tijekom jedne godine.

Odgovor: tijekom jedne godine uređaj potroši ukupno:

$$2,5 \text{ W} \times 24 \text{ h/dan} \times 365 \text{ dana} = 21,9 \text{ kWh}$$

Jedinica „negawat“ [4] se koristi za mjerenje energije „u minusu“ tj. potrošnje energije koja nije ostvarena (mjerenje uštede energije) zbog poboljšanja energetske učinkovitosti (efikasnosti) promjenom tehnologije ili ponašanja. Na primjer, zamjenom klasične žarulje sa žarnom niti od 100 W s fluorescentnom žaruljom od 20 W, potroši se pet puta manje energije za jednaku razinu osvijetljenosti. Potrebna električna snaga smanjena je za 80 W tj. ostvareno je „80 vata u minusu“, odnosno 80 negavata. Rezultat ugradnje fluorescentne žarulje je isti kao da se uz klasičnu žarulju ugradila mala elektrana snage 80 negavati.

Negavati se kod zgrade mogu proizvoditi poboljšanjem toplinske izolacije zgrade, smanjenjem potrošnje energije poboljšanjem regulacije sustava grijanja itd.

1.3 Izvori i oblici energije

Energija s kojom raspolažu stanovnici Zemlje dolazi od Sunca (Sunčevo zračenje), zatim od energije koja se nalazi u Zemlji (toplina Zemlje, izvori vruće vode, fosilna goriva, nuklearna goriva) i od energije koja je posljedica gravitacijskih sila Sunca, Mjeseca i Zemlje (plima i oseka).

Izvori energije su sredstva ili pojave koji služe za „dobivanje“ energije ili su sami neki oblik energije koji može vršiti koristan rad [5]. Prirodni izvori energije su: energija Sunčeva zračenja, energija goriva, energija vodotoka, energija vjetra, energija morskih struja i valova,

energija plime i oseke, energija topline Zemlje, energija vrućih izvora,... Sve na Zemlji postojeće izvore energije nazivamo **energijski resursi**. Sve postojeće do sada otkrivene (geografski i geološki određene) izvore energije nazivamo **energijske rezerve**.

Goriva su gorive tvari koje se koriste kao izvori energije. Goriva se pojavljuju kao čvrsta ili kruta (npr. ugljen), kapljevita ili tekuća (npr. loživo ulje) te plinovita (npr. prirodni plin). S obzirom na postanak mogu biti biljnog (ugljen, treset, drvo, biomasa), životinjskog (nafta, plin, naftonosni škriljevci) te biljnog i životinjskog porijekla (bioplin). Izgaranjem goriva oslobađa se energija. Količinu energije koja se oslobodi izgaranjem goriva izražavamo njegovom ogrjevnom vrijednošću. **Gornjom ogrjevnom vrijednosti** nazivamo količinu topline koja se oslobodi potpunim izgaranjem jednog kilograma goriva i kondenzacijom sve vodene pare iz dimnih plinova nastalih pri izgaranju. **Donja ogrjevna vrijednost** razlikuje se od gornje ogrjevne vrijednosti za toplinu oslobođenu pri kondenzaciji vodene pare. Kod donje ogrjevne vrijednosti toplina oslobođena kod kondenzacije vodene pare ne uzima se u obzir već se pretpostavlja da vodena para nastala izgaranjem ostaje u parovitom stanju. Ogrjevna vrijednost se izražava u MJ/kg. Odnos donje i gornje ogrjevne vrijednosti načelno je manji od jedan ili najviše jednak jedan. Za prirodni plin on iznosi oko 0,9, za naftne derivate između 0,92 i 0,93, a za kruta mineralna goriva između 0,95 i 0,98.

Prirodne izvore energije, prema njihovoj obnovljivosti, možemo podijeliti u dvije skupine: **neobnovljive ili iscrpive izvore energije** i **obnovljive ili neiscrpive izvore**.

Neobnovljivi izvori energije su oni čije su zalihe u prirodi konačne i ograničene. Tu spadaju: ugljen i treset, nafta, prirodni plin, naftonosni škriljevci, nuklearna goriva... Nazivamo ih i **klasičnim izvorima energije**. Ugljen, naftu i prirodni plin obično zajednički nazivamo **fosilna goriva**, jer su nastala iz fosilnih ostataka biljaka i životinja, koji su živjeli prije više desetaka milijuna godina. Oni danas zadovoljavaju najveći dio energijskih potreba čovječanstva.

Obnovljivi izvori energije su oni kojih u prirodi ima u neograničenim količinama. Njihov se prosječni dotok, u kružnim ciklusima, stalno obnavlja u prirodi. U tu skupinu spadaju: drvo, biomasa, bioplin, vodne snage, energija Sunčeva zračenja, energija vjetra, energija plime i oseke, energija morskih struja i valova,... Nazivamo ih i **alternativnim izvorima energije**.

Prema uobičajenosti uporabe prirodne izvore energije dijelimo na **konvencionalne** (ogrjevno drvo, fosilna goriva, energija vodotoka, nuklearna goriva i vrući izvori) i **nekonvencionalne** (svi koji nisu konvencionalni) izvore.

Samo rijetki prirodni izvori energije mogu se neposredno korisno upotrijebiti, kao što je to primjerice energija Sunčeva zračenja kada se koristi za neposredno grijanje prostora. Većinu prirodnih izvora energije potrebno je pretvoriti u neki drugi oblik energije, pogodniji za uporabu. Da bi se dobili za uporabu najpogodniji oblici energije, često ih je potrebno pretvoriti dva ili više puta. Ovisno o njihovu mjestu u procesima pretvorbe, razlikujemo: primarnu energiju, sekundarnu energiju, konačnu energiju i korisnu energiju.

Primarna energija ili **primarni izvori energije** su izvori energije koji se dobivaju izravno iz prirode (geosfere, hidrosfere ili atmosfere) i koji još nisu bili podvrgnuti nijednom antropogenom (antropogen – koji se odnosi na čovjeka) procesu pretvorbe. Primarna energija uključuje neobnovljive (ugljen, prirodni plin, sirova nafta,...) i obnovljive (energija vjetra, Sunčevo zračenje, energija voda,...) izvore energije. Električna energija proizvedena vjetroelektranama, hidroelektranama ili fotonaponskim sustavima promatra se kao primarna energija. Radi se, dakle, o proizvodnji električne energije koja se zatim predaje u prijenosnu mrežu, a ne o potrošnji konačne energije. Međutim, proizvodnja električne energije ili topline u termoelektranama (izgaranjem prirodnog izvora energije) ne predstavlja proizvodnju primarne energije.

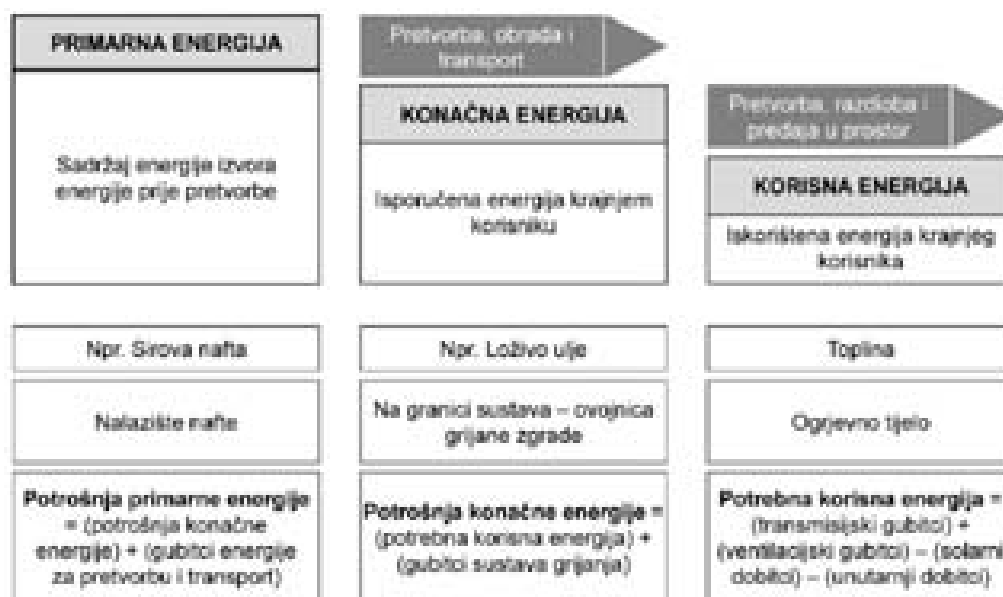
Kad se radi o zgradi, primarna energija je energija „utrošena“ za „proizvodnju“ konačne energije isporučene zgradi, a proračunavamo je iz isporučenih i izvezenih količina energenata pomoću faktora pretvorbe.

Sekundarna energija (transformirana energija) ili **sekundarni izvori energije** su izvori energije koji su raznim tehničkim postupcima pretvorbe dobiveni iz primarnih izvora (npr. loživo ulje, briketi, električna energija proizvedena u termoelektrani,...). Energijske pretvorbe primarnih izvora energije provode se radi dobivanja tehnički iskoristivih izvora energije. Sve energijske pretvorbe popraćene su, međutim, gubitcima energije zbog nepovrativosti procesa.

Konačna energija je energija koju upotrebljava krajnji korisnik (korisniku predana energija) te ju odgovarajućim procesima pretvara u korisnu energiju. Tu prvenstveno spada energija iz sekundarnih izvora (proizvodi nafte i ugljena, električna energija,...), ali i izravno upotrebljiva primarna energija (ugljen,...).

Korisna energija je iskorištena energija od strane krajnjeg korisnika (toplina iz radijatora, svjetlo iz svjetiljke, rashladna energija iz klima uređaja, mehanički rad stroja,...). Naime, pri procesima dobivanja, pretvorbe, pohrane i prijenosa primarnih i sekundarnih izvora te pretvorbe konačne energije dolazi do gubitaka energije. Korisna energija je onaj dio energije koji preostane nakon oduzimanja svih gubitaka. Korisna energija obavlja određenu uslugu (grije prostor, rasvjetljava prostor, pokreće stroj,...) što je i bio cilj odnosno svrha uporabe energije. Tvar ili pojavu koju se može upotrijebiti za dobivanje korisne energije nazivamo i **nositeljem energije** ili **energijom**.

Na slici 1.1 shematski je prikazan koncept korisne, konačne i primarne energije za slučaj tehničkog sustava grijanja zgrade.



Slika 1.1 Shematski prikaz energetskih ravnina korisne, konačne i primarne energije za tehnički sustav grijanja zgrade

Osim dobivanja i pretvorbe energije važna je i mogućnost njene pohrane ili „usklađivanja“. Sustave koji se koriste za pohranu energije karakteriziramo s dva parametra. Prvi je **vrijeme pohrane** koji znači vrijeme tijekom kojeg se energija može nalaziti u spremniku uz prihvatljive gubitke energije. Drugi parametar je **gustoća pohranjene energije** koja znači energijsku vrijednost nekog oblika energije izraženu po jedinici mase ili obujma. Mjerna jedinica je najčešće kWh/kg ili kWh/m³. Što su ova dva parametra veća, to je sustav za pohranu energije bolji.

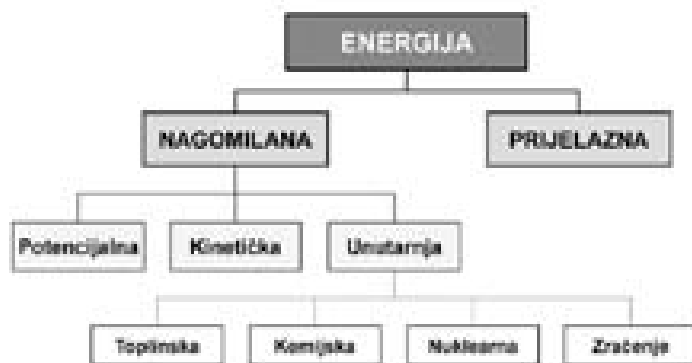
Prema načinu na koji uočavamo djelovanje energije razlikujemo više oblika energije: potencijalnu energiju, kinetičku energiju, toplinsku energiju ili toplinu, unutarnju energiju, električnu energiju, nuklearnu energiju itd. Sve ove oblike energije možemo svesti na dva

osnovna oblika: **nagomilane** (sakupljene, pohranjene) **oblike energije** i **prijelazne oblike energije**. Prijelazni oblik energije se pojavljuje samo onda kada nagomilani oblik energije prelazi s jednog tijela na drugo (rad, toplina, zračenje). Karakteristika tog prijenosa je kratkotrajnost pojave. Nagomilani oblici energije mogu se održati u svojem obliku kroz dulje vremensko razdoblje.

Nagomilani oblici energije su potencijalna, kinetička i unutarnja energija. **Potencijalna energija** tijela je energija koju tijelo ima zbog svog položaja prema drugim tijelima. **Gravitacijska potencijalna energija** je energija koju tijelo ima zbog svojeg položaja u odnosu na Zemlju. **Kinetička energija** je energija koju tijelo ima zbog svojega gibanja. Gravitacijsku potencijalnu energiju i kinetičku energiju zajedno nazivamo **mehanička energija**.

Unutarnja energija tijela je energija na razini njegovih molekula i atoma. Unutarnju energiju na razini molekula nazivamo i unutarnja toplinska energija (jer se dovodenjem ili odvođenjem topline mijenja brzina molekula a time i nagomilana energija), a na razini atoma kemijska energija (jer se energija mijenja promjenom kemijskog spoja, npr. izgaranjem). Unutarnju energiju na razini atomskih jezgara nazivamo nuklearna energija (energija fisije – razbijanje jezgara i energija fuzije – spajanje jezgara).

Pojavni oblici energije prikazani su na slici 1.2 [6].



Slika 1.2 Pojavni oblici energije

Prirodni izvori energije se prema tehničkoj mogućnosti i ekonomskoj opravdanosti njihova iskorištavanja dijele u tri skupine [6]:

- izvori energije za koje još nije tehnički riješen način iskorištavanja,
- izvori energije za koje je tehnički riješen način iskorištavanja ali je njihovo iskorištavanje ekonomski neisplativo (npr. energija plime i oseke,...),
- izvori energije za koje je tehnički riješen način iskorištavanja i to iskorištavanje je ekonomski isplativo (npr. ugljen, nafta, vodne snage,...).

1.4 Potrošnja energije kroz povijest

Tijekom povijesti ljudi su koristili razne izvore energije. Sve do polovice 18. stoljeća, za dobivanje topline i svjetla koristilo se drvo i biljni otpaci te ugljen s vrlo malim udjelom. Početkom druge polovice 18. stoljeća izumljen je parni stroj, što je označilo početak industrijske revolucije. Otada se uz drvo sve više koristi i ugljen koji u 19. stoljeću sasvim potiskuje drvo kao energent. Najveći udio potrošnje ugljena u ukupnoj potrošnji energije postignut je tridesetih godina 20. stoljeća.

Koncem 19. stoljeća pronalaskom motora s unutarnjim izgaranjem počelo je razdoblje korištenja nafte i prirodnog plina kao nositelja energije. Otad pa sve do naših dana udio nafte i prirodnog plina u ukupnoj potrošnji energije je brže ili sporije rastao.

Od polovice 20. stoljeća dolazi i do polaganog rasta udjela nuklearne energije na bazi fisije.

Ugljen je, dakle, omogućio ulazak u industrijsku epohu, nafta je omogućila nagli razvoj prometa („smanjila“ je udaljenosti), a nuklearna energija je omogućila daljnji razvitak čovječanstva.

Udio pojedinih izvora energije u ukupnoj energijskoj bilanci svijeta mijenjao se, dakle, kroz povijest čovječanstva. Ogrjevno drvo stoljećima je bilo skoro jedini izvor energije. „Doba drva“ zamijenilo je „doba fosilnih goriva“ u kojem i danas živimo. Otkriće nuklearne energije značilo je samo dodavanje jednog novog izvora energije.

Od početka industrijske revolucije prisutan je stalni porast potrošnje energije. Stalni porast potrošnje energije na svjetskoj razini očekuje se i u budućnosti. Dva su osnovna razloga za to očekivanje. Prvi je činjenica da se svake godine povećava broj stanovnika Zemlje za više desetaka milijuna pa će za njihov život trebati osigurati određenu novu količinu energije. Drugi razlog zbog kojeg se u budućnosti očekuje porast potrošnje energije jest činjenica da još uvijek veliki dio čovječanstva živi u siromaštvu pa je potrebno osigurati određene količine nove energije za popravljivanje njihovih uvjeta življenja. Današnja svjetska potrošnja energije iznosi oko 140×10^{12} kWh/a s prosječnim godišnjim porastom potrebne energije za oko 2,2 %.

S osiguranjem dovoljnih količina prirodnih oblika energije odnosno s opskrbom potrošača energijom, moglo bi u budućnosti biti problema. U neposrednoj budućnosti, podmirenje većih potreba za energijom biti će uglavnom fosilnim gorivima. Ali kako su ti izvori energije neobnovljivi tj. ima ih u ograničenim količinama, kroz određeno vrijeme (nekoliko desetaka godina) oni će biti iscrpljeni. Zato je danas pred znanstvenicima širom svijeta velika i odgovorna zadaća pronalaženja novih izvora energije odnosno novih tehnologija za njihovo iskorištavanje.

Moguća rješenja problema opskrbe energijom u daljoj budućnosti koja se mogu pretpostaviti u sadašnjem trenutku, jesu nuklearna energija fuzije i obnovljivi izvori energije [7].

Nuklearna fuzija je proces u kojem se jezgre lakih izotopa vodika spajaju u teže jezgre pri čemu se oslobađa velika količina energije. Još uvijek se u raznim dijelovima svijeta provode istraživanja kojima se nastoji postići kontrolirana fuzija. Eksperimenti koji se provode su vrlo skupi i složeni, a uspješan završetak istraživanja još uvijek nije siguran.

U energetsom sustavu budućnosti značajniju ulogu imati će obnovljivi izvori energije, prvenstveno biomasa i pretvorba Sunčeve energije te hidroelektrična energija čiji su potencijali danas gotovo u potpunosti iskorišteni samo u industrijski razvijenim zemljama.

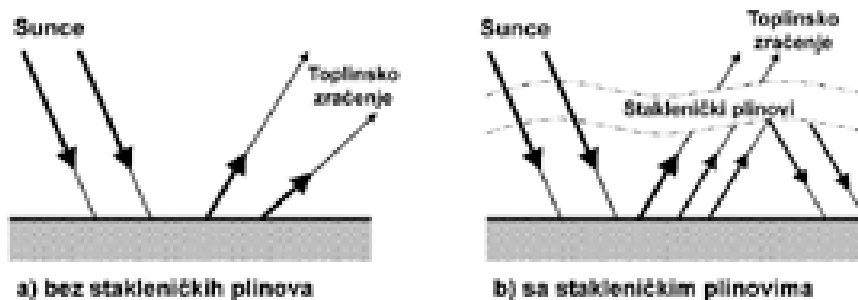
Danas i u bliskoj budućnosti veću pažnju treba posvetiti i iskorištavanju dvaju „nevidljivih izvora energije“, a to su štednja energije i veća učinkovitost (efikasnost) korištenja energije.

1.5 Energija i njen utjecaj na okoliš

Sustavi za pretvorbu energije izravno utječu na stanje onečišćenja okoliša.

Najveći dio potrebne konačne energije dobiva se izgaranjem fosilnih goriva. Pri tome se oslobađaju velike količine raznih plinova i dima koji negativno djeluju na čovjeka i njegov okoliš. Od svih produkata izgaranja danas se najviše spominje ugljikov dioksid, CO_2 , koji pripada grupi tzv. stakleničkih plinova zbog kojih dolazi na Zemlji do neželjenih klimatskih promjena. Naime, postoji već dovoljno snažnih naznaka koje upućuju na povezanost globalnog zagrijavanja Zemlje s porastom efekta staklenika kao posljedice ljudskih aktivnosti.

Prirodna zemljina atmosfera sadrži 0,03 obujamskih postotaka CO_2 ili ukupno $2,4 \times 10^{13}$ kg. CO_2 iz zraka troši se na stvaranje karbonata na Zemlji te za izgradnju tkiva biljaka. Različitim prirodnim procesima jednaka količina CO_2 vraća se natrag u atmosferu. Sloj CO_2 (i vodene pare) u atmosferi djeluje poput optičkog filtra koji dobro propušta vidljivi i ultraljubičasti dio Sunčeva zračenja, ali slabo propušta infracrveno zračenje Zemlje prema svemiru. Zbog toga se jedan dio topline Sunčeva zračenja koje je stiglo do Zemlje ne vraća natrag u svemirski prostor. Ovu pojavu nazivamo „efektom staklenika“ (slika 1.3).



Slika 1.3 Shematski prikaz mehanizma efekta staklenika

Posljedica opisanog prirodnog efekta staklenika jest konstantna prosječna temperatura površine Zemlje u iznosu oko $+15^{\circ}\text{C}$. Bez prirodnog efekta staklenika prosječna temperatura površine Zemlje bila bi znatno niža tj. iznosila bi oko -18°C , što znači da ne bi postojali uvjeti za život na Zemlji.

Atmosfera služi, dakle, kao zaštitni omotač koji štiti Zemlju od prekomjernog hlađenja ili zagrijavanja. Na toplinske uvjete na Zemlji bitno utječe sadržaj CO_2 i vodene pare u atmosferi. U razdoblju prije industrijske revolucije energija koju je Zemlja primala od Sunca bila je u prosjeku izjednačena s energijom njenog zračenja u svemir. Ta ravnoteža koja je postojala tisućama godina počela se narušavati kada je čovjek počeo koristiti fosilna goriva. Sve većim izgaranjem fosilnih goriva koncentracija CO_2 u zraku počela se povećavati. Danas svjetska energetika odbacuje u atmosferu svake godine novih 10^{13} kg CO_2 . Zbog toga je došlo do poremećaja u izmjeni topline između Zemlje i svemira. Ugljikov dioksid i drugi, zbog ljudskih aktivnosti, oslobođeni tzv. antropogeni staklenički plinovi prouzrokuju dodatni efekt staklenika što ima za posljedicu porast prosječne temperature površine Zemlje („globalno zatopljenje“).

Dodatni efekt staklenika je realnost i postoji rizik da se prekorače pragovi preko kojih će njegove posljedice biti nepredvidive i nepovratne [7], [8]. Uslijed porasta temperature dolazi do neželjenih i opasnih klimatskih promjena na Zemlji. Predviđa se da će porast srednje temperature površine Zemlje za više od $1,5$ do $2,5^{\circ}\text{C}$ dovesti do nepovratnih posljedica u prirodnom okolišu, klimi, opskrbi ljudi hranom i vodom.

Da bi se ublažile posljedice globalnog klimatskog zagrijavanja morati će se drastično smanjiti uporaba fosilnih goriva i prije njihove potpune potrošnje. Temeljni dokument koji je međunarodna zajednica donijela pod okriljem UN-a s ciljem smanjenja emisije CO_2 poznat je pod nazivom „Kyoto protokol“. Njime su se razvijene države obvezale da će smanjiti za 5 % (EU za 8 %) emisiju stakleničkih plinova u odnosu na emisiju iz 1990. godine. Na Konferenciji COP21 (konferencija o klimatskim promjenama) održanoj u Parizu 2015. godine, predstavnici 195 država usvojili su novi obavezujući Sporazum o klimi, koji donosi novi ambiciozniji cilj ograničenja prosječnog globalnog zagrijavanja ispod 2°C u odnosu na predindustrijsko razdoblje.

Povišenju prosječne temperature Zemlje doprinosi i toplinsko onečišćavanje tj. „otpadna toplota“ postrojenja za izgaranje fosilnih goriva te nuklearnih fisijskih postrojenja. Prema zakonima termodinamike, sva energija koju čovjek iskorištava doprije u konačnici u okoliš kao toplota.

Pri izgaranju fosilnih goriva dolazi i do značajnog kemijskog onečišćavanja oslobađanjem agresivnih oksida sumpora i dušika od kojih se u atmosferi stvaraju molekule sumporne i dušične kiseline, koje padaju na Zemlju u obliku tzv. „kisele kiše“, s vrlo štetnim posljedicama za floru i faunu te povijesne građevine - spomenike kulture.

Neki plinovi koji se koriste u rashladnoj tehnici i klimatizaciji prostora (CFC, HCFC,...) oštećuju ozonski sloj (nastaju „ozonske rupe“) koji tada propušta UV-B zračenje. To zračenje štetno djeluje na eko-sustav Zemlje i na zdravlje ljudi (raste broj osoba s rakom kože i mrenom na oku).

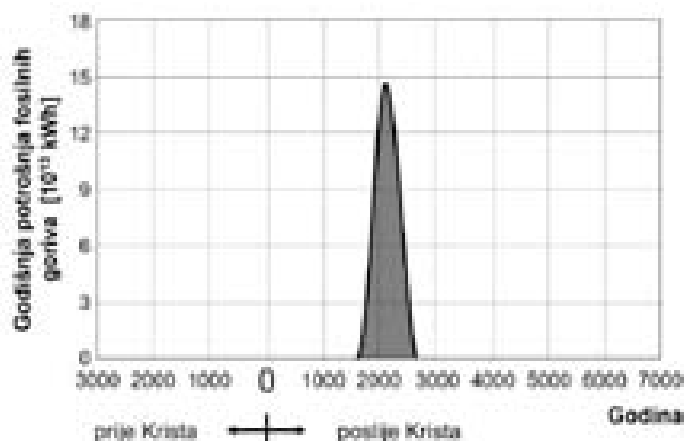
Najopasnije onečišćenje okoliša jest potencijalno onečišćavanje radioaktivnim tvarima iz nuklearnih elektrana. U procesu nuklearne fisije stvara se čitav niz radioaktivnih tvari od kojih su neke aktivne i više tisuća godina. Zato se posebna pažnja posvećuje odgovarajućem zbrinjavanju nuklearnog otpada. Nažalost, još uvijek nije pronađeno zadovoljavajuće trajno rješenje ovog problema, tako da će taj otpad predstavljati određeni financijski teret budućim generacijama (kontrolni pregledi i održavanje odlagališta). Dok su u normalnom pogonu nuklearne elektrane su vrlo „čist“ izvor energije koji ne ispušta štetne tvari u okoliš. Veliki problemi nastaju tek u slučaju većih havarija na nuklearnoj elektrani, a potencijalna opasnost od njih je uvijek prisutna.

Ugljikov dioksid, kemijsko onečišćavanje, otpadna toplina i radioaktivni otpad su veliki poremećaji koje čovjek svojim aktivnostima unosi u okoliš i time remeti prirodnu ekološku ravnotežu na Zemlji. Teško je točno procijeniti gornju granicu Zemljine sposobnosti da apsorbira sva navedena onečišćenja, prije nego to onečišćenje ne prouzrokuje nepovratne promjene u klimi i teške poremećaje u životnim procesima na Zemlji. Sigurno je, međutim, da ta gornja granica postoji i potrebno je poduzeti odlučne mjere da se ona ne dosegne.

1.6 Energetski problem

Uz svaki raspoloživi izvor energije vezani su i određeni problemi [9].

Fosilna goriva na kojima se temelji današnja energetska tehnologija iscrpiva su tj. njihove rezerve su ograničene. Doba fosilnih goriva, promatrano u širem povijesnom kontekstu, je izuzetno kratko razdoblje u povijesti čovječanstva (samo „trenutak“ ili „bljesak“), ali i razdoblje velikog napretka čovječanstva (slika 1.4).



Slika 1.4 Grafički prikaz vremenskog korištenja fosilnih goriva od početka industrijske revolucije do predviđene konačne potrošnje

S druge strane izgaranjem fosilnog goriva značajno se onečišćuje okoliš i uzrokuju neželjene klimatske promjene.

Nuklearna energija ima problem društvenog prihvaćanja zbog stalnog rizika nekontroliranog radioaktivnog zračenja kojeg se čovječanstvo najviše boji. Neki uranovi spojevi mogu biti smrtonosni i kroz nekoliko tisuća godina. Rezerve nuklearnog fisijskog goriva također su ograničene.

Većina obnovljivih izvora energije ima nedostatak da se ne može transportirati u izvornom obliku, a nije ih moguće niti pohraniti ili „usklađiti“ u izvornom obliku. Za većinu njih je karakteristična velika oscilacija prirodnog dotoka. Zato se većina obnovljivih izvora može koristiti samo na mjestu nastanka i u ritmu njihova dobivanja. Kad bi se primjerice na jednostavan i jeftin način mogla pohraniti unutarnja toplinska energija, tada bi toplina koju neka kuća primi od Sunca tijekom ljeta bila sasvim dovoljna za njeno grijanje tijekom zime.

Nemogućnost da se energija može uvijek i prikladno pohraniti znatno smanjuje ukupnu efikasnost energetike koja koristi obnovljive izvore energije.

Svijest o značaju i ulozi energije u razvoju čovječanstva te o posljedicama iscrpivosti fosilnih goriva, konačno je sazrela početkom sedamdesetih godina 20. stoljeća. 1973. godina predstavlja prekretnicu u pristupu korištenja energije. Sve do te godine cijena sirove nafte, a time i naftnih derivata, bila je vrlo niska u odnosu na druge energente. Zbog toga je postojala potpuna nezainteresiranost za štednju energije i razvoj novih tehnologija racionalnijeg korištenja pojedinih energenata. Ekonomski teoretičari vjerovali su i ovdje u zakonitosti tržišta: ako se neki prirodni izvor energije sve više smanjuje, doći će do porasta njegove cijene što će pak dovesti do njegove zamjene nekim drugim jeftinijim izvorom. Pri tome je potpuno bila zanemarena činjenica iscrpivosti prirodnih resursa, ali i prava budućih naraštaja.

1973. godine, zbog političke situacije na Srednjem istoku (arapsko-izraelski rat), koji je bio glavni izvoznik sirove nafte za razvijene zemlje Zapada, dolazi do poremećaja u isporuci nafte te do znatnog porasta njene cijene. Nakon 1973. godine cijena sirove nafte nastavila je rasti i već za sedam godina porasla je preko 18 puta u odnosu na cijenu prije 1973., s trendom i daljnjeg rasta sve do naših dana.

Energetski sustavi su vrlo tromi. Promijene su polagane, zahtijevaju dosta vremena i dosta novčanih ulaganja. Stoga je korištenje fosilnih goriva nastavljeno i nakon 1973. godine. Ublažavanje problema većina pogođenih zemalja je pokušala postići mjerama štednje i racionalnim korištenjem svih oblika energije.

U pogledu opskrbe energijom čovječanstvo se nalazi, dakle, u teškom razdoblju, koje će potrajati najmanje još pedesetak godina. Problem energije je svjetski problem i mora se riješiti na svjetskoj razini. Na energetski problem u prvom redu treba gledati kao na znanstveni problem. Trajno rješenje energetskog problema biti će moguće tek znatnim unapređenjem znanosti i tehnologije. Konačno rješenje energetskog problema dati će sasvim sigurno osnovne i primijenjene znanstvene discipline. No, do tog konačnog rješenja energetski se problem treba stalno ublažavati. U tom smislu nužna je štednja energije fosilnih goriva, njeno efikasno korištenje te što veća zamjena uporabe fosilnih energenata s obnovljivim izvorima energije.

1.7 Osnovne karakteristike neobnovljivih izvora energije

1.7.1 Općenito

Prirodni neobnovljivi izvori energije su: ugljen i treset, nafta, prirodni plin, naftonosni škriljevci, nuklearno gorivo i geotermalna energija (unutarnja toplina Zemlje). Nastali su prije više stotina milijuna godina. Svi navedeni izvori su konačni, a njihovo trajanje tj. vrijeme kroz koje će biti potpuno iscrpljeni ovisi o razini njihove potrošnje.

Većina se navedenih prirodnih izvora energije može uskladištiti u obliku u kojem se pojavljuju u prirodi. Zbog mogućnosti uskladištenja neobnovljivi prirodni izvori energije mogu se iskorištavati prema potrebama te se mogu transportirati u svojem prirodnom obliku.

Najveći dio rezervi neobnovljivih izvora energije nalazi se ispod površine Zemlje, a samo manji dio na površini.

Energija spremjena u neobnovljivim izvorima je vrlo „gusta“. To znači da je u malim količinama tih izvora pohranjena relativno velika energija. Zbog velike gustoće energije, relativno jednostavne dobave, niske cijene u prošlosti te razrađenih postupaka pretvorbe u druge oblike energije, neobnovljivi izvori energije postali su temelj današnje energetike. Nažalost, neki od njih trajno onečišćuju naš okoliš (fosilna goriva), a neki su samo potencijalni, ali vrlo opasni onečišćivači (nuklearno gorivo).

Neobnovljivi izvori energije koriste se danas najvećim dijelom tek nakon pretvorbe kemijske energije fosilnih goriva odnosno fizijske energije urana u električnu energiju. Ta pretvorba se provodi u termoelektranama i nuklearnim elektranama. Zajednička karakteristika svih

elektrana jest ograničenost njihove efikasnosti, koja u praksi iznosi obično između 30 % i 40 %. To znači da se 60 % do 70 % uložene energije gubi i toplinski onečišćuje okoliš.

1.7.2 Ugljen i treset

Ugljen je crna ili crno-smeđa sedimentna stijena koja se sastoji od različitih ugljikovih i drugih spojeva. Osim gorivih organskih spojeva, u ugljenu se nalaze mineralne primjese (ostaju kao pepeo nakon potpunog izgaranja ugljena), vlaga i hlapljivi sastojci. Količina ugljika u postotku suhe tvari glavno je obilježje kvalitete ugljena.

Ugljen je uglavnom nastao raspadanjem močvarnih biljaka pod utjecajem bioloških, fizikalno-kemijskih i geoloških djelovanja u različitim vremensko-geološkim razdobljima. Proces karbonizacije ili pougljenjivanja trajao je milijunima godina, a svodi se prvenstveno na obogaćivanje tvari ugljikom na račun drugih sastavnih elemenata.

S obzirom na stupanj karbonizacije, postoje različite vrste ugljena: treset koji se ne smatra pravim ugljenom, lignit, mrki ugljen i kameni ugljen. Najmlađi je treset, a najstariji kameni ugljen.

Osnovne karakteristike ugljena su donja i gornja ogrjevna vrijednost.

Vrste ugljena određuju se prema njihovoj gornjoj ogrjevnoj vrijednosti prema podacima u tablici 1.1.

Tablica 1.1 Vrste ugljena [6]

Vrsta ugljena	Gornja ogrjevna vrijednost, MJ/kg
Lignit	do 12,6
Mrki ugljen	12,7 – 23,9
Kamenj ugljen	24 – 37,7

Razlikujemo dva načina pridobivanja ugljena: podzemno i površinsko. Ekonomičnost vađenja ugljena ovisi o njegovoj količini, zatim dubini na kojoj se nalaze slojevi ugljena, debljini sloja ugljena i nagibu sloja, svojstvima okolnih materijala itd. Zato za svaki ugljenokop treba provesti posebnu analizu isplativosti njegova korištenja.

Od svih fosilnih goriva, ugljena ima najviše, a ima i najdužu povijest korištenja. Ugljen je vrlo „prljav“ izvor energije. Od svih fosilnih goriva on najviše onečišćuje atmosferu.

Najveća količina svih vrsta ugljena upotrebljava se za dobivanje topline procesom izgaranja (termoelektrane, termoelektrane – toplane, toplane i kotlovnice). Manji dio svih vrsta ugljena upotrebljava se za dobivanje gradskog plina i drugih različitih vrsta plinova.

Osim izravne uporabe, neke vrste ugljena se odgovarajućim pretvorbama pretvaraju u pogodnije oblike za korištenje. Kamenj ugljen se posebnim pretvorbama pretvara u koks i polukoks. Od mrkog ugljena i lignita, postupkom briketiranja (prešanjem ugljene prašine i sitnozrnog ugljena) dobivaju se briquete kao pogodniji oblik za praktičnu uporabu.

Treset je najmlađe fosilno gorivo i ne može ga se smatrati ugljenom. Obično se nalazi na malim dubinama. Sadrži veliki postotak vlage pa se ne može odmah po vađenju upotrebljavati kao gorivo već se najprije mora sušiti na zraku. Zbog svoje male ogrjevne vrijednosti transport se treseta ne isplati. Zato se on u pravilu upotrebljava u blizini svog nalazišta.

1.7.3 Nafta i prirodni plin

Sirova nafta i prirodni plin su smjese različitih spojeva, pretežito ugljikovodika, a nalaze se u unutrašnjosti Zemlje (na dubini od nekoliko desetaka metara do preko pet kilometara). Nastali su iz ostataka biljnih i životinjskih planktona i bakterija koji su živjele u vodi ili u moru i u posebnim uvjetima pretvorili su se u sirovu naftu ili u prirodni plin. Gotovo se uvijek u nalazištima zajedno pojavljuju nafta i plin. Plin se često nalazi i u područjima gdje nema nafte, vjerojatno zbog veće mogućnosti njegova premještanja tijekom geoloških promjena.

Dobivanje prirodnog plina i nafte ostvaruje se s pomoću bušotina iz dubljih slojeva Zemlje. Nafta se uglavnom pridobiva:

- prirodnom erupcijom ako je tlak dovoljno velik, kod čega nafta i plin istječu iz naftonosnog sloja u bušotinu i dalje na površinu Zemlje,
- s pomoću dubinskih crpki kod nedovoljnog prirodnog tlaka, kod čega se kroz cijev crpkama izvlači nafta,
- utiskivanjem vode ili inertnog plina u naftno ležište, čime se dobije potreban tlak za podizanje nafte kao kod eruptivnog nalazišta.

Nafta se ne upotrebljava kao gorivo neposredno u prirodnom obliku, već nakon prerade u rafinerijama. Osnovni derivati nafte su: ukapljeni plin, benzin, petrolej (gorivo za mlazne motore, rasvjetu,...), dizelsko gorivo, loživa ulja (ekstra lako, lako, srednje i teško) te tvari za neenergetsku potrošnju (maziva, motorna ulja,...).

Loživa ulja se upotrebljavaju za izgaranje u raznim ložištima: sobnih peći, centralnih grijanja, parnih kotlova,... Ogrjevna vrijednost loživih ulja, ovisno o masenom omjeru ugljika i vodika (veća je što je taj omjer manji), je u granicama od 40 do 44 MJ/kg.

Prirodni plin se dovodi do konačnog potrošača najprije prijenosnom, a zatim distribucijskom mrežom. Najveće količine prirodnog plina troše se za zagrijavanje u domaćinstvima i u industriji. Ogrjevna vrijednost plina je od 41 do 58 MJ/kg.

1.7.4 Naftonosni škriljevac i bituminozni pijesak

Naftonosni škriljevac je sedimentna stijena s većim ili manjim sadržajem organske tvari koja je raspršena u stijeni u obliku mikroskopski sitnih čestica. Postoje tehnologije kojima se mogu iz škriljevca vaditi tekući i plinoviti ugljikovodici.

Bituminozni pijesak je smjesa pijeska i bitumena. Svako zrno pijeska prekriveno je bitumenom. Bitumen se od pijeska najprije odvoji grijanjem, a zatim se prerađuje.

Kako je za preradu naftonosnog škriljevca i bituminoznog pijeska potrebna energija, to za svako njihovo nalazište treba provesti analizu energetske opravdanosti pridobivanja ugljikovodika.

1.7.5 Nuklearna goriva

Prirodna nuklearna goriva za fisiju su uran i torij. Oni se dobivaju iz ruda koje sadrže ove elemente u dovoljnom postotku da bi se njihovo izdvajanje ekonomski isplatilo.

Prirodna nuklearna goriva za fuziju su deuterij ili teški vodik i litij. Deuterij je izotop vodika. Ima ga u vodi što znači da postoji u velikim količinama. Litij se dobiva iz različitih minerala, a ima ga i u morskoj vodi. Litij se smatra osnovnim gorivom za fuzijske nuklearne reakcije.

Za upotrebu nuklearnih goriva potrebno je osigurati mogućnost kontrolirane fisijske odnosno fuzijske lančane reakcije. Danas se uspješno provodi fisijska nuklearna reakcija, a postizanje kontrolirane fuzijske nuklearne reakcije je još u fazi istraživanja.

Fisijska lančana reakcija temelji se na raspadu jezgre atoma pri čemu se dio nuklearne energije pretvara u toplinsku. Ta pretvorba se provodi u nuklearnim reaktorima u kojima se koristi nuklearno gorivo.

U nuklearnoj fuziji se, za razliku od fisije, slabo vezane lake jezgre spajaju u teže pri čemu se oslobađa energija.

1.7.6 Geotermalna energija

Geotermalna energija je toplinska energija sadržana u unutrašnjosti Zemlje. To je toplina zaostala iz razdoblja nastajanja Zemlje i prirodnog raspadanja radioaktivnih elemenata u Zemljinoj kori (debljina Zemljine kore je oko 30 km). Temperatura u unutrašnjosti Zemlje viša je od temperature na njenoj površini tako da je Zemlja spremnik velikih količina toplinske energije. Temperatura Zemlje raste s dubinom na svaki kilometar za prosječno oko 30 K. Na nekim mjestima je ovaj porast temperature i znatno veći. U pravilu, što je udaljenost od površine Zemlje veća to je prirast temperature manji. Temperatura same jezgre Zemlje procjenjuje se na oko 4 000 °C.

Geotermalna energija nije neiscrpna, ali je njena količina tolika da se, s obzirom na energetske potrebe čovječanstva, može smatrati neiscrpnom. Zato mnogi geotermalnu energiju opravdano svrstavaju u obnovljive izvore energije.

Za korištenje geotermalne energije važna je samo Zemljina kora. Kada se govori o iskorištavanju geotermalne energije ne misli se na toplinsku energiju koja dopire na površinu Zemlje provođenjem topline kroz Zemljinu koru već na energiju izvora vruće vode i vrele pare. Osnovni princip iskorištavanja geotermalne energije temelji se na prirodnom kruženju vode: voda s površine Zemlje, kroz vodopropusne slojeve, dolazi do dubljih toplijih slojeva, tu se ugrije preuzimajući toplinu nagomilanu u unutrašnjosti Zemlje i tako ugrijana ponovno izvire na površinu ili se do nje dolazi bušenjem Zemljine kore. Troškovi bušenja su relativno veliki. Što je ležište geotermalne vode dublje to su troškovi bušenja veći.

Vrlo velika toplinska energija nagomilana je u većim dubinama Zemljine kore u suhim vrućim stijinama. U te stijene voda s površine Zemlje ne može dospjeti prirodnim putem tako da one ne sudjeluju u stvaranju izvora vruće vode odnosno vrele pare. Nažalost, još uvijek nije tehnički riješeno kako iskoristiti ovu energiju nagomilanu u suhim stijinama. Istraživanja se provode u pravcu iznalaženja načina i tehnologije kako bi se razbile suhe stijene radi dobivanja dovoljno velike površine za izmjenu topline između stijena i vode koja bi se dovodila kroz odgovarajuću bušotinu, a kroz drugu se bušotinu ugrijana voda crpila na površinu Zemlje.

Ovisno o temperaturi i sastavu termalnih voda, geotermalna energija se može koristiti izravno ili posredno. Izravna primjena je najviše za grijanje prostora, grijanje ribnjaka i staklenika u poljoprivredi, za kupališta, lječilišta itd. Posredna primjena za grijanje prostora koristi se u slučaju vrlo agresivnog sastava termalne vode, a ostvaruje se preko izmjenjivača topline izrađenih od posebnih materijala.

Iz ekonomskih razloga, geotermalna voda se ne transportira na veće udaljenosti od 5 km od bušotine.

1.8 Osnovne karakteristike obnovljivih izvora energije

1.8.1 Općenito

Prirodni obnovljivi izvori energije su: vodne snage (vodotoci, morske struje i valovi, plime i oseke), biomasa i bioplin (uključivo drvo i otpaci), energija vjetra i energija Sunčeva zračenja [5]. Obnovljivi izvori energije ne mogu se s vremenom iscrpiti jer se neprestano obnavljaju tj. prosječan dotok svake godine se ponavlja bez smanjenja. Za biomasu to znači da je godišnje iskorištavanje mase jednako ili manje od godišnjeg prirasta nove mase.

Snaga dijela obnovljivih energijskih izvora nije konstantna, već je funkcija vremena (promjenjiva brzina vjetra, promjenjiv intenzitet Sunčeva zračenja tijekom dana i u ovisnosti o naoblaci,...). Zato su sustavi za korištenje obnovljivih izvora samo dio godine u punom pogonu, što znači da je iskorištenje instalirane snage kod tih sustava relativno malo. U

vremenu kad sustav ne radi, a potražnja za energijom postoji, potrebno je osigurati dodatne rezervne izvore energije, što često dovodi do potrebe udvostručenja kapaciteta instalacija ugradnjom konvencionalnih postrojenja.

Većinu prirodnih obnovljivih izvora energije nije moguće transportirati niti uskladištiti u obliku u kojem se pojavljuju u prirodi (vjetar, zračenje Sunca, plima i oseka,...) pa ih treba iskoristiti u trenutku kad se pojavljuju. Uskladištiti se može jedino biomasa i voda u vodotocima (akumulacijska jezera). Na veće udaljenosti mogu se prevesti samo biomasa uključivo drvo i otpaci.

Povoljno svojstvo obnovljivih izvora energije je da se, ako su raspoloživi na promatranoj lokaciji, mogu koristiti u vlastitoj režiji korisnika na građevinskoj čestici.

Kod većine obnovljivih izvora energije nije potrebno trošiti energiju niti kod pridobivanja izvornog oblika niti za transport izvornog oblika. Jednostavno se postrojenje za pretvorbu energije izloži djelovanju izvora obnovljive energije. Dodatni utrošci energije javljaju se samo kod biomase, ogrjevnog drva i otpadaka (sječa drvne mase, transport do mjesta uporabe,...). Međutim, energija utrošena za proizvodnju opreme i materijala potrebnih za izgradnju postrojenja koja koriste obnovljive izvore energije najčešće je veća od energije utrošene za izradu instalacija i opreme za korištenje neobnovljivih izvora (zato je duže vrijeme energetske amortizacije, o čemu treba voditi računa). Potrebno je ovdje naglasiti da se izrazito mnogo energije potroši za proizvodnju fotonaponskih ćelija.

Koriste se slijedeći obnovljivi izvori energije:

- *biomasa i otpaci*: sve biološke tvari prirodnog porijekla, koje nisu fosilne, koje se mogu koristiti za dobivanje topline ili električne energije (drvo i otpaci drva, bioplin, gorivi otpaci kućanstava i industrije),
- *vodne snage*: električna energija proizvedena u hidroelektranama koristeći potencijalnu i kinetičku energiju vode,
- *geotermalna energija*: toplota oslobođena Zemljinom korom, općenito u obliku vruće vode ili pare,
- *energija vjetra*: kinetička energija vjetra pretvorena u vjetroelektranama u električnu energiju,
- *energija Sunca*: Sunčevo zračenje korišteno za dobivanje topline (proizvodnja tople vode) ili za proizvodnju električne energije (fotonaponski sustavi).

Postrojenja koja koriste obnovljive izvore energije za proizvodnju električne energije su: sunčane elektrane, hidroelektrane, vjetroelektrane, elektrane na krutu biomasu, geotermalne elektrane, elektrane na bioplin, elektrane na tekuća biogoriva, elektrane na deponijski plin.

Individualna postrojenja koja za proizvodnju toplinske energije za grijanje i/ili pripremu sanitarne tople vode koriste obnovljive izvore energije su:

- solarni (sunčani) kolektori,
- sustavi koji koriste energiju okoliša (toplinske pumpe),
- sustavi koji koriste biomasu.

1.8.2 Vodne snage (energija položaja vode)

Energija položaja vode obnovljiva je zahvaljujući Sunčevoj energiji koja neprestano održava hidrološki ciklus: isparavanje vode, stvaranje oblaka od vodene pare, kondenzacija vodene pare i padanje oborina.

Kod proizvodnje električne energije u hidroelektrani, gravitacijska potencijalna energija vode u akumulacijskom jezeru pretvara se u kinetičku energiju koja pokreće lopatice vodne turbine. Turbinom se kinetička energija vode pretvara u mehaničku energiju vrtnje. Rotirajuća osovina turbine pogoni generator koji proizvodi električnu struju.

1.8.3 Biomasa, bioplin, biodizel

Biomasa se može općenito definirati kao biljne i životinjske tvari (drvni, nedrvni i životinjski otpad) koje se mogu pretvoriti u energiju. To uključuje drveće, grmlje, trave, alge, ostatke poljoprivrednih i šumskih kultura te životinjski otpad i ostatke. U biomasi je ustvari pohranjena energija Sunčevog zračenja u obliku energije kemijske veze. Biomasi ljudi koriste još od vremena kad je otkrivena vatra. Od svih vrsta biomasa najznačajnije je ogrjevno drvo. Kod zemalja u razvoju biomasa je obično najznačajniji izvor energije. U razvijenom svijetu ogrjevno drvo je gotovo sasvim istisnuto iz uporabe. Različitim tehnološkim postupcima biomasa se može pretvoriti u pogodnije oblike energije za upotrebu (bioplin, biodizel,...).

Biomasa se može pretvoriti u energiju procesom njenog izgaranja pri čemu se dobiva toplinska energija za potrebe grijanja prostora ili za dobivanje električne energije u termoelektranama.

U odnosu na fosilna goriva, izgaranjem biomase dolazi do neusporedivo manje emisije štetnih plinova i otpadnih tvari. Smatra se da je opterećenje atmosfere s emisijom CO₂ kod izgaranja biomase posve zanemarivo, jer je količina emitiranog CO₂ prilikom izgaranja jednaka količini apsorbiranog CO₂ iz atmosfere tijekom rasta biljke.

Bioplin je goriva mješavina plinova koje proizvode određeni mikroorganizmi kada organske tvari anaerobno (bez prisustva kisika) fermentiraju unutar određenog pojasa temperature (25 °C do 35 °C), sadržaja vlage i kiselosti (pH između 6 i 7). Postrojenje za proizvodnju bioplina naziva se digester. Bioplin se najčešće koristi za dobivanje toplinske i / ili električne energije.

Biodizel je komercijalni naziv za tekuće gorivo proizvedeno od biljnih ulja (uljane repice, suncokreta, soje,...) ili životinjske masti procesom esterifikacije. Po svojim energetskim svojstvima jednak je običnom dizelu, ali znatno manje onečišćuje okoliš.

1.8.4 Energija vjetra

Vjetar je posljedica različitih temperatura na koje se zagrijavaju pojedina područja atmosfere i površine Zemlje djelovanjem Sunčeva zračenja. U područjima gdje je viša temperatura viši je i tlak zraka. Vjetar je zapravo mehanizam kojim se izjednačava tlak zraka u atmosferi.

Kinetička energija vjetra može se pretvoriti u mehaničku energiju i zatim u električnu energiju. Korištenje vjetroelektrana za proizvodnju električne energije započelo je početkom 20. stoljeća, ali je do njihove veće primjene došlo tek 80-tih godina 20. stoljeća, primjenom novih tehnoloških dostignuća.

Vjetroelektrana se sastoji od vjetroagregata i stupa ili tornja. U sastav vjetroagregata ulazi turbina koja pretvara kinetičku energiju vjetra u mehaničku energiju i generator koji pretvara mehaničku energiju u električnu energiju. Vjetroagregati se postavljaju na stupove (visine do 30 m ili više). Za svaku konkretnu lokaciju može se odrediti optimalna visina stupa jer s visinom rastu i troškovi za njegovu gradnju.

Vjetroelektrane se prema instaliranoj snazi dijele na male vjetroelektrane (snage od 1 do 30 kW), srednje vjetroelektrane i velike vjetroelektrane (snaga do 1500 kW). Male vjetroelektrane su pogodne kao autonomni izvor energije na građevinskoj parceli ili kao dodatni izvor energije u kombinaciji s napajanjem iz električne mreže.

1.8.5 Energija Sunčeva zračenja

Glavni energetski proces koji se odvija na Suncu je nuklearna fuzija uz oslobađanje ogromnih količina energije. Ova se energija zračenjem širi u Svemir, pa tako jedan njezin dio dolazi i do Zemlje. Sunčevo zračenje je praktički neiscrpan izvor energije od kojeg, izravno ili neizravno, potječu gotovo svi drugi raspoloživi izvori energije na Zemlji. Količina energije koju

Sunce odašilje prema Zemlji tijekom jedne godine znatno je veća od sveukupnih energijskih potreba čovječanstva. Srednju godišnju vrijednost gustoće energetskog toka Sunčeva zračenja na vanjskom rubu Zemljine atmosfere, na površini okomitoj na smjer zračenja, nazivamo **solarna (sunčana) konstanta** i ona iznosi $(1\,353 \pm 21) \text{ W/m}^2$. Pri prolasku kroz atmosferu dio Sunčeva zračenja apsorbiraju plinovi u zraku, a dio se reflektira tako da dolazi do znatnog slabljenja intenziteta zračenja koje pada na površinu Zemlje. Sunčeva energija dolazi do površine Zemlje kao izravno zračenje iz smjera Sunca, kao raspršeno ili difuzno zračenje iz svih smjerova te kao reflektirano zračenje.

Količina dozračene Sunčeve energije na površinu Zemlje ovisi o zemljopisnoj širini promatranog mjesta i lokalnim klimatskim karakteristikama, a mijenja se tijekom dana i godine. Prosječna mjesečna energija Sunčeva zračenja dobije se kao zbroj aritmetičkih srednjih vrijednosti dnevnih energija za sve dane u promatranom mjesecu.

Sunčeva energija se može iskorištavati pasivno i aktivno. Pasivno korištenje Sunčeve energije znači izravno korištenje Sunčeve topline za grijanje prostora odgovarajućim načinom građenja zgrada (orijentacija u prostoru, ostakljene površine, ...). Aktivno korištenje Sunčeve energije znači njenu izravnu pretvorbu ili u unutarnju toplinsku energiju nekog sredstva pomoću solarnih toplinskih kolektora ili u električnu energiju pomoću solarnih fotonaponskih kolektora.

Pomoću solarnih toplinskih kolektora energija Sunčeva zračenja pretvara se u toplinu koja se koristi za grijanje prostora i pripremu potrošne tople vode. Jedan kvadratni metar kolektora može proizvesti do $1\,000 \text{ W}$ toplinske snage.

Fotonaponski kolektori izravno pretvaraju energiju Sunčeva zračenja u električnu energiju. Da bi se dobile veće snage pojedine ćelije spajaju se u veće jedinice – module, a oni u fotonaponske panele. Jedan kvadratni metar fotonaponskog panela može proizvesti do 150 W električne snage pri povoljnim uvjetima (za ozračenost $1\,000 \text{ W/m}^2$).

Solarni toplinski kolektori i fotonaponski moduli u pravilu se postavljaju na krovove kuća pod određenim kutom, orijentirani prema jugu.

1.9 Energijske rezerve i potrošnja energije

1.9.1 Svjetske rezerve i svjetska potrošnja energije

Svjetske rezerve energije mogu se smatrati neiscrpivima ako se ima u vidu:

- da je Sunčeva energija koju svaki dan prima planet Zemlja višestruko veća od ukupne godišnje potrošnje energije na Zemlji,
- da bi nuklearna energija mogla postati gotovo neiscrpna ako bi se koristila reakcija fuzije.

Nažalost:

- Sunčeva energija je male koncentracije (male površinske gustoće snage tj. snage po jedinici ploštine, W/m^2) što za njeno korištenje predstavlja prostorne probleme i ekonomske probleme rentabilnosti,
- nuklearna energija ima tehničke probleme (još uvijek neriješena kontrolirana fuzija) i probleme sigurnog zbrinjavanja nuklearnog otpada.

Za obnovljive izvore energije, umjesto pojmova energijskih rezervi, obično se koristi pojam potencijala, koji može biti teoretski, tehnički i ekonomski. Teoretski potencijal obnovljivog izvora energije označava njegovu stvarnu prisutnost, a tehnički potencijal dio koji je moguće tehnički iskoristiti. Ako pri tome uzmemo u obzir i ekonomsku isplativost tog iskorištavanja govorimo o ekonomskom potencijalu obnovljivog izvora energije.

Za poznatu dozračenu Sunčevu toplinsku snagu na površinu Zemlje, nakon prolaska kroz Zemljinu atmosferu, a koja iznosi oko 1 kW/m^2 , teoretski potencijal Sunčeve energije koju prima Zemlja u jednoj godini iznosi $1\,070\,000 \text{ PWh}$.

Od industrijske revolucije potrošnja energije u svijetu stalno raste. Od 1973. godine do 2013. godine njena potrošnja je više nego podvostručena. Države s brzo rastućim gospodarstvima posljednjih godina sudjeluju u tom globalnom porastu s oko 2/3. Udio samo Kine je iznosio ¼ povećanja svjetske potrošnje energije u 2010. godini.

U tablici 1.2 prikazane su, po izvorima energije, svjetske rezerve i godišnja proizvodnja energije krajem 2011. godine [10]. Dokazane svjetske rezerve klasičnih izvora energije (fosilna goriva i uran) iznosile su krajem 2011. godine oko $1\,015 \times 10^3$ Mtoe što bi dostajalo za oko 86 godina tadašnje proizvodnje, ali s bitno različitim trajanjima za pojedina goriva (slika 1.5). Raspoloživo vrijeme do potpunog iscrpljenja fosilnih goriva i urana je vrlo kratko u usporedbi s vremenom koje će trebati za razvoj novih energetske sustava koji bi koristili nove izvore energije.

Tablica 1.2 Svjetske rezerve i godišnja proizvodnja primarne energije za 2011. godinu po izvorima energije (izvor: BP Statistical Review of World Energy 2012 (chiffres 2011)), [10]

	Svjetske rezerve (u fizikalnoj jedinici)	Svjetske rezerve (u Gtoe)	Svjetske rezerve (% ukupnih rezervi)	Godišnja proizvodnja (u Gtoe)	Broj godina proizvodnje tih količina (godina)
Nafta ¹⁾	1 653 GBl	234	23 %	4,0	59
Prirodni plin ²⁾	208 Tm ³	187	18 %	3,3	57
Ugljen ³⁾	861 Gt	564	56 %	3,95	143
Uran ⁴⁾	3,3 Mt	30	3 %	0,59	51
Ukupno		1 015	100 %	11,84	86
Električna energija vodnih snaga ⁵⁾	15 PWh	2,7		0,79	
Energija vjetra ⁵⁾	39 PWh	8,8		0,104	
Sunčeva energija ⁵⁾	1 070 000 PWh	92 000		0,016	
Biomasa ⁵⁾	3×10^{21} J	70		0,074	

Napomene:

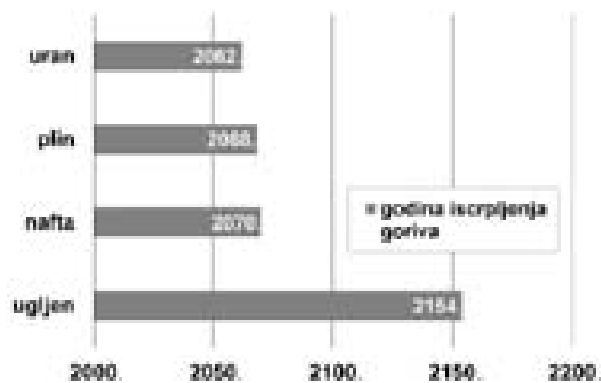
¹⁾Barel (eng.: barrel što znači bure, oznaka Bl) je mjerna jedinica za obujam, koja se najviše koristi kao mjerna jedinica za količinu nafte. Jedna tona sirove nafte odgovara približno 7,3 barela; 1 barel = 158,97 l (zaokruženo 159 litara)

²⁾ Vrijedi odnos: 1 Gm³ prirodnog plina = 0,9 Mtoe

³⁾ Vrijedi odnos: 1,5 Mt ugljena = 1 Mtoe

⁴⁾ Dokazane rezerve urana u rudnicima; bez zaliha za vojne potrebe

⁵⁾ Za obnovljive izvore energije rezerve znače odgovarajući raspoloživi godišnji potencijal na čitavoj površini Zemlje.



Slika 1.5 Očekivane kalendarske godine potpunog iscrpljenja fosilnog i nuklearnog goriva, proračunate na bazi rezervi i proizvodnje primarne energije u 2011. godini.

U tablici 1.3 prikazana je svjetska proizvodnja primarne energije po izvorima energije [10].

Tablica 1.3 Svjetska proizvodnja primarne energije po izvorima energije (izvor: BP Statistical Review of World Energy 2012 (chiffres 2011)), [10]

	Proizvodnja u 1998. god.	Proizvodnja u 2008. god.	Proizvodnja u 2008. god. (u Mtoe)	Povećanje 2008/1998	Udio u proizvodnji u 2008. god.
Nafta	73,538×10 ⁶ Bl/a	81,820×10 ⁶ Bl/a	3 928	11 %	34,5 %
Prirodni plin	2 273 Gm ³	2 945 Gm ³	2 768	35 %	24,2 %
Ugljen	2 227 Mtoe	3 325 Mtoe	3 325	49 %	29,2 %
Nuklearno gorivo	550 Mtoe	620 Mtoe	620	13 %	5,5 %
Energija voda	2 593 TW×h	3 075 TW×h	696	19 %	6,0 %
Energija vjetra	22 TW×h	260 TW×h	59	1 200 %	0,52 %
Fotonaponska Sunčeva energija	0,4 TW×h	35 TW×h	8	8 750 %	0,08 %
Ukupno			11 404	27,1 %	100 %

Napomene:

1 - Fotonaponska Sunčeva energija i energija vjetra računati su polazeći od instalirane snage.

2 – Podaci o fotonaponskoj Sunčevoj energiji su nepotpuni. Oni se ne odnose na čitav svijet već samo na zemlje članice Međunarodne agencije za energiju. Godišnja svjetska fotonaponska proizvodnja procjenjuje se na oko 35 TWh.

3 – Podacima o Sunčevoj energiji trebalo bi još dodati proizvodnju topline solarnih centrala. Krajem 2010. god. instalirana snaga tih centrala bila je oko 1 300 MW, a u izgradnji je bilo još oko 2 200 MW.

O potrošnji energije se govori kada se energija upotrijebi na nepovratan način. U energijskoj bilanci na razini države koriste se dva pojma potrošnje: potrošnja konačne energije (neposredna potrošnja energije) i potrošnja primarne energije.

Potrošnja konačne energije odnosi se na potrošnju krajnjih korisnika: industrije izvan sektora energije, prometa i opće potrošnje (potrošnja energije u kućanstvima, uslužnom sektoru, poljoprivredi i građevinarstvu). Potrošnja energije u sektoru energije ne ulazi u potrošnju konačne energije.

Potrošnja primarne energije obuhvaća ukupnu potrošnju energije svih gospodarskih subjekata. Ukupnom potrošnjom primarne energije zadovoljavaju se sve potrebe za energijom: ukupna neposredna potrošnja energije (potrošnja konačne energije), neenergetska potrošnja energije, potrošnja energije za pogon energetskih postrojenja, gubici energije u energetskim pretvorbama te gubici u transportu i distribuciji energije.

O energetskoj potrošnji energije govori se onda kada, najčešće gorenjem, energent „oslobodi“ svoju energiju. Postoji, međutim, i neenergetsko korištenje energenata. Tako se primjerice bitumen koristi u izgradnji cesta, prirodni plin za proizvodnju umjetnih gnojiva, a nafta za proizvodnju plastičnih materijala, pri čemu ne dolazi do gorenja energenta tj. „oslobađanja“ energije. U tim se slučajevima govori o neenergetskoj potrošnji.

Kod proračuna potrošnje primarne energije u energetskom sektoru u obzir se uzima samo neto potrošnja energije. Neto potrošnja energije energetskog sektora je jednaka gubitcima kod pretvorbe energije te gubitcima kod njenog transporta i distribucije. Time se izbjegava dvostruko uračunavanje energije, npr. jednom potrošnje ugljena neke termoelektrane na ugljen i drugi put potrošnje električne energije koju proizvede ta termoelektrana.

U tablici 1.4 prikazana je svjetska potrošnja konačne energije prema vrsti energenta, a u tablici 1.5 prema sektoru potrošnje.

Tablica 1.4 Svjetska potrošnja konačne energije prema vrsti energenta (izvor: AIE Energy Balance for World) [10]

	Potrošnja 2006. god. (u Mtoe)	Udio u ukupnoj potrošnji
Nafta (derivati)	3 470	43 %
Prirodni plin	1 233	15 %
Ugljen	698	9 %
Nuklearna energija	-	
Električna hidroenergija	-	
Električna energija	1 350	17 %
Izgaranje biomase i otpada	1 040	13 %
Toplina	293	3 %
Ukupno	8 084	100 %

Tablica 1.5 Svjetska potrošnja konačne energije prema sektoru korištenja (izvor: AIE Energy Balance for World) [10].

	Potrošnja 2006. god. (u Mtoe)	Udio u ukupnoj potrošnji
Promet	2 180	27 %
Industrija	2 226	28 %
Kućanstva	1 958	24 %
Uslužni sektor	643	8 %
Poljoprivreda	181	2 %
Ostali	156	2 %
Neenergetska potrošnja	740	9 %
Ukupno	8 084	100 %

1.9.2 Potrošnja energije u Europskoj Uniji

Sektor energije u EU ima prioritetni politički značaj. Cilj energetske politike EU je prilagoditi postojeći energetski sustav na način da postane konkurentniji, sigurniji i održiviji, s prihvatljivom cijenom energije i garantiranom opskrbom, kao osnovnim pretpostavkama za daljnji gospodarski rast i kvalitetu življenja. S tom namjerom donesen je čitav niz dokumenata koji bi trebali osigurati zajedničku energetska politiku država članica i pomoći ostvarivanju navedenih ciljeva [11], [12].

Dvama osnovnim stupovima energetske politike EU smatraju se korištenje obnovljivih izvora energije i povećanje energetske učinkovitosti energetskog sektora uključivo i na razini krajnjeg korisnika (neposredna potrošnja). Korištenje obnovljivih izvora energije trebalo bi smanjiti energetska ovisnost o uvozu goriva (EU uvozi više od 60 % svoje potrošnje prirodnog plina i 80 % svoje potrošnje nafte), smanjiti štetne emisije uslijed izgaranja fosilnih goriva i razdvojiti troškove energije od cijena sirove nafte. Povećanje energetske učinkovitosti trebalo bi smanjiti potrošnju energije i pokrenuti proces u pravcu razvoja novog gospodarstva s malom potrošnjom energije. Povećanje energetske učinkovitosti se smatra najrentabilnijim načinom za povećanje sigurnosti opskrbe energijom i smanjenja emisije stakleničkih plinova i drugih onečišćivača. Energetska učinkovitost se može smatrati najvažnijim „izvorom energije“ u EU. Ona se uklapa u okvire šireg cilja EU u području učinkovitosti korištenja resursa koji obuhvaća učinkovito korištenje svih prirodnih resursa i osiguranje održivog razvoja.

EU je 2007. godine postavila ciljeve, nazvane „ciljevi 20-20-20“ prema kojima se do 2020. godine trebaju ostvariti sljedeći rezultati:

- smanjiti emisija stakleničkih plinova u EU za najmanje 20 % u odnosu na njihovu razinu u 1990. godini,
- povećati udio obnovljivih izvora energije u potrošnji konačne energije najmanje na 20 % (u prometu najmanje 10 %),
- smanjiti za 20 % uporabu primarne energije u odnosu na razinu predviđene potrošnje u 2020. godini (predviđena potrošnja iznosi 1 842 Mtoe, a smanjenje od 20 % iznosi 368 Mtoe).

U tablici 1.6 prikazana je godišnja potrošnja primarne energije, u Mtoe, u zemljama EU-27 u razdoblju od 2000. do 2010. godine [13].

Tablica 1.6 Godišnja potrošnja primarne energije, u Mtoe, u zemljama EU-27 u razdoblju od 2000. do 2010. godine (izvor: Eurostat (ten00086)), [13]

	2000.	2001.	2002.	2003.	2004.	2005.	2006.	2007.	2008.	2009.	2010.
EU-27	1 725	1 763	1 758	1 799	1 820	1 824	1 826	1 809	1 800	1 703	1 759

Potrošnja primarne energije u EU-27 u razdoblju od 2000. do 2006. godine bila je u porastu u prosjeku 0,8 % godišnje. Potrošnja primarne energije od 2006. godine se smanjuje. Najveće smanjenje zabilježeno je 2009. godine i to u iznosu od 5,4 % u odnosu na potrošnju iz prethodne godine, da bi potrošnja u 2010. godini opet porasla za 3,3 % u odnosu na 2009. godinu. Ovaj veći pad potrošnje u 2009. godini više je posljedica smanjenja gospodarskih aktivnosti zbog ekonomske i financijske krize, nego razvoja područja energetike. Prema podacima Eurostat-a, u 2011. i 2012. godini zabilježen je daljnji pad u potrošnji primarne energije tako da za EU-28 ukupni pad potrošnje primarne energije u razdoblju između 2006. i 2012. godine iznosi 8 % [14].

U tablici 1.7 prikazana je proizvodnja primarne energije u EU-28 po tipu energije u 2012. godini [14].

Tablica 1.7 Proizvodnja primarne energije po tipu energije u milijunima tona ekvivalentne nafte, u zemljama EU-28 u 2012. godini (izvor: Eurostat, communiqué de presse 25/2014 od 17. veljače 2014), [14]

	Proizvodnja primarne energije (Mtoe)	Od toga:					
		Čvrsta goriva	Sirova nafta	Prirodni plin	Nuklearna energija	Obnovljivi izvori ^{*)}	Otpaci (neobnovljivi)
EU-28	794,3	166,1	76,6	133,1	227,7	177,3	13,6
	100 %	21 %	10 %	17 %	29 %	22 %	≈2 %

Napomena:)* Proizvodnja obnovljive energije podrazumijeva biomasu, energiju voda, geotermalnu energiju, energiju vjetra i energiju Sunca.

Ovisnost o uvozu za EU-28 u 2012. godini iznosila je 53 %. Ona je dobivena dijeljenjem neto uvezene energije s potrošenom primarnom energijom, izraženo u postocima.

Potrošnja primarne energije svake države članice EU ovisi o strukturi njenog energetskog sustava, raspoloživim prirodnim resursima za proizvodnju primarne energije te strukturi i razini razvoja njenog gospodarstva.

Prema podacima Eurostat-a u razdoblju od 2000. do 2010. godine u potrošnji primarne energije u EU-27 skupni udio nafte i naftnih derivata te čvrstih goriva od 56,9 % u 2000. godini pao je na 51,0 % u 2010. godini, što svjedoči o trendu postepene zamjene uporabe fosilnih goriva koja najviše onečišćuju okoliš (nafta, ugljen). Udio nuklearne energije u ukupnoj potrošnji pokazuje također lagano smanjenje od 0,7 %. U istom razdoblju porasla je potrošnja prirodnog plina za 2,3 % i u 2010. godini je predstavljala 25,1 % potrošnje primarne energije.

Najveći porast u potrošnji energije zabilježen je u korištenju obnovljivih izvora energije, što znači postepeni prijelaz s fosilnih goriva prema obnovljivim izvorima energije. Njihov udio u potrošnji primarne energije je porastao s 5,6 % u 2000. godini na 9,8 % u 2010. godini što je porast od 75 %.

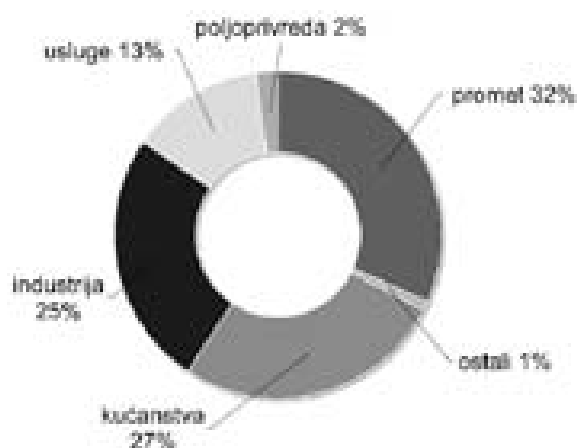
U tablici 1.8 dani su podaci koji se odnosu na potrošnju konačne energije u EU-27 u razdoblju od 2000. do 2010. godine [13].

Tablica 1.8 Godišnja potrošnja konačne energije, u Mtoe, u zemljama EU-27 u razdoblju od 2000. do 2010. godine (izvor: Eurostat (ten00095)), [13]

	2000.	2001.	2002.	2003.	2004.	2005.	2006.	2007.	2008.	2009.	2010.
EU-27	1 121	1 145	1 132	1 171	1 186	1 191	1 192	1 165	1 174	1 112	1 153

Potrošnja konačne energije u EU-27 iznosi oko 65 % ili oko 2/3 potrošnje primarne energije (u 2010. godini 65,5 %). Oko 30 % potrošnje primarne energije u EU događa se u sektoru energije, uglavnom na pretvorbu energije goriva u električnu energiju ili u toplinu te za njihov transport i distribuciju.

Grafikon na slici 1.6 prikazuje potrošnju konačne energije u EU-27 u 2010. godini po pojedinim sektorima potrošnje, izraženu u % ukupne potrošnje na bazi podataka u tonama ekvivalentne nafte [13].



Slika 1.6 Potrošnja konačne energije u EU-27 u 2010. godini, u postocima ukupne potrošnje, po sektorima potrošnje (izvor: Eurostat (tsdpc320)), [13]

Udio potrošnje konačne energije u području zgradarstva (zbroj potrošnje u kućanstvima i za usluge) u ukupnoj potrošnji energije u 2010. godini u EU iznosio je 39,9 %.

1.9.3 Potrošnja energije u Republici Hrvatskoj

U tablici 1.9 prikazana je godišnja potrošnja primarne energije, u Mtoe, u RH za razdoblje od 2000. do 2010. godine [13].

Tablica 1.9 Godišnja potrošnja primarne energije, u Mtoe, u RH za razdoblje od 2000. do 2010. godine (izvor: Eurostat (ten00086)), [13]

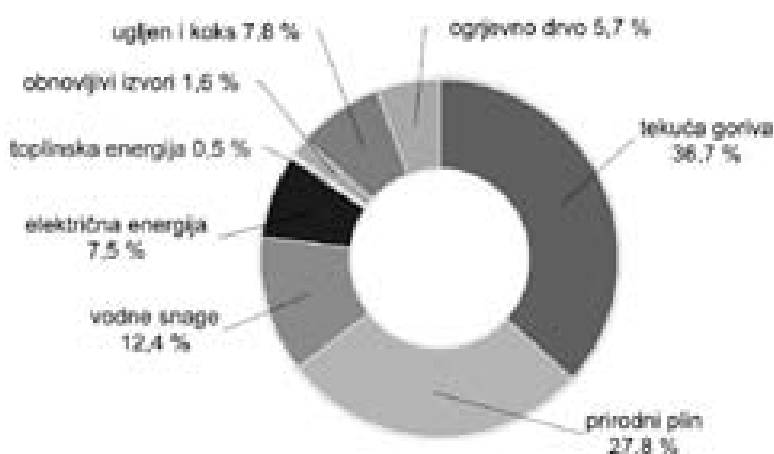
	2000.	2001.	2002.	2003.	2004.	2005.	2006.	2007.	2008.	2009.	2010.
RH	7,8	8,0	8,3	8,9	8,89	9,0	8,9	9,3	9,1	8,7	8,6

U razdoblju od 2007. do 2010. primjetan je trend smanjenja ukupne potrošnje primarne energije s prosječnom godišnjom stopom 1,9 %. Prema podacima Ministarstva gospodarstva RH (Energija u Hrvatskoj 2012. [15]), u 2011. i 2012. godini ovaj trend je nastavljen. Ovo smanjenje je u prvom redu posljedica smanjenja gospodarskih aktivnosti. U razdoblju od

2007. do 2012. godine bruto domaći proizvod (eng.: GrossDomesticProduct – GDP) smanjen je s prosječnom godišnjom stopom od 1,9 %.

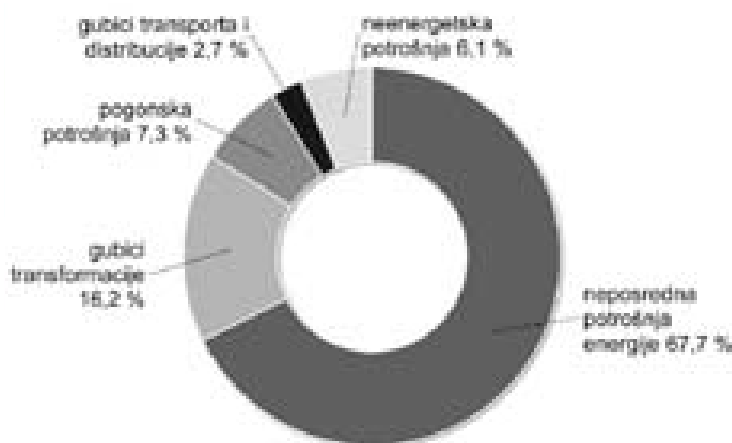
Ukupna potrošnja primarne energije u RH u 2012. godini iznosila je oko 400 PJ. Od toga je oko 200 PJ proizvedeno u RH, a ostalo pribavljeno uvozom energije.

Na slici 1.7 prikazani su ostvareni udjeli pojedinih energenata u ukupnoj potrošnji primarne energije u 2012. godini. Najveći udio u ukupnoj potrošnji energije u RH imaju tekuća goriva, a zatim prirodni plin [15].



Slika 1.7 Ostvareni udjeli pojedinih energenata u ukupnoj potrošnji primarne energije u RH u 2012. godini (izvor: Ministarstvo gospodarstva RH), [15]

Struktura ukupno utrošene primarne energije u 2012. godini prikazana je na slici 1.8.



Slika 1.8 Struktura ukupno utrošene primarne energije u RH u 2012. godini (izvor: Ministarstvo gospodarstva RH), [15]

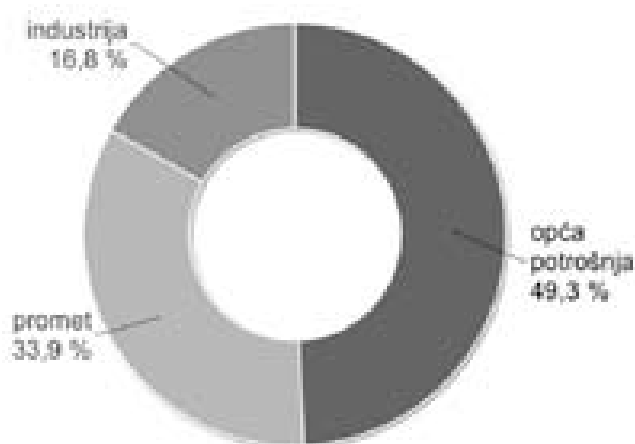
U tablici 1.10 dani su podaci koji se odnose na potrošnju konačne energije u RH za razdoblje od 2000. do 2010. godine [13].

Tablica 1.10 Godišnja potrošnja konačne energije, u Mtoe, u RH za razdoblje od 2000. do 2010. godine (izvor: Eurostat (ten00095)), [13]

	2000.	2001.	2002.	2003.	2004.	2005.	2006.	2007.	2008.	2009.	2010.
RH	5,3	5,5	5,6	6,0	6,2	6,3	6,4	6,5	6,6	6,3	6,3

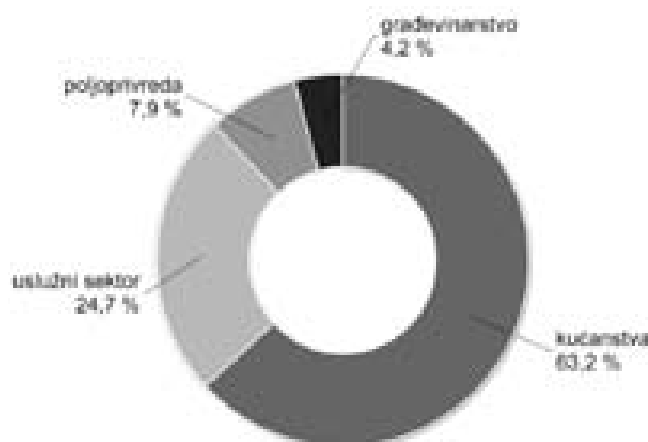
Od 2008. do 2012. ostvaren je trend smanjenja neposredne potrošnje energije.

Na slici 1.9 prikazani su udjeli pojedinih sektora u neposrednoj potrošnji energije (potrošnji konačne energije) u RH u 2012. godini [15].



Slika 1.9 Udjeli pojedinih sektora u neposrednoj potrošnji energije (potrošnji konačne energije) u RH u 2012. godini (izvor: Ministarstvo gospodarstva RH), [15]

Najveći udio u neposrednoj potrošnji energije ostvarila je opća potrošnja. Potrošnja energije u općoj potrošnji obuhvaća potrošnju energije u kućanstvima, uslužnom sektoru, poljoprivredi i građevinarstvu. Potrošnja energije u pojedinim podsektorima opće potrošnje u RH u 2012. godini prikazana je na slici 1.10 [15].



Slika 1.10 Udjeli pojedinih podsektora opće potrošnje u potrošnji konačne energije u RH u 2012. godini (izvor: Ministarstvo gospodarstva RH), [15]

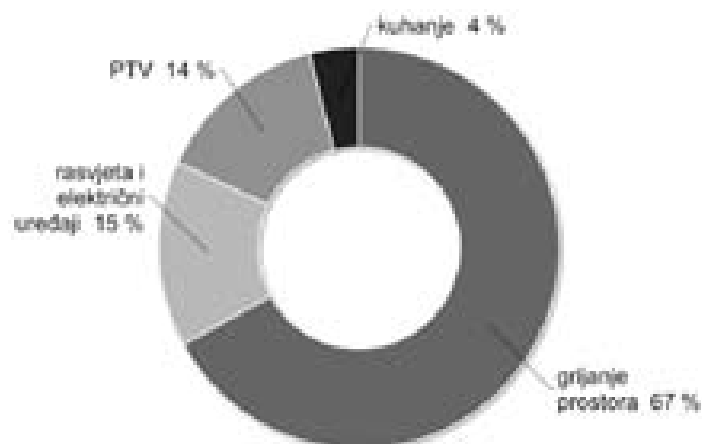
U sektoru opće potrošnje najveći potrošači su zgrade tj. kućanstva i uslužni sektor. U 2012. godini ukupna potrošnja konačne energije iznosila je 247,53 PJ, a potrošnja u sektoru opće potrošnje iznosila je 121,95 PJ. Potrošnja konačne energije u zgradama iznosila je 107,20 PJ, što predstavlja 43,3 % ukupne potrošnje konačne energije u 2012. godini.

1.10 Zgrada kao potrošač energije

Od izgradnje prvih zaklona pa sve do 19. stoljeća čovjek je gradio svoje nastambe u skladu s prirodnim uvjetima na lokaciji zgrade. Stari su graditelji, odgovarajućim načinom građenja koristili povoljne, a ublažavali negativne klimatske utjecaje. Tek otkrićem i sve većim korištenjem jeftinih fosilnih goriva u 19. stoljeću, čovjek je započeo graditi zgrade neovisno o prirodnim klimatskim uvjetima, stvarajući odgovarajuću mikroklimu u prostoru zgrade pomoću instaliranog sustava grijanja ili klimatizacije. Ovakav pristup u graditeljstvu traje sve do 1973. godine, do poznate „naftne krize“, kada problem energije izbija u prvi plan svjetskog zanimanja. Pred graditelje ponovno se postavio zadatak energetske svjesnog projektiranja, s ciljem racionalnog korištenja energije za grijanje i hlađenje.

Zgrade pripadaju najdugovječnijim gospodarskim dobrima čiji je vijek uporabe od 50 do 100 godina. Kod zgrada koje se danas projektiraju i grade potrebno je stoga voditi računa o tome kako će se te danas izgrađene zgrade grijati u narednim desetljećima imajući u vidu energetske probleme s kojim je svijet suočen.

Okolo 40 % (izvor: Eurostat; podatak za 2008. godinu) potrošnje konačne energije u EU odnosi se na stambene i javne zgrade. U RH taj je postotak u 2010. godini iznosio 43,4 %. Zgrada je, dakle, veliki potrošač energije pa zato i izvor značajnog onečišćenja okoliša. Više od petine emisije CO₂ u atmosferu posljedica je grijanja zgrada. U stambenom sektoru, koji obuhvaća veći dio postojećeg fonda zgrada, energija se rabi za grijanje prostora, pripremu potrošne tople vode, hlađenje / klimatizaciju prostora, rasvjetu prostora, kuhanje i rad kućanskih električnih uređaja. Kao što se vidi na slici 1.11, u stambenim zgradama dvije trećine te energije potroši se za grijanje prostora. Slična situacija je i kod javnih zgrada. Zato ako se želi smanjiti potrošnja energije u zgradama treba prvenstveno poduzeti odgovarajuće mjere za smanjenje potrošnje energije za grijanje prostora.



Slika 1.11 Potrošnja energije u kućanstvima u EU-27, izražena u % (izvor: indicateurs Odyssee, www.buildup.eu), [12]

Potrošnja energije za grijanje postojećih zgrada ovisi o uobičajenim standardima građenja u vrijeme izgradnje tih zgrada te tada važećim tehničkim propisima koji su uređivali područje toplinske zaštite. Prvi takav propis za područje Republike Hrvatske bio je Pravilnik o tehničkim mjerama i uvjetima za toplinsku zaštitu zgrada, donesen 1970. godine. Tim Pravilnikom samo je ozakonjena tada u graditeljskoj praksi ostvarivana minimalna toplinska zaštita zgrada. Stroži zahtjevi u pogledu toplinske zaštite zgrada doneseni su 1980. godine s

novelom 1987. godine, u normi HRN U.J5.600 Toplinska tehnika u građevinarstvu, tehnički uvjeti za projektiranje zgrada. Tom normom smanjena je potrošnja korisne energije za grijanje zgrada oko 30 %. Novim, suvremeno koncipiranim, Tehničkim propisom o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama iz 2005. i novelom iz 2008. godine postignuto je daljnje bitno smanjenje potrošnje korisne energije za grijanje kod novih zgrada. Nakon 2008. godine, u nekoliko navrata, izvršene su izmjene i dopune ovog propisa uz stalno smanjenje dopuštene potrošnje korisne energije te propisivanje dopuštene potrošnje primarne energije (zadnja verzija propisa dana je u NN br. 128/2015).

Gruba procjena potrošnje korisne energije za grijanje zgrada izgrađenih do 1980. godine je preko 200 kWh/(m²×a). Za grijanje zgrada izgrađenih između 1980. i 2005. godine procjenjuje se potrošnja korisne energije na oko 150 kWh/(m²×a). Zgrade izgrađene nakon 2005. godine potroše korisne energije za grijanje između 50 i 90 kWh/(m²×a). Potrošnja korisne energije u najnovijim zgradama još je mnogo manja.

Brojni primjeri pokazuju da veća potrošnja energije ne znači nužno i veću toplinsku ugodnost u prostoru zgrade. Upravo obrnuto, većina zgrada s velikom potrošnjom energije za grijanje su toplinski neudobne, a brojne zgrade s niskom potrošnjom energije pružaju toplinski ugodan unutarnji ambijent.

Zgrade kao najveći potrošač konačne energije (oko 40 %) predstavljaju i najveći potencijal uštede energije. Te uštede mogu se postići većom energetske učinkovitošću korištenja energije u zgradama. RH kao članica EU provodi mjere energetske učinkovitosti u okviru šireg cilja EU u području efikasnosti korištenja resursa koji obuhvaća efikasno korištenje svih prirodnih resursa i koji garantira visoke norme zaštite okoliša.

Energetska učinkovitost (efikasnost) je u srži energetske strategije EU i glavni je put prema održivom gospodarskom rastu. S tehničkog gledišta „energetska učinkovitost“ znači smanjiti potrošnju energije uz istovremeno zadržavanje jednake razine gospodarske djelatnosti (aktivnosti) ili usluga (toplinske ugodnosti u zgradama). Energetska učinkovitost je jedan od najrentabilnijih načina za povećanje sigurnosti opskrbe energijom te smanjenja emisije stakleničkih plinova i drugih onečišćivača. S punim pravom se energetska učinkovitost može smatrati najznačajnijim Europskim energetske resursom.

Da bi se ograničila potrošnja energije u zgradama tj. povećala učinkovitost korištenja energije, potrebno je znati gdje i u kojem pravcu treba djelovati. Potrebno je dakle moći predvidjeti tokove energije u zgradi kako bi se djelovalo tamo gdje će poduzete mjere biti najefikasnije, ali uz zadržavanje visoke razine toplinske ugodnosti u prostoru zgrade.

1.11 Pokazatelji energetske i ekološke kvalitete zgrade

1.11.1 Pokazatelji potrošnje energije i emisije CO₂

Za sažet i zoran opis i ocjenu energetske kvalitete zgrade koristi se pokazatelj potrošnje energije, a za ocjenu ekološke kvalitete zgrade pokazatelj emisije CO₂.

Pokazatelj potrošnje energije se definira kao utrošak energije sveden na prikladnu referentnu veličinu i referentni vremenski interval:

$$\text{Pokazatelj potrošnje energije} = \frac{\text{utrošak energije}}{\text{referentna veličina} \times \text{referentni vremenski interval}}$$

Kod stambenih zgrada, kao prikladna referentna veličina obično se uzima ploština korisne površine zgrade, a kod nestambenih zgrada, pored ploštine korisne površine, koristi se i obujam prostora zgrade. Uobičajeni referentni vremenski interval je jedna kalendarska godina. Mjerna jedinica pokazatelja potrošnje energije je, u tom slučaju, kWh/(m² × a) ili MJ/(m² × a), odnosno kWh/(m³ × a) ili MJ/(m³ × a).

S obzirom na namjenu zgrade moguć je prikaz potrošnje energije i u odnosu na druge referentne veličine, primjerice kod bolnica prema ukupnom broju bolesničkih kreveta, kod upravnih zgrada prema ukupnom broju zaposlenika itd.

Kod korištenja pokazatelja potrošnje energije potrebno je navesti i s prikladnim indeksom označiti:

- vrstu i opseg obuhvaćenih energetske usluga,
- uz koje rubne uvjete i za koju granicu sustava je određen,
- da li se radi o proračunatoj ili izmjerenoj potrošnji energije,
- da li se radi o korisnoj energiji, konačnoj energiji ili primarnoj energiji,
- da li se radi o obnovljivoj ili ukupnoj primarnoj energiji.

Pokazatelj emisije CO₂ najčešće se navodi, slično pokazatelju potrošnje energije, u slijedećem obliku:

$$\text{Pokazatelj emisije CO}_2 = \frac{\text{emisija CO}_2}{\text{referentna veličina} \times \text{referentni vremenski interval}}$$

Mjerna jedinica pokazatelja emisije CO₂ je kgCO₂/(m²×a) ili kgCO₂/(m³×a).

Pokazatelji emisije CO₂ mogu pored emisije CO₂ uključivati i emisije ostalih relevantnih stakleničkih plinova (staklenički plinovi iz Kyoto protokola su: CO₂, CH₄, N₂O, HCFC, CFC i SF₆). U tom slučaju radi se o pokazatelju CO₂ ekvivalentne emisije. Zato kod navođenja pokazatelja emisije CO₂ treba uvijek navesti da li su i koji su dodatni staklenički plinovi uključeni u proračun i s kojim se faktorima pretvorbe proveo proračun.

1.11.2 Energetski standardi zgrade

1.11.2.1 Općenito

Energetski standard zgrade određuje koliko visok smije biti pokazatelj potrošnje energije za tu zgradu s tim da se pri tome ne ugrožava optimalna toplinska ugodnost u prostoru zgrade. Općenito, određeni standard zgrade postiže se odgovarajućim arhitektonsko-građevinskim mjerama i odgovarajućim rješenjima tehničkih sustava zgrade. Ponašanje korisnika zgrade ne utječe na energetski standard zgrade, ali utječe na stvarnu potrošnju energije.

Danas u području zgradarstva postoje brojni energetski standardi različitih naziva. Oni su dijelom dani kroz nacionalne propise i norme pojedinih država, a dijelom i kao oznake energetske kvalitete zgrade.

Pokazatelj potrošnje energije ponekad se izražava u ekvivalentnoj potrošnji lož ulja ili prirodnog plina. Kod toga potrošnja energije od 1 kWh/(m²×a) odgovara približno ekvivalentnoj potrošnji loživog ulja 0,1 l/(m²×a), odnosno ekvivalentnoj potrošnji plina od 0,1 m³/(m²×a). Često spominjani standard 3-litarske kuće odgovara, dakle, potrošnji energije od oko 30 kWh/(m²×a).

Najčešća razredba energetskog standarda zgrada je slijedeća:

- niskoenergetska kuća (eng.: low energy house),
- pasivna kuća (eng.: passive house),
- kuća nulte energije (eng.: zero-energy house, net zero-energy house),
- kuća s viškom energije (eng.: energy-plus house),
- energetski samodostatna (autarkična, autonomna) kuća (eng.: autonomous building).

U pojedinim državama postoje manja odstupanja u definiciji pojedinih energetskih standarda, a također i razlike u njihovim nazivima. Tako primjerice iz Švicarske potječe naziv i različite razine Minergie – standarda.

1.11.2.2 Niskoenergetska kuća

Kao niskoenergetska kuća označava se, općenito, energetski standard zgrade koja u usporedbi sa zgradom izgrađenom prema važećem tehničkom propisu troši značajno manje energije. Kako se tehnički propisi obično mijenjaju svakih nekoliko godina i pri tome se dopuštena potrošnja energije stalno smanjuje, tako se i dopuštena potrošnja energije niskoenergetske kuće tome prilagođava. Niskoenergetska kuća je, dakle, po uporabi energije uvijek osjetno povoljnija od propisanog važećeg tehničkog standarda. Niskoenergetska kuća kao energetski standard odnosi se na nove zgrade, ali i na obnovljene postojeće „stare“ zgrade.

Tehničko rješenje niskoenergetskih kuća temelji se, općenito, na velikoj toplinskoj izolaciji ovojnice zgrade, uključivo prozore i vanjska vrata.

U SR Njemačkoj je niskoenergetska kuća definirana kao kuća kod koje potrebna toplina za grijanje, svedena na ploštinu tlocrtne korisne površine ili obujam grijanog dijela zgrade, mora biti za 25% manja od propisom zahtijevane vrijednosti. Udruženje njemačkih banaka u okviru davanja potpora za građenje energetski učinkovitih zgrada ima definirano više različitih stupnjeva niskoenergetske kuće.

U Francuskoj postoje dvije razine niskoenergetskih kuća: razina „visokog energetskog svojstva“ (HPE) koja zahtjeva smanjenje potrošnje energije za 10 % u odnosu na vrijednost iz tehničkog propisa i razina „vrlo visokog energetskog svojstva“ (THPE) koja zahtjeva smanjenje potrošnje 20 %.

Prema propozicijama za korištenje sredstava našeg Fonda za zaštitu okoliša i energetsku učinkovitost, niskoenergetska kuća je kuća s projektnom potrošnjom toplinske energije do $40 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \times \text{a})$ (dopuštena potrošnja prema tada važećem Tehničkom propisu bila je između 51 i $95 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \times \text{K})$).

1.11.2.3 Pasivna kuća

Standard pasivne kuće potječe iz SRNJ, a bazira se na načinu građenja pasivnih kuća. Pod pasivnom kućom podrazumijeva se zgrada koja zbog dobre toplinske izolacije ovojnice zgrade ($U < 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$), specijalnog ostakljenja i prozorskih okvira ($U^w < 0,80 \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$), bez toplinskih mostova te zbog pasivnog korištenja energije Sunca (velike ostakljene površine orijentirane prema jugu s napravom za zaštitu od Sunčeva zračenja u ljetnom razdoblju) i unutarnjih izvora topline (korisnici zgrade, električna rasvjeta, električni uređaji, ...), u pravilu ne treba klasični sustav grijanja. Dodatno grijanje potrebno je samo u dugotrajnijim razdobljima hladnog vremena. Ulogu sustava grijanja preuzima tada kontrolirani sustav mehaničke ventilacije (s povratom topline iz otpadnog zraka $> 75\%$) koji je kod tih kuća ionako potreban radi smanjenja toplinskih gubitaka kod nužne izmjene zraka. Proizvodnju topline za grijanje može preuzeti sustav pripreme potrošne tople vode. Potrošna topla voda zagrijava se u pravilu solarnim toplinskim sustavom. Zbog sustava mehaničke ventilacije, pasivna kuća mora biti što manje propusna za zrak (izmjena zraka $n^{50} < 0,6 \text{ h}^{-1}$, često oko 0,3 ili manja). Naziv kuće „pasivna“ potječe otuda što se pretežni dio potrebne topline pokriva iz „pasivnih“ izvora energije: Sunčeva zračenja i odavanja topline korisnika i tehničkih uređaja u zgradi. Pasivne kuće su jednostavne za uporabu, sigurne u korištenju i ugodne za korisnike. Mjerenja potrošnje energije za grijanje na prvim pasivnim kućama u Njemačkoj u Darmstadt-u (koautori prof. Bo Adamson i dr. Wolfgang Feist) pokazala su da ona doseže vrijednost do $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \times \text{a})$. Ova vrijednost potvrđena je u praksi i ona predstavlja graničnu vrijednost potrošnje koja se može zadovoljiti samo s pasivnim mjerama korištenja Sunčeve energije i energije unutarnjih izvora. Pasivnom kućom dosegnuto je krajnje pojednostavljenje sustava grijanja i daljnje uštede tu više nisu moguće. Još veće smanjenje potrošnje energije za grijanje moguće je samo dodatnim investicijama tj. primjenom relativno skupih aktivnih solarnih sustava, što predstavlja znatan porast investicijskih troškova.

Prema inozemnim iskustvima, novo izgrađena zgrada na principima gradnje pasivne kuće skuplja je za oko 5 % do 15 % od klasične zgrade građene u skladu s danas važećim propisima. Kod obnove postojećih „starih“ zgrada ti troškovi su nešto veći i kreću se između 12 % i 18 %. Ušteda na energiji za grijanje kod pasivne kuće iznosi oko 75 % u odnosu na zgradu prema današnjem propisanom energetske standardu građenja. Vrijeme amortizacije dodatnih troškova je desetak godina, a ovisi o budućem rastu cijena energije te kamatnoj stopi na uložena dodatna investicijska sredstva. S tehnološkim razvojem pojedinih komponenti pasivne kuće i njihovom većom potražnjom, cijena izgradnje pasivne kuće će se smanjivati. Stoga se već u idućim godinama očekuje sve značajniji rast udjela pasivnih kuća u fondu novih zgrada, a u bliskoj budućnosti može se očekivati uvođenje energetskog standarda pasivne kuće kao minimalnog standarda kod građenja novih zgrada (prema riječima dr. Feista, do kraja 2014. godine u svijetu je bilo više od 65 000 pasivnih kuća).

Na bazi načina građenja pasivnih kuća razvijen je energetski standard za zgrade. On predstavlja daljnji razvoj standarda za niskoenergetske kuće. Pasivna kuća je, ustvari, ekstremna niskoenergetska kuća. U smislu energetskog standarda pasivna kuća je zgrada u kojoj godišnja potrebna toplina za grijanje svedena na korisnu površinu grijanog prostora zgrade nije veća od $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \times \text{a})$. To odgovara ekvivalentnoj potrošnji lož ulja od oko 1,5 l/ $(\text{m}^2 \times \text{a})$ ili prirodnog plina od oko $1,5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \times \text{a})$. Kod pasivnih kuća, u stambenoj izgradnji, ograničena je i potrebna primarna energija za grijanje, ventilaciju, toplu sanitarnu vodu, rasvjetu i kućanske električne uređaje, na $120 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \times \text{a})$. Ovo uključivanje u proračun i drugih namjena energije osim samo za grijanje važno je zbog toga što se iz svake uporabe energije u konačnici oslobodi toplina, tako da se toplina za grijanje ne da odvojiti od drugih uporaba energije. To je posebno značajno za pasivne kuće jer kod njih potrebna toplina za grijanje nije više dominantna u potrošnji energije (ona iznosi do $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \times \text{a})$). Primjerice, prosječna godišnja potrošnja električne energije u kućanstvima iznosi i do $30 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \times \text{a})$.

Za one koji to žele, zgrada s energetskim standardom pasivne kuće može kao i klasična zgrada imati uobičajeni sustav centralnog grijanja s ogrjevnim tijelima i izvorima topline na fosilna goriva ili lokalno grijanje pojedinačnim malim pećima koje su neovisne o zraku u prostoriji. Jasno je da će kod takvih rješenja potrošnja goriva biti izuzetno niska. Za energetski standard pasivne kuće odlučujuće je da se potrebna toplina za grijanje zadrži na razini do najviše $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \times \text{a})$. Kod toga nije važno, dakle, koji se tehnički sustavi koriste niti koji se način gradnje primjenjuje kao ni korišteni građevni materijal za izvođenje zgrade. Za svaki energetski standard važno je da ga svi sudionici na tržištu mogu primijeniti sa svojim specifičnim tehničkim i tehnološkim rješenjima.

Posljednjih nekoliko godina definirane su dvije nove kategorije pasivnih kuća: „Passive House Plus“ i „Passive House Premium“. One su razvijene kako bi se vodilo računa o prijelazu izvora energije u zgradama, s izvora fosilne energije na izvore obnovljive energije. Pored zadovoljenja svih kriterija koji vrijede za ranije opisanu klasičnu pasivnu kuću („Passive House Classic“), kategorija „Passive House Plus“ mora proizvesti energije najmanje $60 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, a kategorija „Passive House Premium“ najmanje $120 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, iz obnovljivih izvora energije.

1.11.2.4 Kuća nulte energije

Logičan nastavak istraživanja niskoenergetske kuće bio je izgradnja kuće nulte energije, na čijem su se ostvarenju okušali već sedamdesetih godina dvadesetog stoljeća neki arhitekti i znanstvenici. Kuća nulte energije je energetski standard za zgrade, koji je dosegnut, kada je najveća potrebna energija u prosječnoj godini izjednačena s vlastitom proizvodnjom energije unutar građevinske čestice, koristeći obnovljive izvore energije (npr. sunčane sustave). Takva kuća potroši teoretski, dakle čisto matematički, u prosjeku samo toliko energije koliko ona sama proizvede. „Nulte energije“ znači da za tu kuću nije potrebna dodatna vanjska energija za grijanje, hlađenje, pripremu tople vode te električna energija za rasvjetu i kućanske uređaje. Kuća nulte energije nije više samo ambiciozni cilj kojem se teži, već postoje konkretna ostvarenja takvih kuća, što potvrđuje da su takve kuće realno moguće.

Kuća nulte energije promatrana u prosjeku kroz razdoblje od jedne godine je energetski neutralna, ali većinom nije energijski samodostatna (autarkična). U praksi je ona najčešće povezana na javnu energetsku mrežu iz koje u nekim razdobljima godine dobiva energiju (obično tijekom zime), a u ostalim razdobljima godine (obično tijekom ljeta) vraća u javnu energetsku mrežu energiju koju sama proizvodi, tako da je konačna bilanca energije nula. Razlog tome je sezonska raspoloživost većine obnovljivih izvora energije.

Postoji nekoliko detaljnijih definicija kuće nulte energije kojima se određuje na što se odnosi „nulta energija“. Tako, primjerice, kuća nulte energije za grijanje, jest zgrada, čija je godišnja potrebna energija za grijanje, u prosječnoj godini, prema definiciji jednaka nuli. U takvoj kući, niti u najhladnijem zimskom danu, ne smije nastati potreba za toplinom iz neobnovljivih nositelja energije.

Tehnički je kuća nulte energije često nastavak ideje pasivnog načina građenja uz određene dodatne tehničke sustave za proizvodnju energije. Oba koncepta slična su u pogledu mehaničkog sustava ventilacije i izuzetno velike toplinske izolacije ovojnice zgrade. Pored pasivnog dobivanja energije iz Sunčeva zračenja i unutarnjih izvora, kuća nulte energije mora imati dodatne uređaje za dobivanje električne energije. Zato u praksi te kuće moraju biti opremljene s fotonaponskim sustavima ili individualnom odnosno blokovskom kogeneracijom na obnovljive izvore energije. Priprema potrošne tople vode provodi se pomoću toplinskog solarnog sustava. Pored solarnih toplinskih kolektora postoje još i druge mogućnosti za dobivanje toplinske energije: toplinske pumpe i kolektori u zemlji. U klimatski prosječnoj godini, kod kuće nulte energije, izjednačena je bilanca između izvana dovedene energije i preko solarnih kolektora i fotonaponskih sustava proizvedene energije na samoj zgradi. Ako se proizvodi više energije nego što sama kuća potroši, višak se isporučuje u javnu energetsku mrežu za potrebe drugih potrošača. U tom slučaju radi se o kući s viškom energije.

Kuća nulte energije ne troši energiju fosilnih goriva tijekom korištenja zgrade, a kod pasivne kuće ta je potrošnja vrlo niska. Zato je kod energetske analize i analize zaštite okoliša, za kuće nulte energije i pasivne kuće, potrebno uzeti u obzir ukupnu upotrijebljenu energiju za građenje takve kuće, to znači i tzv. „sivu energiju“, koja obuhvaća energiju potrebnu za proizvodnju i transport građevnih proizvoda, energiju potrebnu za izgradnju zgrade i energiju potrebnu za zbrinjavanje neupotrijebljenog materijala i preostalog otpada. U tom smislu potrebno je birati građevne materijale i proizvode s manje sive energije. Eksperti procjenjuju da je za kuću nulte energije potrebno u prosjeku oko 12 godina da se siva energija uštedi kroz ovaj tehnički i energetski standard.

Kuća nulte energije je eko-kuća budućnosti. Samo „pasivna“ kuća u budućnosti neće biti dovoljna. Potrebna je solarno „aktivna“ kuća nulte energije, koja će proizvoditi „zelenu“ električnu energiju. Investicijski troškovi za izgradnju ovakve kuće još uvijek su značajno veći nego za pasivnu kuću. Fotonaponski sustavi su još uvijek relativno skupi. S povećanjem korištenja ovih sustava, očekuje se pad cijena pojedinih tehničkih komponenata i povećanje ekonomske isplativosti ovakvih tehničkih rješenja.

1.11.2.5 Kuća s viškom energije

Još ne postoji općenito prihvaćena definicija niti norma za kuću s viškom energije. Kuća s viškom energije je uobičajeni naziv za zgradu čija je godišnja energijska bilanca pozitivna: ona proizvodi više energije koristeći obnovljive izvore energije nego što potroši za vlastite potrebe. Potrebna toplina za grijanje i pripremu potrošne tople vode te potrebna električna energija za rasvjetu i kućanstvo proizvodi se u ili na samoj zgradi (solarni toplinski sustavi i fotonaponski moduli), a višak energije isporučuje se u javnu energetsku mrežu za potrebe drugih korisnika. Kuća s viškom energije predstavlja stoga najviši energetski standard, kojeg jedna zgrada može postići.

Po načinu građenja i tehničkoj opremi, kuća s viškom energije slična je kući nulte energije. Razlikuje se od nje samo po većoj proizvodnji energije nego što su njene vlastite potrebe i taj

višak isporučuje u javnu energetska mrežu. Ako se taj proizvedeni višak energije može povratno pohraniti na samoj građevinskoj čestici moguća je energijski autarkična (autonomna) kuća s viškom energije koja je neovisna o vanjskom dovođenju energije.

Budući trend izgradnje energetska učinkovitih zgrada, s obzirom na očekivani dugoročni rast troškova energije, biti će vjerojatno u pravcu kuće s viškom energije. Energetska učinkovitost zgrade postajati će sve važniji kriterij kod određivanja njene vrijednosti. Zato je preporučljivo već danas projektirati i graditi kuće što višeg energetska standarda kako bi dugoročno imali vrijedne nekretnine i svakodnevno štedjeli na troškovima energije.

1.11.2.6 Energijski samodostatna (neovisna, autarkična, autonomna) kuća

Energijski samodostatna (autarkična, autonomna) kuća ne treba nikakvu isporuku konačne energije koja bi potjecala izvan građevinske čestice. Energijska samodostatnost ne odnosi se samo na potrebnu toplinu za grijanje već i na sve druge uporabe energije u zgradi. Energijski samodostatna kuća je kuća nulte energije ili kuća s viškom energije koja nije priključena na javnu energetska mrežu niti joj se isporučuje gorivo koje potječe izvan građevinske čestice. Takva kuća normalno funkcionira čitave godine bez infrastrukturne podrške izvana. Energijski samodostatna kuća koristi samo upadne prirodne tokove energije na građevinskoj čestici (Sunčevo zračenje, vjetar, eventualno geotermalnu energiju). Ta kuća dobiva toplinu iz solarnih toplinskih kolektora, električnu struju dobiva ljeti iz fotonaponskih modula, a zimi preko gorivnih ćelija. Vodik potreban za izgaranje u gorivnim ćelijama ljeti se procesom elektrolize dobiva i pohranjuje na građevinskoj čestici. Isto tako ljeti dobivena solarna toplina mora se pohraniti u dugotrajnom (velikom i dobro izoliranom) spremniku topline kako bi bila raspoloživa za korištenje tijekom zime. Dugotrajni spremnik topline može biti ekonomičan samo ako je dovoljno velik. Što je toplinski spremnik veći to su njegovi toplinski gubici manji. Tako primjerice za obujam spremnika oko 40 000 m³, toplinski gubici iznose oko 12 %. Zato su takvi spremnici praktički prihvatljivi samo za blokove zgrada, a ne za pojedinačne kuće.

Iako je energijski samodostatna kuća danas tehnički izvediva, ipak se ne očekuje u dogledno vrijeme njena veća praktična primjena. Tehnička rješenja za pohranjivanje energije ljeti da bi se ista koristila zimi još uvijek su neekonomična. Za proizvodnju potrebnih dodatnih tehničkih sustava potrebno je utrošiti relativno dosta energije tako da su i s energetska i s ekološkog gledišta ova rješenja još dvojbeni. Zato je i energetska, i ekološka i ekonomski prihvatljivije priključiti zgradu na javnu energetska mrežu, ako ona postoji. Mreža izjednačava oscilacije u potrošnji energije i može preuzeti veću ponudu energije proizvedene na građevinskoj čestici. Izgradnja energijski samodostatne kuće ima opravdanja samo ako u blizini nema javne energetske mreže.

1.11.2.7 Zgrada s gotovo (skoro) nultom potrošnjom energije

Graditeljstvo je strateški sektor za europsko gospodarstvo. Ono stvara blizu 10 % bruto domaćeg proizvoda i osigurava više od 10 % od ukupnog broja radnih mjesta u EU (oko 20 milijuna radnih mjesta, uglavnom u manjim tvrtkama). Razvoj sektora graditeljstva bitno utječe na razvoj cjelokupnog gospodarstva. Zato je jedan od ciljeva strategije razvoja EU intenzivirati sektor graditeljstva kao pokretačke snage održivog razvoja cijelog gospodarstva. To se, među ostalim, želi postići i poboljšanjem energetska učinkovitosti zgrada. U ovom razdoblju energetska krize, investiranje u zgrade s niskom potrošnjom energije predstavlja sigurnu investiciju za društvenu zajednicu i za privatne investitore. Investicije uložene u građenje vraćaju se kroz smanjenje troškova za energiju tijekom korištenja zgrade. Osim toga, zgrade s niskom potrošnjom energije doprinose značajno ublažavanju problema iscrpivosti fosilnih i nuklearnih goriva, njihova negativnog utjecaja na okoliš i zdravlje ljudi te ovisnost o uvozu, a stvaraju se i nova radna mjesta. Zgrade s niskom potrošnjom energije potiču razvoj novih tehnologija, razvoj novih građevnih proizvoda i novih načina građenja. S izgradnjom zgrada s niskom potrošnjom energije pojaviti će se potreba za novim aktivnostima u sektoru graditeljstva, naročito u pogledu sustavnog održavanja zgrada tijekom

njihova korištenja. Gotovo sve profesije koje su u vezi sa zgradarstvom naći će se, izravno ili posredno, pred novim tehnološkim i tehničkim izazovima.

Na razini EU postignut je konsenzus da bi ovakva politika bila prihvatljiva u svim državama članicama. U tom smislu, kao pravni okvir za ovakvu politiku, donesena je inovirana Direktiva 2010/31/EU o energetske svojstvu zgrada [16] (engleska kratica: EPBD), koja ima cilj poboljšanje energetske efikasnosti zgrada u državama članicama EU. Naime, kako je već ranije navedeno, potrošnja energije u stambenim zgradama i zgradama javne namjene predstavlja oko 40 % ukupne potrošnje konačne energije, a odgovorna je i za oko 36 % ukupne emisije CO₂ u EU. Zato se u članku 9 spomenute direktive zahtjeva da nakon 31. prosinca 2020. godine (za zgrade koje koriste tijela javne vlasti od 31. prosinca 2018. godine) sve novoizgrađene zgrade moraju biti zgrade gotovo nulte energije (eng.: nearly zero-energy building). Zgrada gotovo nulte energije definirana je u članku 2 direktive kao „zgrada koja ima vrlo visoka energetska svojstva. Gotovo nulta ili vrlo mala količina potrebne energije treba biti u značajnoj mjeri pokrivena energijom iz obnovljivih izvora, uključujući energiju iz obnovljivih izvora proizvedenu na lokaciji zgrade ili u blizini.“ Prema članku 9 sve države članice moraju dati praktičnu tehničku definiciju zgrade gotovo nulte energije u skladu s nacionalnim, regionalnim ili lokalnim uvjetima. Ta definicija mora obuhvaćati brojčani pokazatelj uporabe primarne energije izražen u kWh/(m²×a). Države članice moraju na nacionalnoj razini izraditi akcijski plan s ciljem porasta broja zgrada gotovo nulte energije u razdoblju do 2021. godine.

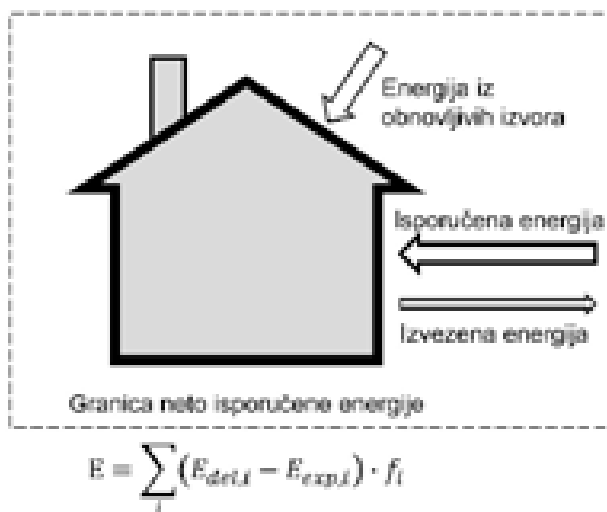
Zgrade gotovo nulte energije moraju postati energetske standard građenja zgrada u EU. Treba naglasiti da ovakvo drastično smanjenje potrošnje energije tijekom uporabe zgrade i korištenje lokalnih obnovljivih izvora energije ne znači razvoj zgradarstva u pravcu izvedbe autarkičnih zgrada i s tim povezanim potrebama za sezonsku pohranu energije, već naprotiv, zgrade gotovo nulte energije trebaju biti povezane s postojećom javnom energetske mrežom u koju isporučuju višak proizvedene energije i iz koje preuzimaju sezonske manjkove energije za vlastite potrebe, s tim da godišnja bilanca bude približno uravnotežena. Ovakav koncept razvoja zgrada ne uzima u obzir samo minimiziranje toplinskih gubitaka i maksimiziranje besplatnih toplinskih dobitaka te korištenje obnovljivih izvora energije, već znači razvoj inteligentne kuće (zgrada s ugrađenim centralnim upravljačkim sustavom na bazi mikroprocesorske tehnologije) koja je optimalno povezana na javnu električnu i toplinsku mrežu.

Da bi se postigao tako visoki energetske standard zgrade s gotovo nultom potrošnjom energije, ovojnica zgrade mora biti dobro toplinski izolirana (usporedivo sa standardima pasivne kuće, kuće nulte energije i kuće s viškom energije), tehnički sustavi zgrade moraju biti energetske učinkoviti, a za pokrivanje preostalih energetske potreba treba koristiti obnovljive izvore energije. Ovakav energetske koncept ima također utjecaja na vanjsko oblikovanje zgrada. Potrebna su nova arhitektonska i građevinska rješenja koja će omogućiti integriranje velikoplošnih solarnih toplinskih kolektora i fotonaponskih panela u ovojnicu zgrade te izgradnju drugih postrojenja za korištenje obnovljivih izvora energije na građevinske čestici.

Budući da pojam zgrade gotovo nulte energije nije jednoznačno definiran, potrebno je odrediti što znači nulta energija tj. što treba biti gotovo nula, odnosno do kojih granica se provodi bilanciranje energije? Vrijedi li bilanca nula samo za sustav grijanja ili za sustav grijanja i sustav pripreme potrošne tople vode ili za sve tehničke sustave zgrade uključivo i rasvjetu. Da li se u proračun nulte bilance treba uključiti i električna energija potrebna za rad električnih kućanskih uređaja ili čak i siva energija. Da li vlastita proizvodnja energije iz obnovljivih izvora uključuje proizvodnju samo na kući ili na građevinske čestici ili u blizini građevinske čestice ili je dopuštena kupovina obnovljive energije (npr. zelene električne energije).

Definicija zgrade gotovo nulte energije mora biti bazirana na vrijednostima isporučene i izvezeno energije. Na slici 1.12 prikazane su energetske granice sustava i način proračuna

neto isporučene energije kao razlike između isporučene energije, $E_{del,i}$, i izvezene energije $E_{exp,i}$, proračunate odvojeno za svaki energent i . Potrošnja primarne energije, E , dobivena je množenjem neto isporučene energije s faktorom primarne energije f_i . Energija proizvedena iz obnovljivih izvora na lokaciji zgrade nije uključena u isporučenu energiju.

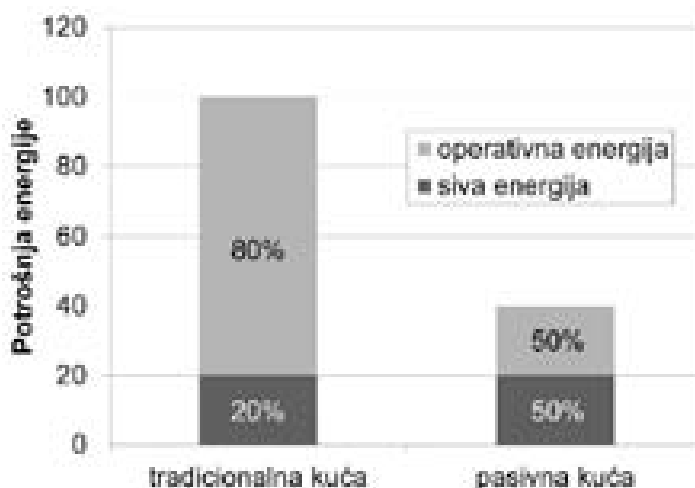


Slika 1.12 Energetska granica sustava za neto isporučenu energiju

Prema inoviranoj direktivi EPBD u proračun brojčanog pokazatelja uporabe primarne energije potrebno je uključiti energetske tokove svih tehničkih sustava zgrade. Kod toga nije obavezno, ali je dopušteno uključiti i energiju potrošenu električnim kućanskim uređajima. Razina svojstva „gotovo nulta potrošnja energije“ proizlazi iz nacionalne optimizacije u funkciji troškova. U RH, zgrada gotovo nulte energije za pojedine kategorije zgrada prema njihovoj namjeni, propisana je u inoviranom Tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (NN broj 128/2015).

1.12 Siva energija

U sektoru zgradarstva energija se iskorištava na dva načina. Prvi je uporaba energije tijekom korištenja zgrade. To je energija potrebna za grijanje i hlađenje prostora zgrade, za pripremu potrošne tople vode, za rasvjetu prostora i dr. Taj vid uporabe energije naziva se i operativna energija. Drugi način uporabe energije je uporaba energije za proizvodnju svih potrebnih građevnih proizvoda za izgradnju zgrade, zatim energija potrebna za njihovu dopremu do gradilišta, energija potrebna za izvedbu zgrade te za održavanje i popravke tijekom životnog vijeka zgrade i na kraju energija potrebna za uklanjanje zgrade i zbrinjavanje otpada. Ova energija naziva se siva energija ili utjelovljena (ugrađena) energija. Prema gruboj procjeni, za zgrade građene prema tehničkim propisima o toplinskoj zaštiti zgrada, koji su bazirani na minimalnoj toplinskoj zaštiti, od ukupno potrošene energije u životnom vijeku zgrade, prosječno oko 80 % odnosi se na njeno korištenje tj. operativnu energiju, a svega oko 20 % na sivu energiju. Prioritet je bio, dakle, prvenstveno smanjiti potrošnju energije u fazi korištenja zgrade, što se i postiže izgradnjom zgrade odgovarajućeg energetskeg standarda. Međutim, s izgradnjom niskoenergetskih kuća, pasivnih kuća i kuća gotovo nulte energije udio sive energije u ukupnoj potrošnji energije, koji je kod kuća lošeg energetskeg standarda izgledao proporcionalno zanemariv, postaje sada vrlo značajan. Potrebno je stoga analizirati sve faze životnog ciklusa pojedinih građevnih proizvoda da bi se utvrdilo gdje i kako dolazi do potrošnje sive energije i odredile mogućnosti za njeno smanjenje. Ne uzimanjem u obzir i sive energije može se dobiti sasvim pogrešna slika o potrošnji energije i posljedično emisiji stakleničkih i drugih štetnih plinova za pojedine građevne proizvode i zgradu u cjelini.



Slika 1.13 Odnos između operativne i sive energije ovisno o energetske standardu zgrade

Siva energija (njem.: grau energie; fran.: energie grise) ili **utjelovljena energija** (eng.: embodied energy) jest računski određena (procijenjena) ukupna primarna energija upotrijebljena u životnom ciklusu nekog građevnog proizvoda tj. energija utrošena za njegovu proizvodnju, transport, ugradnju, održavanje i konačno zbrinjavanje. Naziv „siva“ naznačuje da se radi o energiji koja nije vidljiva, koja je sakrivena, a postoji u građevnom proizvodu. To je „utjelovljena“ energija tj. energija ugrađena u promatrani proizvod.

Siva energija zgrade je ukupna potrošena energija za vrijeme čitavog životnog vijeka zgrade, bez energije potrebne za korištenje zgrade. To je skrivena energija ugrađena u zgradu koja nije vidljiva u samoj potrošnji energije kod korištenja zgrade. Sa sivom energijom povezana je i siva emisija ugljikova dioksida i drugih stakleničkih i onečišćujućih plinova. Poznavanje sive energije omogućava da se procjeni stvarna ukupna potrošnja energije neke zgrade i njen utjecaj na okoliš.

I kod sive energije nekog proizvoda treba razlikovati neobnovljivu sivu energiju tj. onu koja potječe iz neobnovljivih izvora energije i obnovljivu sivu energiju tj. onu koja potječe iz obnovljivih izvora.

Podaci o sadržaju sive energije u nekim građevnim materijalima, u dijelu koji se odnosi na njihovu proizvodnju, dani su u tablici 1.11.

Tablica 1.11 Potrošnja energije kod proizvodnje građevnih proizvoda

Građevni materijal / proizvod	Siva energija
Beton	0,85 MJ/kg
Armirani beton (2 vol. % čelika)	1,55 MJ/kg
Lagani beton s granulama EPS-a	3,74 MJ/kg
Zid od opeke	2,39 – 3,08 MJ/kg
Zid od porobetona	4,72 MJ/kg
Rezano drvo, tehnički sušeno (na 12 % vlage)	2,2 – 3,2 MJ/kg
Rezano drvo, prirodno sušeno (na 15 - 20 % vlage)	1,7 MJ/kg
Iverica	5,3 – 9,3 MJ/kg

Uslojeno drvo, tri sloja	7,5 MJ/kg
Ekspandirani polistiren (EPS)	105 MJ/kg
Pjenasto staklo (CG)	59 MJ/kg
Staklena vuna (MW)	41 MJ/kg
Kamena vuna (MW)	15,7 MJ/kg
Ekspandirano pluto (ICB)	12,7 MJ/kg
Ovčja vuna	16,5 MJ/kg
Okvir prozora, aluminijski	2 600 MJ/m ² otvora
Okvir prozora, PVC	900 MJ/m ² otvora
Okvir prozora, aluminij / drvo	850 MJ/m ² otvora
Okvir prozora, drvo	350 MJ/m ² otvora
Toplinsko-izolacijsko ostakljenje, Low-E, ispuna argonom	640 MJ/m ² otvora
Toplinsko-izolacijsko ostakljenje	380 MJ/m ² otvora
Željezo	86 - 187 GJ/m ³
Bakar	504 GJ/m ³
Aluminij	684 GJ/m ³

Kod laganog betona s granulama EPS-a veliki dio sive energije odnosi se na proizvodnju EPS-a.

Kod armiranog betona veliki utjecaj na sadržaj sive energije ima stupanj armiranja.

Kod opečnih proizvoda najveći utjecaj na sivu energiju ima temperatura kod pečenja opeke.

Kod iverice i uslojenog drva veliki dio sive energije odnosi se na vezno sredstvo.

Od toplinsko-izolacijskih materijala najveći sadržaj sive energije imaju pjenasti plastični materijali.

Kod prozora sadržaj sive energije bitno ovisi o materijalu prozorskog okvira. Za proizvodnju prozorskog okvira od aluminija potroši se preko sedam puta više energije nego za prozorski okvir od drva.

Metali općenito sadrže u sebi mnogo sive energije.

Općenito, proizvodi koji dolaze iz udaljenih područja sadrže više sive energije u odnosu na iste takve proizvode koji se upotrebljavaju blizu mjesta njihove proizvodnje.

Treba nastojati što duže koristiti pojedine proizvode, kako bi se u njih ugrađena energija manje rasipala. Korištenje trajnijih proizvoda povoljnije je, dakle, s gledišta ne rasipanja sive energije.

Za proizvodnju uređaja koji se koriste za pretvorbu obnovljive energije često je potrebna znatna količina energije. Naime, zbog manje gustoće energije potreban je veći utrošak materijala sveden na jedinicu proizvedene energije. Zato je kod takvih uređaja potrebno duže vrijeme dok se proizvedena količina energije ne izjednači sa sivom energijom.

1.13 Održiva gradnja

Održivost je sposobnost održavanja ravnoteže određenih procesa ili stanja u nekom sustavu. Održivi razvoj je razvoj koji zadovoljava potrebe današnjice, a pritom ne ugrožava zadovoljenje potreba budućih generacija. To je razvoj u okvirima prihvatnog kapaciteta ekosustava Zemlje. Održivi razvoj ne iscrpljuje prirodna bogatstva i ne narušava kvalitetu okoliša. On znači skladan odnos gospodarskih i društvenih uvjeta sa zaštitom okoliša. On uzima u obzir djelovanje društveno-gospodarskog razvoja na okoliš, tj. smješta ga u ekološke granice planeta Zemlje.

Održiva gradnja je jedan od značajnijih dijelova održivog razvoja. Ona se također naziva i zelena gradnja, ekološka gradnja ili eko-gradnja. Održiva zgrada se može definirati kao zgrada koja odgovara potrebama svojih korisnika, koja ograničeno opterećuje okoliš i čiji su troškovi izgradnje i korištenja primjereni. S društvenog gledišta, održiva zgrada pruža sigurnost i komfor korisnicima zgrade te zadovoljava potrebe zbog kojih je izgrađena. U vezi sa zaštitom okoliša, održiva zgrada troši malo energije odnosno energetski je učinkovita, proizvodi ograničenu količinu stakleničkih plinova, koristi građevne materijale koji nisu štetni po okoliš te stvara malo otpada, sve promatrano u cijelom životnom ciklusu zgrade. S gospodarskog gledišta održiva zgrada stvara primjerene troškove tijekom izvođenja zgrade i njenog korištenja i dugotrajno zadržava svoju vrijednost.

Koncept održivog razvoja više se odnosi na postupak kojim se postiže neko stanje nego na samo konačno stanje. Tako, da bi se jedna zgrada ili građevni proizvodi označili održivim, potrebno je analizirati ne samo konačni rezultat već prije svega proces koji je doveo do tog rezultata.

2 TOPLINA I TEMPERATURA

2.1 Znanost o toplini

Znanost o toplini je grana fizike koja se bavi toplinskom energijom i pojavama koje su s njom povezane. Kod toga se može koristiti makroskopski ili mikroskopski pristup pa se u tom pogledu znanost o toplini dijeli na dva dijela: termodinamiku koja proučava makroskopska svojstva tvari i kinetičko-molekularnu teoriju koja ta svojstva objašnjava pomoću mikroskopske strukture tvari.

Termodinamika karakterizira svojstva materijalnih tijela s nekoliko njegovih mjerljivih fizikalnih svojstava (tlak, temperatura, obujam,...) ne objašnjavajući pri tome zašto su njihove brojčane vrijednosti upravo tolike. Zato se za termodinamiku kaže da je fenomenološka disciplina.

Termodinamika najčešće ograničava svoja promatranja na određenu količinu tvari unutar neke zatvorene plohe i to nazivamo **termodinamičkim sustavom**. Sve što ne pripada sustavu nazivamo okoliš. Termodinamički sustav odvojen je od okoliša granicom sustava. Međusobno djelovanje termodinamičkog sustava i okoliša može se odvijati prijenosom topline i obavljanjem rada. Svaku promjenu stanja nekog termodinamičkog sustava tijekom vremena nazivamo **termodinamičkim procesom**.

Termodinamički procesi mogu biti povratni i nepovratni. Povratni proces je onaj koji povratkom u početno stanje na sustavu i na okolici ne ostavlja mjerljivih posljedica (primjerice adijabatski proces). Nepovratni termodinamički proces je onaj koji se ne može vratiti u početno stanje bez posljedica za sustav.

Opažanja na kojima se zasniva termodinamika mogu se objasniti pozivanjem na mikroskopsku građu tvari. Makroskopska tijela sastoje se od velikog broja sitnih čestica među kojima djeluju sile. Molekula je najmanja čestica neke tvari koja potpuno određuje njezina kemijska svojstva. Sastoji se od jednog ili više atoma. Molekule tvari se nalaze u neprekidnom nesređenom gibanju. Kinetičko-molekularna teorija topline objašnjava makroskopska svojstva tvari pomoću gibanja njegovih molekula.

2.2 Toplina

Pojam topline nastao je kao iskustvena činjenica iz svakodnevnog života. **Toplina** je, primjerice, ono što osjećamo kad se nalazimo ispred upaljene peći. Određeno „stanje topline“ nekog tijela koje osjetimo kad ga dodirnemo izražavamo riječima da je tijelo mrzlo, hladno, mlako, toplo ili vruće.

Ako dva čvrsta predmeta međusobno trljamo, ona će se zagrijati. Kinetička energija trljanja pretvorena je u toplinu. Ili, ako čekićem udaramo u neki metalni predmet, zagrijati će se i čekić i udarani predmet. Kinetička energija čekića pretvorena je u toplinu. Toplina se dakle može povezati s utroškom mehaničkog rada.

Ako u plamen stavimo metalnu šipku ona će se zagrijati. Kemijska energija goriva pretvorena je u toplinu koja je prešla na metalnu šipku.

Suprotna pojava nastaje, primjerice, kod parnog stroja. Tu zagrijani plin pokreće stroj pri čemu se plin ohlađuje. Toplina plina pretvara se, dakle, u mehaničko gibanje (rad).

Zbog svojstva uzajamnog pretvaranja rada (energije) u toplinu i topline u rad (energiju) toplinu smatramo posebnim oblikom energije. Za energiju je, naime, svojstvena pretvorba iz jednog oblika u drugi.

Toplina je, dakle, oblik energije. Ona može nastati pretvorbom drugih oblika energije u toplinu i obrnuto, toplinska se energija može pretvoriti u neki drugi oblik energije. Toplina se može fizikalnom tijelu (čvrsto tijelo, tekućina ili plin) dovoditi ili odvoditi od tijela.

Mjerna jedinica topline ista je kao i jedinica energije. U Međunarodnom sustavu jedinica, izvedena jedinica za mjerenje topline je džul, oznaka J.

$$1 \text{ J} = 1 \text{ W} \times \text{s} = 1 \text{ N} \times \text{m} \quad (2.1)$$

Ovdje je $\text{W} \times \text{s}$ oznaka za vatsekundu, a $\text{N} \times \text{m}$ oznaka za njutnmetar. Vat, oznaka W, je jedinica za snagu, a njutn, oznaka N, je jedinica za silu.

Nekada, dok se još nije znalo da je toplina oblik energije, za toplinu se koristila jedinica kalorija, oznaka cal (danas nije zakonita jedinica). Jedna kalorija je toplina koja je potrebna da se jedan gram vode ugrije od $14,5^\circ\text{C}$ do $15,5^\circ\text{C}$. Danas, kada se zna da je toplina samo jedan od brojnih oblika energije, jasno je da toplinu treba iskazati u istim mjernim jedinicama kao i energiju. Veza između međunarodne kalorije i džula je slijedeća:

$$1 \text{ cal} = 4,1868 \text{ J} \quad (2.2)$$

Osnovno opažanje termodinamike je da toplina prelazi s toplijeg tijela na hladnije. Za tijelo koje predaje toplinu kažemo da je toplije, a za tijelo na koje se toplina prenosi da je hladnije. Prijenos topline traje sve dok se ne uspostavi toplinska ravnoteža tj. dok oba tijela ne budu jednako „topla“.

Da bi se moglo utvrditi svojstvo stanja „topao“, trebalo je uvesti novu fizikalnu veličinu – temperaturu. **Temperatura** je osnovna fizikalna veličina. Ona se može mjeriti. Ako želimo promijeniti temperaturu nekog tijela (sustava), treba mu dovesti, odnosno od njega odvesti toplinsku energiju (osim kod promjene agregatnog stanja). Kod dovođenja topline tijelo se zagrijava tj. njegova temperatura raste. Kod odvođenja topline od tijela ono se hladi tj. temperatura mu se smanjuje. Dodir dvaju tijela različitih temperatura dovodi do toga da se hladnije tijelo zagrije na onu temperaturu na koju se toplije tijelo ohladi.

Pojam hladnoće koji se koristi često u svakodnevnom govoru u fizici nije definiran. Riječi „hladno“, „hladnoća“ koristimo da bi označili odsustvo topline. Za usporedbu, hladnoća je toplini isto što je tama svijetlosti. Hladnoća i tama su suprotnost (negacija) pojmovima toplina i svijetlost.

2.3 Unutarnja energija

U nekim jednostavnijim slučajevima, energija termodinamičkog sustava jednaka je zbroju triju različitih oblika energije:

- a) potencijalne energije, E_p , nastale djelovanjem vanjskih sila na sustav (gravitacijsko polje Zemlje):

$$E_p = m \times g \times z \quad (2.3)$$

gdje je:

- m masa tijela,
 g ubrzanje sile teže,
 z visina iznad morske površine.

- b) kinetičke energije, E_k , makroskopskog gibanja sustava:

$$E_k = \frac{m \times v^2}{2} \quad (2.4)$$

gdje je v brzina gibanja sustava, i

- c) unutarnje energije, U , koja ovisi o kinetičkoj energiji kaotičnog gibanja mikročestica sustava (molekula, atoma,...), zatim o potencijalnoj energiji međusobnog djelovanja tih čestica, o energiji atomskih jezgri, itd.

Unutarnja energija, U , termodinamičkog sustava jednaka je, dakle, razlici između ukupne energije sustava i zbroja kinetičke i potencijalne energije sustava na makroskopskoj razini. U termodinamičkoj analizi sustava ne koriste se, međutim, apsolutne vrijednosti njegove unutarnje energije već samo povećanje ili smanjenje veličine U tijekom termodinamičkog procesa. Stoga se pod unutarnjom energijom razumijevaju one njene komponente koje se mijenjaju u promatranom procesu. U tehničkoj termodinamici (toplinskim i rashladnim uređajima) uzimaju se u obzir samo kinetička energija gibanja molekula i potencijalna energija koja ovisi o razmaku između molekula. Prema kinetičko-molekularnoj teoriji unutarnja energija nekog tijela jednaka je zbroju kinetičkih energija kaotičnog gibanja svih molekula u tijelu i potencijalne energije njihova međudjelovanja. Unutarnja energija nekog tijela ovisi samo o toplinskom stanju tijela te o vrsti i količini tvari od koje je tijelo građeno. Zato je unutarnja energija nekog tijela veličina toplinskog stanja tog tijela.

Ako se tijelu dovodi toplota i ako ono pri tome ne obavlja mehanički rad, u tijelu će se akumulirati energija u obliku topline tj. unutarnje energije. Sva tijela, ovisno o njihovoj temperaturi, sadrže u sebi određenu količinu unutarnje energije. Ta unutarnja energija se kod dovođenja topline povećava, a kod odvođenja topline smanjuje. Na višim temperaturama veća je unutarnja energija nego na nižim. Temperatura tijela je, dakle, u određenom smislu mjera za unutarnju energiju tijela. S druge strane što je veća količina tvari to je, uz iste druge uvjete, veća i unutarnja energija.

Kada su dva tijela različitih temperatura u međusobnom dodiru, tada dio unutarnje energije tijela više temperature prelazi u obliku topline na drugo tijelo niže temperature. Zato se toplota definira kao energija u prijelazu s jednog tijela na drugo zbog razlike temperatura tih tijela. Toplina je, dakle, prijelazni oblik energije. Kad se temperature izjednače tijela više ne izmjenjuju toplinu. U tom smislu ne može se reći da je toplota pohranjena u tijelu.

Toplinska energija se po svojim svojstvima bitno razlikuje od unutarnje energije. Toplinska energija karakterizira proces izmjene topline jednog tijela s drugim tijelom. Unutarnja energija je veličina stanja tj. fizikalna veličina koja opisuje toplinsko stanje tijela. Svakom toplinskom stanju tijela pridružena je određena vrijednost unutarnje energije.

Jedinica SI za unutarnju energiju, U , je džul, oznaka J. Obično se navodi specifična vrijednost unutarnje energije, u , u J/kg, koja označava količinu unutarnje energije sadržane u jednom kilogramu promatranog tijela.

2.4 Temperatura

Temperatura je jedna od sedam osnovnih fizikalnih veličina. To je makroskopsko svojstvo tijela. Ona je karakteristika koja nam omogućava da kažemo da je neko tijelo više ili manje toplo od nekog drugog tijela. Toplija tijela su više temperature, a hladnija tijela niže. Velikost temperature ovisi o tome koliko unutarnje energije sadrži neko tijelo određene mase i tlaka.

Mjerenje temperature započelo je početkom 18. stoljeća. Postoji više mjernih jedinica za temperaturu [17]. U Europi se temperatura mjeri u Celzijevim stupnjevima, oznaka °C. U međunarodnom sustavu jedinica, jedinica za temperaturu je kelvin, oznaka K. Temperaturu u kelvinima nazivamo **termodinamička temperatura** ili **apsolutna temperatura**. Temperaturu u kelvinima označavamo oznakom T , a temperaturu u Celzijevim stupnjevima oznakom θ . Decimalni predmeci za tvorbu većih ili manjih jedinica se ne koriste.

Termodinamička temperatura definirana je na temelju dvije čvrste temperaturne točke i to termodinamičke temperature trojne točke destilirane vode kod tlaka zraka od 101 325 Pa (normalna, standardna ili fizikalna atmosfera, oznaka atm – stara jedinica za tlak) kojoj je pripisana vrijednost

$$T_t = 273,16 \text{ K} \quad (2.5)$$

i nul točke ili apsolutne nule tj. termodinamičke temperature kod koje hlađenjem idealnog plina tlak teoretski postaje nula. Termodinamička temperatura trojne točke vode, T_t , je ravnotežno stanje njene krutine (leda), tekućine i pare.

Iz jednadžbe (2.5) slijedi da je:

$$1 \text{ K} = \frac{T_t}{273,16} \quad (2.6)$$

Jedinica termodinamičke temperature kelvin jednaka je 273,16-om dijelu termodinamičke temperature trojne točke vode.

Temperaturni razmak između točke taljenja leda pri normalnom tlaku i apsolutne nule iznosi 273,15 K.

Mjerenje termodinamičke temperature u kelvinima započinje kod apsolutne nule s nula kelvina (0 K). Termodinamička temperatura u kelvinima uvijek je pozitivna.

Za utvrđivanje Celzijeve temperaturne skale u °C služe dvije fiksne temperaturne točke: temperatura taljenja leda (točka taljenja leda ili točka ledišta vode) i temperatura vrenja vode (točka vrenja), obje kod tlaka zraka 101 325 Pa. Taj temperaturni razmak podijeljen je u 100 dijelova. 1/100 tog temperaturnog razmaka je 1 °C. Jednaka razdioba temperaturne skale načinjen je i iznad vrelišta i ispod ledišta vode. Temperature niže od ledišta vode označene su kao negativne, a iznad pozitivne.

Mjerenje Celzijeve temperature u °C započinje kod točke taljenja leda s 0 °C. Temperatura nekih tijela u Celzijevim stupnjevima može biti, dakle, negativna, što fizikalno promatrajući nema smisla. Temperatura tijela je, naime, mjera za u njemu sadržanu unutarnju energiju, a njena najmanja vrijednost može biti nula, ali ne i negativna. Fizikalno smisljena temperaturna skala mora, dakle, započeti s nulom i smije sadržavati samo pozitivne vrijednosti. Takva je, upravo, termodinamička temperaturna skala u kelvinima.

Razlika temperature od jednog „kelvina“ po veličnosti je jednak jednom „Celzijevom stupnju“. Kod Celzijeve temperaturne skale ishodište skale je utvrđeno proizvoljno (ledište vode), a kod Kelvinove temperaturne skale na temelju fizikalnih načela (apsolutna nula). Celzijeva i Kelvinova skala razlikuju se, dakle, samo s obzirom na izbor nul točke, a ne i prema veličnosti jedinice.

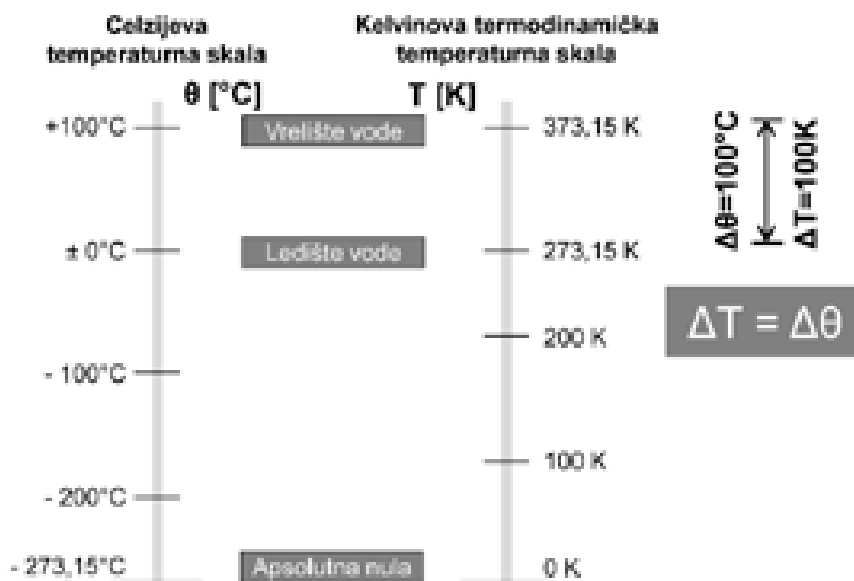
Za preračunavanje vrijednosti temperatura iz Celzijevih stupnjeva u kelvine i obrnuto vrijedi slijedeći odnos:

$$T(\text{K}) = \theta(^{\circ}\text{C}) + 273,15 \quad (2.7)$$

Brojčane vrijednosti razlika temperatura u K i °C su jednake

$$\Delta T = \Delta \theta \quad (2.8)$$

Zato se u svim formulama u kojima se nalazi razlika temperatura, ista može unositi u °C.



Slika 2.1 Celzijeva i Kelvinova temperaturna skala

Prema kinetičko-molekularnoj teoriji termodinamička temperatura tijela je proporcionalna srednjoj kinetičkoj energiji nesređenog gibanja njenih molekula. Povećati temperaturu tijela znači povećati srednju brzinu kretanja njegovim molekulama. Kako brzina kretanja molekula može biti sve veća, to znači da ne postoji gornja granica temperature. Naprotiv, ako se zamisli sve sporije kretanje molekula, one će u određenom trenutku doći u stanje mirovanja. Drugim riječima, u području niskih temperatura postoji jedna krajnja temperatura, a to je apsolutna nula:

$$T = 0 \text{ K} \quad (2.9)$$

Temperatura tijela ne može se neposredno mjeriti. **Termometri**, tj. naprave koje služe za mjerenje temperature, mjere zapravo samo različite manifestacije toplinskog stanja tijela, od kojih se za mjerenje temperature najčešće koriste: toplinsko istezanje, promjena električnog otpora, pojava električnog napona i zračenje topline. Tako npr. živin termometar ne mjeri u stvari temperaturu već je on dilatometar koji mjeri prirast obujma žive pri promjeni toplinskog stanja iz čega se zaključuje o toplinskom stanju, a time i o temperaturi „kuglice“ žive u termometru.

2.5 Količina topline

Toplina se, kao i drugi oblici energije, izražava količinom topline koja se prenosi. Temperatura izražava samo toplinsko stanje i potencijal tj. sposobnost da uzrokuje prijenos određene količine topline kada postoji razlika potencijala. Razlika temperatura je, dakle, pokretačka sila za prijenos topline s područja više prema području niže temperature. Razliku temperatura na određenoj udaljenosti u tijelu i u određenom smjeru nazivamo **temperaturni gradijent**.

Količina topline je, dakle, toplina u prijelazu s jednog tijela na drugo tijelo zbog njihovih različitih temperatura.

Dovođenje topline nekom tijelu ili odvođenje topline od tijela uzrokuje promjenu njegove temperature (osim pri promjeni agregatnog stanja). Mnogobrojni pokusi pokazuju da postoji slijedeći odnos

$$Q = c \times m \times \Delta T \quad (2.10)$$

gdje je:

Q količina topline koja se dovodi tijelu ili odvodi od tijela, u džulima, J. Često se u praksi za količinu topline koristi jedinica kilovatsat, kWh ili megadžul, MJ (vidjeti izraze (1.12) i (1.13)).

m masa tijela, u kg,

$\Delta T = T_2 - T_1$ promjena temperature tj. razlika između početne temperature tijela T_1 i konačne temperature tijela T_2 , u K,

c koeficijent proporcionalnosti koji se naziva specifični toplinski kapacitet tvari od koje se sastoji tijelo, u J/(kg×K).

Ako je $Q > 0$ to znači da je toplota predana tijelu. Q je jednako nula kad nema izmjene topline. Kada je $Q < 0$ tijelo predaje toplotu okolišu.

2.6 Specifični toplinski kapacitet

Specifični toplinski kapacitet, c , je ona količina topline koju treba dovesti da bi jednom kilogramu neke tvari porasla temperatura za jedan kelvin.

Specifični toplinski kapacitet ovisi o temperaturi tvari. Za manje temperaturne intervale, kakvi se susreću u građevinskoj fizici, često se upotrebljava srednji specifični toplinski kapacitet koji približno vrijedi za određeni temperaturni interval.

Specifični toplinski kapacitet u manjoj mjeri ovisi i o tome da li je kod promjene temperature tijela spriječena ili nije spriječena njegova deformacija. Kod čvrstih tijela i tekućina to nema većeg utjecaja na vrijednost veličine c i može se zanemariti. Kod plinova promjenu obujma međutim treba uzeti u obzir. Zagrijavamo li plinovito tijelo pri stalnom tlaku tada mu se osim povećanja unutarnje energije povećava i obujam. Ako je promjena obujma spriječena (stalan obujam) sva dovedena toplota utrošiti će se na povećanje unutarnje energije. U oba procesa, za jednaki porast temperature, toplota će biti različita. Zato se kod plinova pri navođenju vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta mora naznačiti proces kojim je tijelo dovedeno iz početnog u konačno stanje. U tom smislu određuje se specifični toplinski kapacitet pri stalnom tlaku (c_p) i specifični toplinski kapacitet pri stalnom obujmu (c_v).

Vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta, c , nekih materijala navedene su u tablici 2.1.

Tablica 2.1 Vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta, c , nekih materijala

Materijal	c	Materijal	c
	J/(kg×K)		J/(kg×K)
zid od pune opeke od gline	900	bakar	380
zid od šupljih blokova od gline	900	čelik	450
zid od šupljih blokova od betona	1 000	prirodni kamen	1 000
armirani beton	1 000	ekspandirani polistiren	1 450
vapneno-cementna žbuka	1 000	mineralna vuna	1 030
gips	1 000	zrak*	1 000
drvo	1 700	voda	4 186
staklo	750	led	2 000
alumijske legure	880	vodena para*	1 900

* specifični toplinski kapacitet pri stalnom tlaku, c_p

Potrebno je uočiti veliku vrijednost specifičnog toplinskog kapaciteta vode ($c = 4186 \text{ J/(kg} \times \text{K)}$), što je čini prikladnim sredstvom za prijenos topline i uskladištenje toplinske energije.

Umnožak specifičnog toplinskog kapaciteta, c , i mase tijela, m , nazivamo **toplinski kapacitet** tijela, oznaka C , jedinica J/K :

$$C = c \times m \quad (2.11)$$

Iz jednadžbe (2.10) slijedi:

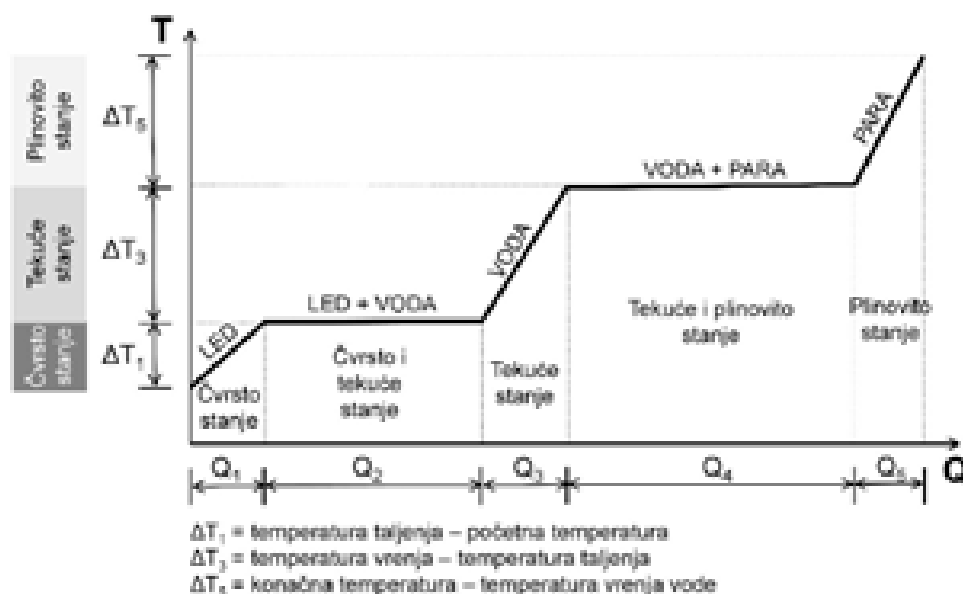
$$C = \frac{Q}{\Delta T} \quad (2.12)$$

Toplinski kapacitet je, dakle, količina topline koja se mora dovesti tijelu ili odvesti od tijela, da bi mu se temperatura promijenila za 1 K odnosno za 1°C .

2.7 Latentna toplina

Toplinu koja uzrokuje promjenu temperature nekog tijela nazivamo **osjetna toplina**, oznaka Q_s . Osjetna toplina mijenja temperaturu tvari. Nasuprot tome **latentna toplina**, oznaka Q_L , je toplina koja mijenja agregatno stanje tvari. To je toplina koju neka količina tvari treba predati svojem okolišu ili primiti (upiti, apsorbirati) iz okoliša kako bi promijenila agregatno stanje.

Tvari se u prirodi mogu nalaziti u tri različita agregatna stanja: čvrstom, tekućem i plinovitom. Pod određenim uvjetima tijelo može prijeći iz jednog agregatnog stanja u drugo. Tako se zagrijavanjem leda (voda u čvrstom stanju), kad se dosegne temperatura tališta (0°C pri normalnom tlaku), led počne otapati u tekućinu (vodu). Sve dok se led ne otopi toplina koja mu se dovodi koristi se za njegovo otapanje, a pri tome temperatura mješavine vode i leda ostaje konstantna. Kada se sav led otopi, daljnjim grijanjem tekuće vode, povećavati će se njena temperatura, sve dok se ne dosegne temperatura vrelišta. Na temperaturi vrelišta (100°C pri normalnom tlaku) voda se postepeno pretvara u vodenu paru, pri čemu temperatura vode ostaje ista dok se sva voda ne pretvori u paru. Toplina koja se dovodi vodi koja vrije koristi se za pretvaranje vode u paru. Proizvedena para iste je temperature kao i voda. Poveća li se dovod topline, ubrzati će se isparavanje, ali se temperatura pri tome neće mijenjati. Tek kad se sva voda pretvori u paru, daljnjim dovođenjem topline vodenoj pari rasti će njena temperatura. Ovaj proces grafički je prikazan na slici 2.2.



Slika 2.2 Shematski prikaz promjena agregatnog stanja vode uslijed stalnog dovođenja topline

Toplinu koju tijelo primi ili preda pri prijelazu iz jednog agregatnog stanja u drugo nazivamo **latentna** (lat.: latere – biti sakriven) **toplina transformacije**, jer je „sakrivena“, „nevidljiva“ u usporedbi s osjetnom toplinom koja se manifestira u promjeni temperature. Latentna toplina uzrokuje promjenu agregatnog stanja tvari bez promjene njene temperature. Sve promjene agregatnog stanja obavljaju se na konstantnoj temperaturi. Temperaturu tvari mijenja osjetna toplina.

Latentna toplina koju neko tijelo mase m , u kg, mora primiti iz okoliša ili predati okolišu, kako bi promijenilo svoje agregatno stanje, iznosi:

$$Q_L = m \times L \quad (2.13)$$

gdje je L specifična latentna toplina po jedinici mase te tvari, u J/kg.

Bez obzira na vrstu tvari govorimo o:

- **toplina taljenja**: toplini potrebnoj za prelazak iz čvrstog agregatnog stanja u tekuće,
- **toplina isparavanja**: toplini potrebnoj za prelazak iz tekućeg agregatnog stanja u plinovito,
- **toplina kondenzacije**: toplini oslobođenoj pri prijelazu iz plinovitog agregatnog stanja u tekuće,
- **toplina skrućivanja**: toplini oslobođenoj pri prijelazu iz tekućeg agregatnog stanja u čvrsto.

Uvijek je toplina taljenja jednaka toplini **skrućivanja**, a toplina isparavanja jednaka je toplini kondenzacije.

Taljenje je proces prijelaza tvari iz čvrstog u tekuće stanje uzrokovan zagrijavanjem čvrste tvari. Temperaturu na kojoj počinje taj proces nazivamo **talište**. Prema kinetičko-molekularnoj teoriji topline, čvrsta se tvar počinje taliti kada njezine molekule zagrijavanjem prime količinu energije dovoljnu da napuste svoja mjesta u kristalnoj rešetki i rešetka se počinje raspadati tj. tvar se počinje taliti. Proces obrnut taljenju nazivamo **skrućivanja**. **Krutište** je temperatura na kojoj se tekućina skrućuje tj. mijenja se agregatno stanje iz tekućeg u čvrsto. Za sve je tvari talište jednako krutištu.

Specifična toplina taljenja, oznaka L_i , je količina topline potrebna da bi se jedan kilogram neke čvrste tvari, na temperaturi tališta, preveo potpuno u tekuće agregatno stanje, a da se pri tome ne mijenja njegova temperatura. SI mjerna jedinica je J/kg.

Isparavanje je proces prijelaza tvari iz tekućeg u plinovito agregatno stanje vrenjem tekućine a odvija se unutar cijelog obujma tekućine. Temperaturu na kojoj tekućina vrije nazivamo **vrelište** tekućine. **Hlajenje** je proces prijelaza tvari iz tekućeg u plinovito agregatno stanje koji se događa na bilo kojoj temperaturi nižoj od vrelišta i odvija se samo na slobodnoj površini tekućine.

Kondenzacija ili ukapljivanje je proces prevođenja pare u tekuće agregatno stanje. Odvođenjem topline (hlađenjem) rastu kohezijske sile između molekula pare pa se one postepeno sjedinjuju u kapljice. Pri kondenzaciji se oslobađa određena količina latentne topline. Kondenzacija je proces obrnut isparavanju.

Specifična toplina isparavanja, oznaka L_v , je količina topline potrebna da bi se jedan kilogram neke tvari preveo iz tekućeg u plinovito stanje na temperaturi vrelišta, a da se pri tome ne mijenja njegova temperatura. SI mjerna jedinica je J/kg.

Sublimacija je proces izravnog prijelaza iz čvrstog u plinovito stanje (bez tekućeg stanja kao međufaze), a obrnuti proces tj. izravan prelazak pare u čvrsto stanje, nazivamo **desublimacija**.

Talište i vrelište kod tlaka zraka od 101 325 Pa te specifična toplina taljenja i specifična toplina isparavanja za neke tvari navedeni su u tablici 2.2.

Tablica 2.2 Talište i vrelište te specifična toplota taljenja i specifična toplota isparavanja za neke tvari

Materijal	Talište	Specifična toplota taljenja, L_t	Vrelište	Specifična toplota isparavanja, L_i
	°C	kJ/kg	°C	kJ/kg
Aluminij	660,1	397	2 450	10 900
Olovo	327,4	23	1 750	8 600
Željezo	1 535	277	2 735	6 340
Bakar	1 083	205	2 590	4 790
Kisik	-218,8	13,8	-182,97	213
Etilni alkohol	-114,4	108	78,33	840
Voda	0	333,7	100	2 256

Toplina isparavanja jedne litre vode je 2 256 kJ/kg (na atmosferskom tlaku i temperaturi 100 °C). Toplina isparavanja vode mijenja se u funkciji temperature vode koja isparava. Na temperaturi 20 °C ona iznosi 2 454 kJ/kg i 2 501 kJ/kg na 0 °C. Za isparavanje vode kad je već zagrijana na 100 °C, potrebno je, dakle, manje energije.

Toplina taljenja leda je 333,7 kJ/kg (na atmosferskom tlaku i temperaturi 0 °C). Kad voda prelazi u led osloboditi će se jednaka količina topline.

Primjer 2.1

Da bi se voda mase jedan kilogram ugrijala od 0 °C na 100 °C potrebno je

$$Q = 4186 \times 1 \times 100 = 418,6 \text{ kJ}$$

osjetne topline.

Da bi voda mase jedan kilogram, na atmosferskom tlaku, prešla u vodenu paru, potrebno je 2 256 kJ latentne topline, dakle, 5,4 puta više topline nego za njeno zagrijavanje od 0 °C do 100 °C.

2.8 Entalpija

Entalpija ili „sadržaj topline“ termodinamičkog sustava je, kao i unutarnja energija, veličina stanja tj. ovisi samo o toplinskom stanju tvari koju opisuje. Oznaka za entalpiju je H a jednaka je zbroju unutarnje energije U i umnošku tlaka p i obujma tvari V , dakle

$$H = U + p \times V \quad (2.14)$$

SI jedinica za entalpiju je džul, oznaka J.

Specifična entalpija, h , jedinica J/kg, je omjer entalpije H i mase m tvari koja ima entalpiju H , dakle

$$h = \frac{H}{m} \quad (2.15)$$

odnosno

$$h = u + p \times v \quad (2.16)$$

gdje je

$v = V/m$ specifični ili jedinični obujam, mjerna jedinica m³/kg.

Entalpija je mjera za unutarnji sadržaj toplinske energije. Promjena entalpije Δh , kao i promjena unutarnje energije Δu , nije ovisna o prirodi termodinamičkog procesa, već o početnom i konačnom toplinskom stanju tvari, pa je

$$\Delta h = h_2 - h_1 \quad (2.17)$$

odnosno za ukupne entalpije

$$\Delta H = H_2 - H_1 \quad (2.18)$$

U slučaju izobarnog procesa ($p = \text{konst.}$) dobije se da je

$$\Delta H = Q \quad (2.19)$$

U slučaju izobarnog procesa dovedena, odnosno oslobođena toplina, Q , iz termodinamičkog sustava jednaka je promjeni entalpije sustava. Drugačije rečeno, količina topline koju treba dovesti nekom tijelu temperature T_1 da bi mu se povisila temperatura na T_2 jednaka je razlici entalpija. Kod toga promatrano tijelo može prolaziti kroz više različitih agregatnih stanja.

Uvođenjem pojma entalpije razni proračuni u termodinamici znatno se pojednostavnjuju [19].

Primjer 2.2:

Koja količina topline je potrebna da bi se, pri atmosferskom tlaku, 5 kg vode (tekuće agregatno stanje) ugrijalo od 0 °C na 150 °C (plinovito agregatno stanje). Pretpostaviti da su entalpija i unutarnja energija vode na temperaturi 0°C jednake nuli.

Toplina koju treba dovesti da bi se temperatura jednog kilograma vode povećala od 0 °C do 100 °C (osjetna toplina) je prema jednadžbi (2.10):

$$Q_1 = 4\,186 \times (100 - 0) = 418,6 \text{ kJ/kg}$$

Za isparavanje jednog kilograma vode na temperaturi 100 °C potrebno je dovesti latentnu toplinu $Q_2 = 2\,256 \text{ kJ/kg}$.

Da bi se jedan kilogram vodene pare ugrijao sa 100 °C na 150 °C potrebna je osjetna toplina:

$$Q_3 = 1900 \times (150 - 100) = 95 \text{ kJ/kg}$$

Ukupno potrebna toplina da bi se jedan kilogram vode ugrijao od temperature 0 °C na temperaturu 150 °C, iznosi

$$Q = 418,6 + 2\,256 + 95 = 2\,769,6 \text{ kJ/kg.}$$

Specifična entalpija vodene pare temperature 150 °C pri atmosferskom tlaku je $h = 2\,769,6 \text{ kJ/kg}$.

Za dovođenje 5 kg vode s temperature 0 °C na 150 °C potrebno je dovesti ukupno topline

$$Q_{\text{uk}} = H = 2\,769,6 \times 5 = 13\,848 \text{ kJ}$$

Primjer 2.3:

Koliku količinu topline treba odvesti iz 5 kg vodene pare temperature 150 °C, pri atmosferskom tlaku, da bi se dobila voda temperature 50 °C? Pretpostaviti da su entalpija i unutarnja energija vode na temperaturi 0°C jednake nuli.

Entalpija 5 kg vode temperature 50 °C je:

$$H_1 = 4\,186 \times 50 \times 5 = 1\,046,5 \text{ kJ}$$

Entalpija 5 kg vodene pare temperature 150 °C je $H_2 = 13\,848 \text{ kJ}$ (vidi *primjer 2.2*) Količina topline koju treba odvesti iz 5 kg vodene pare temperature 150 °C da bi se dobila voda temperature 50 °C je

$$Q = \Delta H = 13\,848 - 1\,046,5 = 12\,801,5 \text{ kJ}$$

Entalpija vlažnog zraka

Vlažnim zrakom nazivamo smjesu suhog zraka i vodene pare. Specifična entalpija vlažnog zraka, h_s , jednaka je zbroju entalpija suhog zraka, h_z , i vodene pare, h_p , u kJ, a svodi se na 1 kg suhog zraka. Njena skala obično započne kod 0 °C i $x = 0$. Ona zato može kod proračuna poprimiti i negativne vrijednosti.

$$h_s = h_z + h_p \times x \quad (2.20)$$

x je sadržaj vlage u zraku u kilogramima po kilogramu suhog zraka, jednak odnosu mase vodene pare u zraku, m_w , u kg, prema masi suhog zraka, m_z , u kg, dakle $x = m_w/m_z$ u kg/kg.

Specifična entalpija suhog zraka je:

$$h_z = c_{pm} \times \theta \quad (2.21)$$

gdje je:

c_{pm} srednji specifični toplinski kapacitet suhog zraka kod konstantnog tlaka, koji je za raspon temperatura zraka od -50°C do $+50^\circ\text{C}$ približno konstantan i iznosi $1,01 \text{ kJ}/(\text{kg}\times^\circ\text{C})$.

Uvrštavanjem navedene vrijednosti za c_{pm} dobije se izraz za entalpiju suhog zraka

$$h_z = 1,01 \times \theta \quad (2.22)$$

gdje je θ temperatura zraka u $^\circ\text{C}$.

Specifična entalpija vodene pare dana je izrazom

$$h_p = r + c_{pw} \times \theta \quad (2.23)$$

gdje je

r specifična toplina isparavanja vode. Kod temperature vode 0°C specifična toplina isparavanja vode je $r = 2501 \text{ kJ/kg}$

c_{pw} specifični toplinski kapacitet vodene pare kod konstantnog tlaka ($c_{pw} = 1,86 \text{ kJ/kg}\times^\circ\text{C}$ za raspon temperatura zraka od -50°C do $+50^\circ\text{C}$)

Uvrštavanjem navedenih vrijednosti dobije se izraz za entalpiju vodene pare u zraku

$$h_p = 2501 + 1,86 \times \theta \quad (2.24)$$

Uvrštavanjem izraza (2.22) i (2.24) u izraz (2.20) dobije se izraz za specifičnu entalpiju vlažnog zraka, u $\text{kJ}/(\text{kg suhog zraka})$, u obliku:

$$h_s = 1,01 \times \theta + (2501 + 1,86 \times \theta) \times x \quad (2.25)$$

gdje je:

θ temperatura zraka, u $^\circ\text{C}$,

x sadržaj vlage u zraku u kilogramima vlage po kilogramu suhog zraka, kg/kg.

2.9 Načini prijenosa topline

2.9.1 Uvod

Toplina se između materijalnih tijela izmjenjuje ili neposrednim dodiranjem tijela ili zračenjem. Prijenos topline je prirodni proces do kojeg dolazi čim postoji razlika temperatura u nekom sustavu ili između dva sustava (tijela), bez obzira na prirodu sredine (tvar ili vakuum) koja ih odjeljuje. Kod toga se prijenos topline vrši u pravcu niže temperature. Proces prijenosa topline prestaje kad se izjednače temperature u svim točkama promatranog tijela / sustava.

Toplina se može prenijeti na tri fizikalno različita načina. To su vođenje ili kondukcija, strujanje ili konvekcija i zračenje ili radijacija.

Vođenjem se toplina prenosi u čvrstim, tekućim i plinovitim tvarima. Prijenos topline konvekcijom moguć je samo u tekućinama i plinovima (fluidima). Zračenjem se toplina prenosi u plinovima i u vakuumu.

Općenito se navedena tri načina prijenosa topline odvijaju istovremeno. Samo vođenje topline događa se jedino u čvrstim tijelima, a i to ne uvijek. U porama šupljikavih materijala koje su ispunjene zrakom toplina se prenosi zračenjem i strujanjem. Nemoguće je međusobno odvojiti ta tri načina prijenosa topline, već se radi jednostavnosti prijenos topline

kroz ovakve porozne materijale izjednači sa čistim vođenjem. Karakteristike materijala u pogledu vođenja topline određuju se eksperimentalno i one uključuju u sebi sve mehanizme prijenosa topline u tom materijalu.

2.9.2 Prijenos topline vođenjem (kondukcijom)

Do prijenosa topline vođenjem dolazi uslijed prirodne težnje za homogenom razdiobom srednje brzine molekula, a time i temperature u svim dijelovima promatranog tijela (sustava). „Brže“ molekule toplijeg dijela tijela sudaraju se sa „sporijim“ molekulama hladnijeg dijela tijela. Kod toga se prve molekule „usporavaju“, a druge „ubrzavaju“, tako da se srednje brzine molekula u čitavom tijelu postupno izjednačavaju. Ovakav intermolekularni način prijenosa topline nazivamo **vođenje topline**. Kod vođenja topline ne dolazi, dakle, do prijenosa tvari već samo do prijenosa energije udarima bržih molekula toplijeg dijela tijela. Osim opisanim mehanizmom dio topline se prenosi i slobodnim elektronima (koji prenose i električnu energiju). Zato nije slučajno da su materijali koji najbolje provode električnu energiju ujedno i dobri vodiči topline.

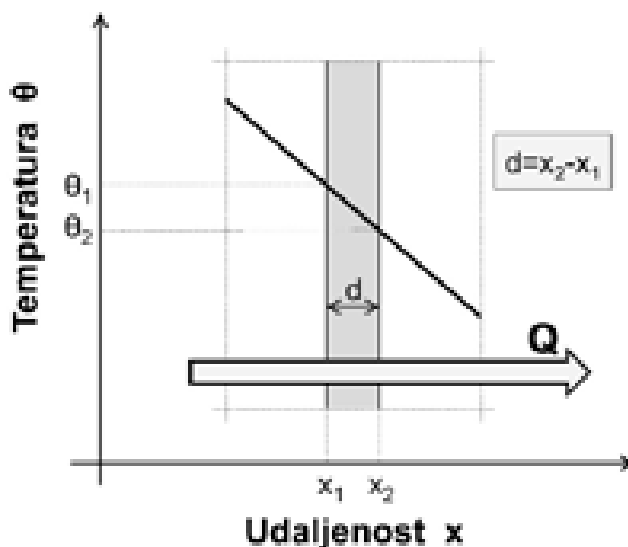
Vođenje topline je, dakle, prienos topline unutar čvrste, tekuće ili plinovite tvari s mjesta više temperature prema mjestu niže temperature, izravnim međusobnim djelovanjem molekula.

Unutar nekog tijela od homogenog (znači da ima jednaku gustoću i druga svojstva na svim mjestima) i izotropnog (znači da ima jednaka svojstva u svim smjerovima) materijala zamislimo tanku ploču debljine d omeđenu paralelnim ravninama kojima je stalna temperatura tijela θ_1 i θ_2 pri čemu je $\theta_1 > \theta_2$ (slika 2.3) [20]. Na temelju mnogobrojnih pokusa Fourier je postavio osnovni zakon vođenja topline koji se za slučaj slike 2.3 može napisati u obliku:

$$Q = \frac{-\lambda \times A \times t \times (\theta_2 - \theta_1)}{d} \quad (2.26)$$

gdje je:

- Q toplina koja u vremenu t prođe kroz plohu ploštine A okomitu na smjer vođenja topline,
- A ploština plohe kroz koju prolazi toplina Q ,
- t vrijeme prolaženje topline Q kroz plohu ploštine A ,
- d debljina promatrane ploče materijala,
- λ koeficijent proporcionalnosti koji nazivamo koeficijent toplinske vodljivosti, odnosno **toplinska vodljivost** materijala.



Slika 2.3 Shematski prikaz vođenja topline kroz ravnu ploču od homogenog izotropnog materijala

Omjer topline (energije), i vremena nazivamo **toplinski tok**, $\Phi = Q/t$. Omjer toplinskog toka, Φ , i ploštine, A , okomite plohe kroz koju prolazi topline nazivamo **gustoća toplinskog toka**, $q = \Phi/A$. S tim izmjenama jednačba (2.26) poprima oblik:

$$q = \frac{-\lambda \times (\theta_2 - \theta_1)}{d} \quad (2.27)$$

Jednačba (2.27) predstavlja slučaj jednodimenzijuskog stacionarnog vođenja topline kada nema izvora ni ponora topline unutar tijela koje provodi toplinu.

U jednačbi (2.27) temperature θ uvrštavaju se u kelvinima (K) ili u Celzijevim stupnjevima ($^{\circ}\text{C}$), debljina d u metrima (m), toplinska vodljivost λ u vatima po metru i kelvinu ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), a gustoća toplinskog toka q se dobije u vatima po kvadratnom metru (W/m^2).

Zbog jednostavnosti obično se u jednačbi (2.27) izostavlja predznak minus, a za razliku temperatura se uvrštava njihova apsolutna vrijednost. U tom slučaju jednačba (2.27) dobiva oblik:

$$q = \frac{\Delta\theta}{R} \quad (2.28)$$

gdje je

$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$ razlika temperatura, u $^{\circ}\text{C}$,

$R = d/\lambda$ toplinski otpor promatrane ploče materijala debljine d , u $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$.

Ako se jednačba (2.27) primjeni na elementarni paralelopiped $dx dy dz$ izvađen iz homogenog izotropnog materijalnog tijela, dobiti će se opći trodimenzijski oblik Fourierovog zakona vođenja topline:

$$q = -\lambda \text{ grad } \theta \quad (2.29)$$

U ovoj jednačbi, gustoća toplinskog toka, $\mathbf{q}$, i gradijent temperature, **grad θ** , su vektori, a toplinska vodljivost, λ , i temperatura, θ , su skalari.

Vektor **grad θ** karakterizira jakost promjene temperaturnog polja. Trodimenzijskim ili prostornim **temperaturnim poljem** nazivamo skup vrijednosti temperature u svakoj točki promatranog tijela. Ako se temperaturno polje ne mijenja tijekom vremena nazivamo ga stacionarnim i opisujemo funkcijom $\theta = \theta(x,y,z)$. Temperaturno polje u kojem se temperatura mijenja samo u pravcu osi X i Y , a u pravcu osi Z ostaje konstantna, nazivamo dvodimenzijuskim ili ravninskim temperaturnim poljem. Temperaturno polje grafički se prikazuje pomoću izotermnih ploha (za prostorno temperaturno polje) ili izotermnih krivulja (za ravninsko temperaturno polje) koje povezuju točke tijela s jednakom temperaturom. To znači da se za svaku vrijednost θ_n iz područja vrijednosti θ dobije odgovarajuća izotermna ploha odnosno krivulja, koja spaja sve one i samo one točke (x,y,z) za koje je $\theta(x,y,z) = \theta_n$, pa je to ujedno jednačba te plohe, odnosno krivulje u slučaju dvodimenzijuskog polja.

Vektor **grad θ** okomit je na izotermnu plohu (krivulju), ima smjer u stranu povećanja temperature, a iznos mu je jednak parcijalnoj derivaciji temperature u smjeru normale. U pravokutnom koordinatnom sustavu gradijent temperature je dan izrazom

$$\text{grad } \theta = \frac{\partial\theta}{\partial x} \times \mathbf{i} + \frac{\partial\theta}{\partial y} \times \mathbf{j} + \frac{\partial\theta}{\partial z} \times \mathbf{k} \quad (2.30)$$

gdje su $\mathbf{i}$, $\mathbf{j}$, $\mathbf{k}$ jedinični vektori u smjeru osi X,Y,Z .

Vektor gustoće toplinskog toka, $\mathbf{q}$, iz jednačbe (2.29) također leži na pravcu normale na izoterme, ali je orijentiran u smjeru sniženja temperature. Naime, ako je u nekoj točki tijela (x,y,z) , temperatura $\theta(x,y,z)$, onda najveći toplinski tok ide od te točke u onom smjeru u kojem se temperatura najbrže smanjuje. To je upravo smjer suprotan smjeru najbržeg rasta temperature, odnosno suprotan smjeru gradijenta temperature. Zato je u jednačbama (2.26), (2.27) i (2.29) predznak minus. Iznos (modul ili apsolutna vrijednost) vektora gustoće toplinskog toka jednak je količini topline koja u jedinici vremena prolazi kroz izotermnu plohu jedinične ploštine.

Toplinska vodljivost λ je toplinska karakteristika materijala. Njena vrijednost se mijenja s promjenom temperature materijala. U građevinskoj fizici ta ovisnost se može zanemariti pa se može računati sa srednjom vrijednosti u određenom temperaturnom intervalu. Obično se računa s vrijednošću λ za temperaturu materijala $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Dobri vodiči topline (loši toplinski izolatori) su, primjerice, metali i građevni materijali velike gustoće. Loši vodiči topline (dobri toplinski izolatori) su, primjerice, toplinsko-izolacijski materijali (male gustoće) na bazi mineralne vune, pjenaste plastike, drvene vune, pluta,...

Vrijednost toplinske vodljivosti λ pojedinih materijala može se odrediti samo mjerenjem. Za toplinske proračune u građevinskoj fizici ne koriste se vrijednosti λ neposredno dobivene mjerenjem već tzv. projektne vrijednosti koje ovise o mjestu i uvjetima primjene dotičnog materijala, a određuju se posebnim postupkom (vidjeti točku 3.10).

Jednadžbe (2.29) opisuju temperaturno polje tijekom vođenja topline kroz materijalno čvrsto tijelo. Za potpuni opis toplinskog ponašanja nekog čvrstog tijela važan je i zakon o održanju energije koji za elementarni paralelopiped bez izvora i ponora topline ima matematički oblik [21]:

$$c \times \rho \times \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right) = \text{div } q \quad (2.31)$$

div je oznaka za divergenciju. To je operator koji mjeri promjenu vektorskog polja (prostor u kojem je za svaku točku vezan neki vektor). Pozitivna vrijednost divergencije gustoće toplinskog toka naznačava višak topline koja u jedinici vremena izlazi iz promatranog elementarnog paralelopipeda, u odnosu na toplinu koja u istom vremenu ulazi u taj paralelopiped, zbog čega se njegova temperatura smanjuje, pa je u tom slučaju promjena temperature s vremenom, $\partial \theta / \partial t$, negativna. U slučaju negativne divergencije (kada više topline ulazi u elementarni paralelopiped nego li iz njega izlazi), paralelopiped se zagrijava i $\partial \theta / \partial t$ će biti pozitivan.

Ako se Fourierov zakon vođenja topline (2.29) uvrsti u jednadžbu održanja energije (2.31), dobije se nestacionarna jednadžba vođenja topline u obliku:

$$c \times \rho \times \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right) = \text{div } (\lambda \text{ grad } \theta) \quad (2.32)$$

ili

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\lambda}{c \times \rho} \times \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) \quad (2.33)$$

Jednadžba (2.33) vrijedi za nestacionarno temperaturno polje tj. polje koje se mijenja tijekom vremena i opisuje funkcijom $\theta = \theta(x, y, z, t)$, gdje su x, y, z prostorne pravokutne koordinate, a t je vrijeme.

Diferencijalna jednadžba vođenja topline ima beskonačno mnogo rješenja. Da bi se jednoznačno opisao proces vođenja topline potrebno je odabrati jedinstveno rješenje. To se postiže zadavanjem početnog i rubnih (graničnih) uvjeta. Početni uvjet karakterizira temperaturno stanje tijela u određenom trenutku vremena $t = t_0$. Rubni ili granični uvjeti karakteriziraju procese između rubnih površina promatranog tijela i njegova okoliša. Rubni uvjeti, koje susrećemo u području zgradarstva, mogu biti:

- a) zadana konstantna temperatura rubnih površina tijela, $\theta_s = \theta_s(x_s, y_s, z_s, t)$, gdje indeks s označava točku na graničnoj plohi promatranog tijela,
- b) propisana gustoća toplinskog toka u svakom trenutku kroz graničnu plohu promatranog tijela, $q_s = q_s(x_s, y_s, z_s, t)$. Za slučaj da je $q_s = 0$, radi se o adijabatskom rubnom uvjetu,
- c) poznata je temperatura okoliša koji okružuje promatrano tijelo (prijelaz topline s promatranog tijela na njegov okoliš). U području graditeljstva ovaj se rubni uvjeti najčešće pojavljuju.

Rješenje jednadžbe vođenja topline (2.33) u njenom općem obliku moguće je samo u vrlo ograničenom broju slučajeva. Zato su u području građevinske fizike prihvaćena određena pojednostavnjenja koja daju još uvijek dovoljno točne rezultate, a bitno olakšavaju rješavanje jednadžbe. Učinjena pojednostavnjenja su slijedeća:

- prihvaćeno je da karakteristike građevnih materijala (λ , ρ , c) ne ovise o temperaturi, vlažnosti materijala i drugim veličinama stanja. To znači da se računa s konstantnim vrijednostima λ , ρ , c , ali se za proračun odabiru tzv. projektne vrijednosti tih veličina tj. njihove „uobičajene“ reprezentativne vrijednosti za očekivanu temperaturu, vlažnost itd. tijekom korištenja zgrade,
- svakoj prostoriji ili zoni zgrade dodjeli se jedinstvena temperatura zraka – srednja temperatura,
- umjesto složenog procesa prijenosa topline na graničnim površinama građevnog dijela zgrade prihvaća se Newtonov prikaz prijenosa topline tj. linearna ovisnost gustoće toplinskog toka i razlike temperature zraka θ i temperature na površini građevnog dijela zgrade, θ_s ,

$$q_s = \alpha \times (\theta_s - \theta) = \frac{\theta_s - \theta}{R_s}$$

α je koeficijent prijelaza topline koji općenito uključuje konvekciju i zračenje, a R_s je otpor prijelaza topline.

U slučaju stacionarnog prijenosa topline jednačba (2.32) se svodi na jednačbu:

$$\text{div} (\lambda \text{ grad } \theta) = 0 \quad (2.34)$$

ili

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = 0 \quad (2.35)$$

Ako je prijenos topline jednodimenzijski tj. samo u smjeru x , jednačba (2.35) svodi se na

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = 0 \quad (2.36)$$

Dvostrukom integracijom dobije se:

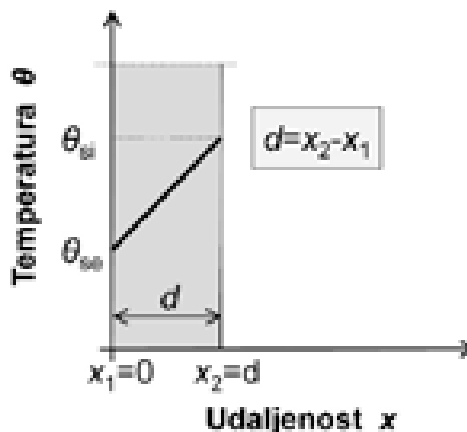
$$\theta(x) = C_1 \times x + C_2 \quad (2.37)$$

Za rubne uvjete (vidjeti sliku 2.4):

$$\begin{aligned} \theta(x=0) &= \theta_{se} \\ \theta(x=d) &= \theta_{si} \end{aligned} \quad (2.38)$$

iz jednačbe (2.37) slijedi vrijednost konstanti integracije C_1 i C_2 :

$$\begin{aligned} C_2 &= \theta_{se} \\ C_1 &= \frac{(\theta_{si} - \theta_{se})}{d} \end{aligned} \quad (2.39)$$



Slika 2.4 Rubni uvjeti: poznate temperature graničnih površina građevnog dijela

Uvrštavanjem vrijednosti konstanti C_1 i C_2 u izraz (2.37), jednadžba temperaturnog polja $\theta(x)$ dobiva oblik:

$$\theta(x) = \frac{x \times (\theta_{si} - \theta_{se})}{d} + \theta_{se} \quad (2.40)$$

Duž presjeka građevnog dijela od homogenog materijala temperatura se mijenja linearno.

Toplinski tok, Φ_x , kroz promatrani građevni dio dobije se pomoću Fourierovog zakona vođenja topline:

$$\phi_x = q_x \times A = -\lambda \times \left(\frac{d\theta}{dx} \right) \times A \quad (2.41)$$

Derivacijom izraza (2.40) dobije se ranije navedeni izraz za toplinski tok:

$$\phi_x = \frac{-\lambda \times A \times (\theta_{si} - \theta_{se})}{d} \quad (2.42)$$

2.9.3 Prijenos topline konvekcijom (strujanjem)

Prijenos topline konvekcijom označava

- prijenos topline unutar nekog fluida (tekućine ili plina),
- izmjenu topline između površine čvrstog tijela i fluida u gibanju koji je u dodiru s tom površinom.

Konvekcija je prijenos topline strujanjem fluida s jednog mjesta na drugo mjesto. Takav način prijenosa topline moguć je stoga samo kod plinovitih i tekućih tvari (fluida).

Kod konvekcije toplina prelazi, kao i uvijek, iz toplijih područja prema hladnijim područjima. Takav prijenos topline nastaje, primjerice, u posudi s vodom postavljenoj na uključenu ploču električnog štednjaka. Toplija voda s dna posude, zbog manje gustoće, diže se prema gore, a hladnija voda veće gustoće se spušta prema dolje.

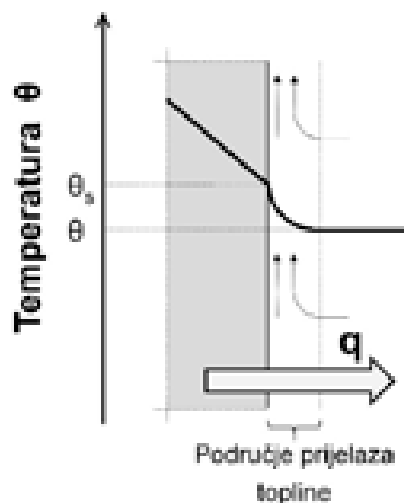
Konvekcijom toplina prelazi s nekog fluida u gibanju na neko čvrsto tijelo ili obrnuto, s čvrstog tijela na fluid [22]. Kada, primjerice, molekule hladnog zraka dođu u dodir s toplom površinom zida dio energije oscilacija molekula na površini zida prenosi se na susjedne molekule zraka s kojima je zid u dodiru. Zrak se zagrijava, širi se, njegova gustoća se smanjuje i diže se prema gore. Nove hladnije molekule zraka zamjenjuju kontinuirano uzlazne zagrijane molekule. Zbog toga se zrak uz površinu zida stalno kreće tj. struji prema gore. Ako je to gibanje izazvano samo opisanom izmjenom topline nazivamo ga **prirodna ili slobodna konvekcija**.

Konvektivno strujanje može biti i obrnuto. Kada topli zrak dođe u dodir s hladnom površinom zida, njegove molekule koje su toplije predaju dio svoje energije osciliranja molekulama na površini zida i time se ohlađuju. Zbog ohlađivanja gustoća zraka postaju veća i molekule zraka struje prema dolje uz površinu zida, a na njihovo mjesto dolaze toplije molekule zraka iz prostora.

Opisani prijenos topline postaje značajniji kad se narinutom razlikom tlaka (npr. ventilatorom) ubrza strujanje zraka uz površinu zida. Tu pojavu nazivamo **prisilna konvekcija**.

Prema uzroku gibanja fluida razlikujemo, dakle, prirodnu ili slobodnu konvekciju i prisilnu konvekciju. Kod prirodne konvekcije čestice fluida se gibaju zbog razlika u gustoći nastalih nejednolikom temperaturom dijelova fluida. Prisilna konvekcija nastaje kada se gibanje fluida podržava nekim mehaničkim uređajem (pumpa, ventilator).

Primjer prijenosa topline konvekcijom prikazan je na slici 2.5.



Slika 2.5 Primjer prijenosa topline konvekcijom

Kada je površina čvrstog tijela temperature θ_s okružena zrakom temperature θ (podalje od površine čvrstog tijela) i ako je $\theta_s > \theta$, gustoća toplinskog toka, q , u W/m^2 , koja se prenosi konvekcijom s čvrstog tijela na zrak može se proračunati pomoću Newtonova zakona:

$$q = h_c \times (\theta_s - \theta) \quad (2.43)$$

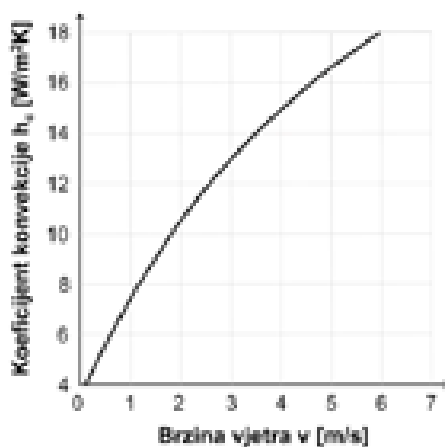
gdje je:

θ_s temperatura površine čvrstog tijela, u $^{\circ}\text{C}$,

θ temperatura zraka podalje od površine čvrstog tijela, u $^{\circ}\text{C}$,

h_c koeficijent konvektivnog prijelaza topline, a znači gustoću toplinskog toka koju površina čvrstog tijela preda ili primi konvekcijom kad je između te površine i okolnog zraka jedinična razlika temperatura. Mjerna jedinica SI sustava za koeficijent konvektivnog prijelaza topline je vat po kvadratnom metru i kelvinu, oznaka $\text{W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$. Njegova vrijednost utvrđuje se mjerenjem, a ovisna je o brzini vjetra uz promatranu površinu (za vanjske građevne dijelove zgrade), o orijentaciji površine (horizontalna ili vertikalna) i o smjeru toplinskog toka (horizontalan, vertikalni prema gore ili vertikalni prema dolje).

Ovisnost koeficijenta konvektivnog prijelaza topline o brzini vjetra prikazana je na slici 2.6.



Slika 2.6 Ovisnost koeficijenta konvektivnog prijelaza topline h_c o brzini vjetra, za vertikalnu plohu

Kod vertikalnih ploha smjer toplinskog toka ne utječe na vrijednost koeficijenta konvektivnog prijelaza topline, ali kod horizontalnih ploha može biti od bitnog utjecaja. U slučaju prirodne

konvekcije, za toplinski tok usmjeren prema dolje vrijednost koeficijenta h_c je mnogo manja nego za toplinski tok usmjeren prema gore.

Slučaj toplinskog toka u smjeru prema dolje susreće se u zgradama kod stropova iznad negrijanog podruma ili iznad vanjskog zraka. Temperatura površine poda manja je, u ovom slučaju, od temperature zraka u prostoriji. Zato se zrak u dodiru s podom rashlađuje, a time raste njegova gustoća i on ostaje uz pod. Prijenos topline konvekcijom sa zraka na površinu poda se, dakle, smanjuje.

Slučaj toplinskog toka u smjeru prema gore javlja se npr. kod podova s ugrađenim grijanjem. Hladniji zrak uz površinu toplijeg poda se zagrijava, pri čemu se smanjuje njegova gustoća i on se diže uvis, tako da koeficijent konvektivnog prijelaza topline postaje veći u odnosu na prethodni slučaj.

2.9.4 Prijenos topline zračenjem (radijacijom)

2.9.4.1 Općenito

Svako tijelo temperature veće od apsolutne nule (0 K), dio kinetičke energije svojih molekula odaje u obliku energije elektromagnetskih valova koje emitira sa svoje površine u okoliš. I obratno, kada elektromagnetskih valovi dopiju do površine nekog tijela, jedan dio njihove energije tijelo upije i pretvori ga u kinetičku energiju svojih molekula što se očituje kao porast temperature tijela. Emitiranjem i upijanjem elektromagnetskih valova prenosi se dakle topline. Toplina se prenosi u obliku elektromagnetskih valova bez sudjelovanja tvari.

Elektromagnetskim valovima nije, dakle, potrebna tvar da bi se mogli širiti prostorom. Prijenos energije omogućen je titranjima električnog i magnetskog polja. Elektromagnetski val je zapravo poseban oblik vremenski promjenjivog elektromagnetskog polja koje se u vakuumu širi brzinom oko 3×10^8 m/s (brzina svjetlosti), najvećom brzinom u prirodi.

Uobičajena razredba elektromagnetskih valova je prema njihovim duljinama vala. Valna duljina se može opisati na dva načina: kao udaljenost koju val prijeđe u vremenu jednog punog titraja izvora ili kao najkraća udaljenost između dvije točke koje titraju jednakim fazama.

Ukupni raspon mogućih valnih duljina elektromagnetskog zračenja naziva se spektar. Prema valnoj duljini spektar elektromagnetskog zračenja podijeljen je na nekoliko područja: od gama-zračenja vrlo kratkih valnih duljina i velike energije do radiovalova valnih duljina i preko 1 000 m.

Spektar elektromagnetskih valova predstavlja, dakle, raspodjelu elektromagnetskog zračenja prema valnim duljinama. Područja u tom spektru nisu uvijek oštro međusobno odijeljena već postoje preklapanja. U pojedinim intervalima duljine vala, elektromagnetska zračenja su dobila posebne nazive, što je vidljivo u tablici 2.3. U tablici 2.3 prikazana je uobičajena podjela elektromagnetskih valova.

Tablica 2.3 Uobičajena podjela spektra elektromagnetskog zračenja [17]

Oznaka	Naziv zračenja	Duljina vala u μm
G	gama zračenje (γ -zrake)	100×10^{-9} do 10×10^{-6}
X	rendgensko zračenje (x-zrake)	10×10^{-6} do 10×10^{-3}
UV	ultraljubičasto zračenje	10×10^{-3} do 0,380
S	svjetlosno zračenje (vidljivi dio spektra – od najmanje duljine vala do najveće: ljubičasta, plava, zelena, žuta, narančasta, crvena)	0,380 do 0,780

IC (IR)	infracrveno zračenje	0,780 do 100
M	mikrovalno zračenje	100 do 10^3
R	radiovalovi	10^3 do 20×10^9

Općenito vrijedi da je valna duljina elektromagnetskog vala povezana s jakošću izvora. Što je valna duljina manja, elektromagnetskim valom prenosi se više energije.

Putujući kroz prostor svi elektromagnetski valovi ponašaju se slično neovisno o valnoj duljini. Razlika u ponašanju, ovisna o valnoj duljini, očituje se tek kad elektromagnetski val padne na površinu nekog tijela.

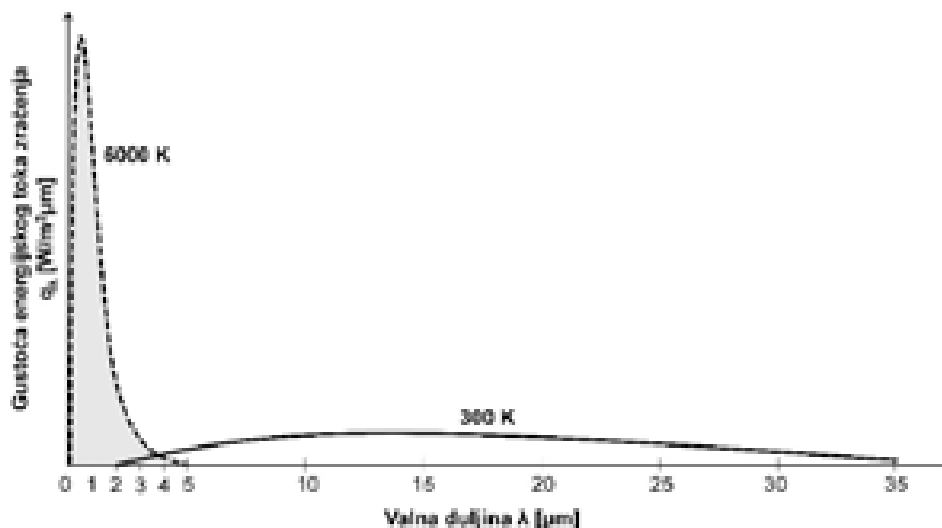
Između frekvencije zračenja, f , (broj oscilacija u sekundi) i njegove duljine vala, λ , postoji za svaki elektromagnetski val odnos:

$$\lambda \times f = c_0 \quad (2.44)$$

gdje je $c_0 \approx 3 \times 10^8$ m/s brzina širenja elektromagnetskih valova u vakuumu (brzina svjetlosti).

Za opis prijenosa topline zračenjem u zgradarstvu se promatraju dva osnovna tipa zračenja: Sunčevo zračenje ili zračenje na vrlo visokim temperaturama (površinska temperatura Sunca oko 6 000 K) i infracrveno zračenje tijela uobičajenih temperatura (površinska temperatura tijela do oko 300 K). Za Sunčevo zračenje (zračenje na visokim temperaturama) najveći dio zračenja događa se u području vidljivog spektra i bliskog infracrvenog (1 % UV, 53 % vidljivog, 46 % IC), a za zračenje tijela uobičajenih temperatura spektar zračenja se nalazi jedino u području infracrvenog zračenja. Za Sunčevo zračenje kaže se, pojednostavljeno, da je kratkovalno (kratkih duljina vala), a za zračenje tijela uobičajenih temperatura da je dugovalno (velikih duljina vala). Zgrade te tijela i osobe u njihovoj okolini neprekidno emitiraju infracrveno zračenje.

Spektri emisije elektromagnetskog zračenja čvrstih tijela su kontinuirani. Sastoje se od svih valnih duljina u intervalu od neke najmanje pa do najveće duljine vala.



Slika 2.7 Ovisnost gustoće energijskog toka zračenja o valnoj duljini za Sunčevo zračenje i zračenje crnog tijela (vidjeti točku 2.9.4.2) na uobičajenim temperaturama (tipični spektri)

Na visokim temperaturama iznad oko 800 K tijela svijetle. Iz tablice 2.3 proizlazi da vidljivo zračenje koje zapaža ljudsko oko obuhvaća interval zračenja između $\lambda = 380$ nm i $\lambda = 780$ nm. O valnoj duljini zračenja unutar ovog područja ovisi boja svjetla.

Na uobičajenim temperaturama (do oko 300 K) tijela emitiraju samo infracrveno zračenje (valne duljine između 0,75 μm i 100 μm), ali mogu primati jednako dobro Sunčevo zračenje (UV, vidljivo, IC) kao i IC zračenje emitirano od drugih tijela koja okružuju promatrano tijelo.

Tako, primjerice, plamen vatre odašilja, između ostalog, svjetlosne zrake – vidljivo zračenje. Kad se plamen vatre ugasi, ostane samo žeravica koja je u početku crvena, s vremenom tamni i konačno sasvim izgubi crvenu boju. Takva žeravica više ne emitira svjetlost, ali zrači toplinu u obliku infracrvenog zračenja.

Infracrveno zračenje, vidljivo zračenje i ultraljubičasto zračenje sudjeluju u izmjeni toplinske energije zračenjem. Naime, kad neko tijelo apsorbira to zračenje ono se zagrije. Kod zračila korištenih u praksi (npr. ogrjevnih tijela, sijalica sa žarnom niti, općenito užarenih tijela), udio infracrvenog zračenja je prevladavajući.

2.9.4.2 Ponašanje prijemnika zračenja

Ako se dozračena snaga u vatima podjeli s ploštinom ozračene površine u kvadratnim metrima dobije se vrijednost fizikalne veličine koju nazivamo **ozračenost**, oznaka G , u W/m^2 . Ozračenost karakterizira pojave na ozračenoj plohi.

Kada toplinsko zračenje doprije do površine nekog tijela, tijelo može zračenje **reflektirati** (odbaciti natrag) i / ili **apsorbirati** (upiti) i / ili, kod za zračenje propusnih tvari, **transmitirati** (propustiti) [23].

U skladu s tim definira se za ozračenu plohu:

- sposobnost refleksije ili faktor refleksije ρ :

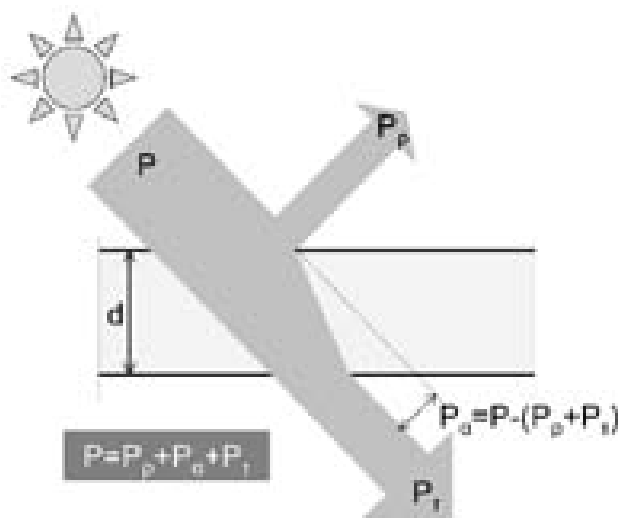
$$\rho = \frac{P_{\rho} \text{ (reflektirana snaga)}}{P \text{ (dozračena snaga)}}$$

- sposobnost apsorpcije ili faktor apsorpcije α :

$$\alpha = \frac{P_{\alpha} \text{ (apsorbirana snaga)}}{P \text{ (dozračena snaga)}}$$

- sposobnost propusnosti ili faktor propusnosti (transmisije) τ :

$$\tau = \frac{P_{\tau} \text{ (propuštena snaga)}}{P \text{ (dozračena snaga)}}$$



Slika 2.8 Razdioba snage dozračene na prozirnu površinu

ρ , α i τ često se navode u %. Njihove vrijednosti ovise, u najvećim dijelom, o svojstvima površine te o valnoj duljini upadnog zračenja. Za dano tijelo i određenu valnu duljinu, između gornje tri veličine, postoji odnos:

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (2.45)$$

Što je τ veći tijelo je transparentnije. Za tijela koja nisu prozirna faktor propusnosti τ je jednak nuli. Ako je ρ velik, tijelo dobro reflektira zračenje. Velik α znači da tijelo dobro apsorbira upadno zračenje. Općenito, neprozirna tijela apsorbiraju zračenje na svojoj površini.

Relacija (2.45) vrijedi neovisno o složenosti zračenja tj. da li zračenje sadrži veći ili manji interval duljina vala ili samo jednu duljinu vala λ . Može se dakle definirati ρ_λ , α_λ i τ_λ , ili ρ_s , α_s i τ_s itd. Indeks λ odnosi se na samo jednu duljinu vala, a indeks s na sve duljine vala Sunčeva zračenja.

Idealnim crnim tijelom (ili **crnim zračilom**) nazivamo tijelo koje apsorbira ukupno upadno zračenje za sve valne duljine ($\alpha = 1$). Prema jednadžbi (2.45) tada moraju ρ i τ biti jednaki nuli tj. nema reflektiranog niti propuštenog zračenja. U prirodi nema idealnog crnog tijela. Dobra aproksimacija crnog tijela je šupljina s malim otvorom. Otvor se naime ponaša kao crno tijelo jer gotovo sve upadno zračenje koje kroz otvor uđe u šupljinu potpuno se apsorbira unutar šupljine.

Tijelo koje potpuno apsorbira elektromagnetske valove određenih valnih duljina je crno tijelo za to područje spektra. Za tijelo koje potpuno reflektira zračenje u određenom intervalu valnih duljina kažemo da je **bijelo** u tom području spektra. Tijelo koje djelomično ali podjednako reflektira elektromagnetno zračenje svih valnih duljina nazivamo **sivo tijelo**.

Sva tijela ne ponašaju se jednako na Sunčevo i infracrveno zračenje. Za područje zgradarstva važno je razlikovati faktor apsorpcije infracrvenog zračenja, α_{IR} , od faktora apsorpcije Sunčeva zračenja, α_s .

Za tijela koja se različito ponašaju na ova dva tipa zračenja kaže se da su **selektivna**. U Tablici 2.4 dani su podaci o faktorima apsorpcije i refleksije nekih materijala ili boja.

Tablica 2.4 Približne vrijednosti faktora apsorpcije i refleksije nekih građevnih materijala ili boja [24]

Materijal ili boja	Sunčevo zračenje		Infracrveno zračenje	
	α_s	$\rho_s = 1 - \alpha_s$	$\alpha_{IR} = \epsilon_{IR}$	$\rho_{IR} = 1 - \alpha_{IR}$
Aluminij, sjajan	0,05	0,95	0,05	0,95
Aluminij, oksidirani	0,15	0,85	0,12	0,88
Betoni	0,80 do 0,90	0,10 do 0,20	0,90	0,10
Opeka, crvene boje	0,55	0,45	0,93	0,07
Vapnena žbuka, nova	0,12	0,88	0,90	0,10
Bijela uljna boja	0,20	0,80	0,90	0,10
Svijetlo siva uljna boja	0,40	0,60	0,90	0,10
Svijetlo zelena uljna boja	0,40	0,60	0,90	0,10
Crna uljna boja	0,85	0,15	0,90	0,10

Iz tablice 2.4 je vidljivo da se uljne boje ponašaju praktički jednako za dugovalno zračenje dok im je ponašanje promjenjivo za Sunčevo zračenje.

Apsorpcija realnih tijela općenito se mijenja s duljinom vala zračenja. Bijela površina reflektira veći dio Sunčeva zračenja, ali apsorbira gotovo u potpunosti zračenje nekog ogrjevnog tijela (infracrveno zračenje). Naprotiv crna površina apsorbira ta oba tipa zračenja: Sunčevo i infracrveno.

Ako se Suncu izlože dvije ploče, jedna oličena crnom a druga bijelom bojom, crna ploča apsorbirati će Sunčevo zračenje i njena temperatura će jako porasti. Bijela ploča reflektirati će veći dio Sunčeva zračenja i njena temperatura će porasti znatno manje. Ako se pak te dvije ploče izlože infracrvenom zračenju nekog ogrjevnog tijela, npr. radijatora (a bez direktnog utjecaja Sunca), obje ploče će se ugrijati na gotovo jednaku temperaturu (pod uvjetom da je boja jednakog sastava).

Ploča od poliranog aluminijskog izložena Sunčevu zračenju ili zračenju toplog radijatora zagrijati će se manje od prethodno spomenutih ploča, jer polirane metalne površine reflektiraju veći dio Sunčeva zračenja i infracrvenog zračenja.

Zgrada prima Sunčevo zračenje u razdoblju osunčanja, i neprekidno infracrveno zračenje iz svoje okolice.

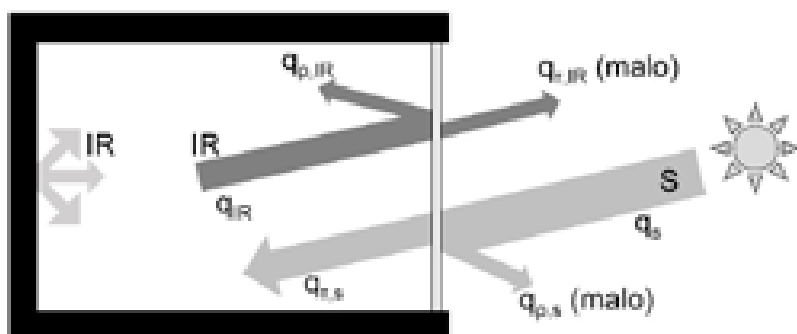
Većina građevnih materijala (s izuzetkom metala, stakla i sl.) ponaša se gotovo kao „crno“ tijelo u odnosu na infracrvena zračenja, i apsorbiraju skoro cijelo toplinsko zračenje koje do njih dopiše, bez obzira na boju njihove površine. Općenito, samo sjajne fino polirane površine, kao primjerice sjajna aluminijska folija, reflektiraju veliki postotak infracrvenog zračenja koje na njih padne.

Transparentni materijali koji propuštaju vidljivo Sunčevo zračenje ne propuštaju nužno infracrveno zračenje. Silicijsko staklo i polikarbonat su materijali koji su propusni za Sunčevo zračenje (male duljine vala) i gotovo nepropusni za infracrveno zračenje (velike duljine vala). Staklo, koje propušta praktički ukupno Sunčevo zračenje koje na njega padne, apsorbira naprotiv skoro čitavo infracrveno zračenje koje do njega dopiše.

Veličine koje karakteriziraju ponašanje prozirnih materijala na zračenje imaju slijedeća obilježja:

α_{IR}	ϵ_{IR}	velika vrijednost,
τ_{IR}		vrlo mala vrijednost,
α_s		vrlo mala vrijednost,
τ_s		velika vrijednost.

Navedene karakteristike stakla koriste se za pasivno grijanje prostora Sunčevom energijom. Zatvoreni prostor kod kojeg su dijelovi ovojnice ostakljeni i izloženi Sunčevu zračenju, zbog gornjih karakteristika stakla primiti će kroz ostakljenje energiju Sunčeva zračenja. Te iste ostakljene površine spriječiti će prolaz infracrvenom zračenju emitiranom iz unutrašnjosti prostora. To znači da nema značajnijeg gubitka topline zračenjem prema van. Staklo će apsorbirati znatan dio infracrvenog zračenja za koje je neprozirno, zbog čega će malo porasti temperatura stakla. Samo staklo zračiti će sada infracrveno zračenje jednako dobro prema unutra kao i prema van. Međutim njegova temperatura emisije je vrlo niska pa će i time uzrokovani gubici topline biti mali. Zbog toga toplina ostaje „zarobljena“ u ostakljenom prostoru, dolazi do porasta temperature unutar prostora, što nazivamo **efekt staklenika** prema staklenicima u poljoprivredi kod kojih se koristi ova pojava za dobivanje toplije mikroklimu u prostoru staklenika.



Slika 2.9 Shematski prikaz efekta staklenika

2.9.4.3 Ponašanje zračila

Ako se ukupni energijski tok Φ što ga odzrači (emitira) površina nekog tijela ploštine A u čitav poluprstor podjeli s ploštinom A , dobije se **gustoća snage zračenja** ili **gustoća energijskog toka zračenja**, q , [17]:

$$q = \frac{\Phi}{A} \quad (2.46)$$

Jedinica SI za gustoću energijskog toka je vat po kvadratnom metru, oznaka W/m^2 . Gustoća energijskog toka zračenja karakterizira izvor zračenja.

Spektralna (monokromatska – zračenja samo pri određenoj duljini vala, λ) gustoća energijskog toka zračenja, q_λ , koju odašilje (emitira) crno tijelo temperature T , u intervalu valnih duljina između λ i $\lambda+d\lambda$, može se izračunati pomoću Planckove formule:

$$q_\lambda = \left(\frac{C_1}{\lambda^5} \right) \times \frac{1}{\left[\exp \left(\frac{C_2}{(\lambda \times T)} \right) - 1 \right]} \quad (2.47)$$

gdje je:

$C_1 = 2\pi \times h \times c^2$	prva konstanta zračenja,
$C_2 = c \times h / k$	druga konstanta zračenja,
$c_0 = 2,9979 \times 10^8$ m/s	brzina svjetlosti u vakuumu,
$h = 6,626 \times 10^{-34}$ J×s	Planckova konstanta,
$k = 1,381 \times 10^{-23}$ J/K	Boltzmanova konstanta.

S navedenim vrijednostima, konstante zračenja iznose:

$$C_1 = 3,742 \times 10^{-16} W \times m^2$$

$$C_2 = 1,439 \times 10^{-2} K \times m$$



Slika 2.10 Spektralna gustoća snage zračenja, q_λ , crnog tijela u ovisnosti o duljini vala zračenja, λ , i termodinamičkoj temperaturi, T , [25]

Na slici 2.10 prikazana je spektralna gustoća energijskog toka zračenja u ovisnosti o valnim duljinama za različite temperature crnog tijela, izračunata pomoću Planckove formule (2.47). Spektralna gustoća energijskog toka, q_λ , ovisna je o temperaturi. Najveća spektralna gustoća snage zračenje, s porastom temperature zračila, pomiče se ka manjim duljinama vala. Kod vrlo malih i vrlo velikih valnih duljina gustoća snage emitiranog zračenja, za određenu temperaturu crnog tijela, je bitno smanjena. Za određenu temperaturu leži najveća gustoća snage zračenja kod karakteristične duljine vala, $\lambda_{\max}$, a ona je utoliko kraća što je temperatura zračenja viša. Duljina vala, $\lambda_{\max}$, kod koje spektralna gustoća snage zračenja, q_λ , postiže svoju najveću vrijednost, ovisi o temperaturi crnog tijela, T , a može se odrediti iz Wienova zakona pomaka:

$$\lambda_{\max} \times T = \text{konst} \quad (2.48)$$

Za $\lambda_{\max}$ u μm i temperaturu T u K, Wienova konstanta iznosi $2898 \mu\text{m} \times \text{K}$.

Valne duljine zračenja razdjeljuju se prema Planckovom zakonu oko valne duljine $\lambda_{\max}$, tako da se glavnina emitiranog zračenja smješta između $\frac{1}{4} \lambda_{\max}$ i $4 \lambda_{\max}$.

Integrira li se spektralna gustoća snage zračenja crnog tijela u poluprstor preko svih valnih duljina, dobije se ukupna snaga koju odzrači jedinica ploštine površine zračila u poluprstor iznad te površine:

$$q_s = \int_0^\infty q_\lambda \times d\lambda \quad (2.49)$$

Gustoća ukupnog energijskog toka koju odašilje crno zračilo, q_s , može se izračunati pomoću Stefan-Boltzmanova zakona za ukupno zračenje:

$$q_s = \sigma \times T^4 \quad (2.50)$$

gdje je $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K}^4)$ Stefan – Boltzmannova konstanta. Indeks s , u ovim izrazima, označava da se radi o crnom tijelu.

Radi jednostavnijeg računanja u praksi se jednačba (2.50) primjenjuje često u obliku:

$$q_s = C_s \times (T/100)^4 \quad (2.51)$$

gdje je konstanta $C_s = \sigma \times 10^8 = 5,67 \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K}^4)$

Gustoća toplinskog toka emitiranog u obliku zračenja, dakle, znatno raste s povećanjem temperature tj. proporcionalna je četvrtoj potenciji termodinamičke temperature.

Primjer 2.4

Ako je temperatura na površini Sunca 5 800 K, potrebno je izračunati raspon valnih duljina Sunčeva zračenja i ukupno zračenje q_s .

Prema izrazu (2.48) proizlazi da je

$$\lambda_{\max} \times 5\,800 = 2\,898$$

$$\lambda_{\max} = 0,5\ \mu\text{m}$$

Glavnina Sunčeva zračenja leži u području valnih duljina između $\frac{1}{4} \lambda_{\max} = 0,13\ \mu\text{m}$ i $4 \lambda_{\max} = 2,0\ \mu\text{m}$.

Ukupno zračenje prema (2.50) iznosi

$$q_s = 5,67 \times 10^{-8} \times 5\,800^4$$

$$q_s = 64\ \text{MW/m}^2$$

Primjer 2.5

Ako je temperatura kože ljudskog tijela 35 °C, potrebno je izračunati raspon valnih duljina infracrvenog zračenja ljudskog tijela i ukupno zračenje q_s (kao da se radi o crnom tijelu).

Prema izrazu (2.48) proizlazi da je

$$\lambda_{\max} \times (35 + 273) = 2\,898$$

$$\lambda_{\max} = 9,4\ \mu\text{m}$$

Glavnina IC zračenja leži u području valnih duljina između $\frac{1}{4} \lambda_{\max} = 2,4\ \mu\text{m}$ i $4 \lambda_{\max} = 38\ \mu\text{m}$.

Ukupno zračenje ljudskog tijela prema (2.50) iznosi

$$q_s = 5,67 \times 10^{-8} \times 308^4$$

$$q_s = 510\ \text{W/m}^2$$

Primjer 2.6

Temperatura površine zidova i stropa iznosi 20 °C ili 293 K. Potrebno je izračunati raspon valnih duljina infracrvenog zračenja zidova i stropa i ukupno zračenje q_s (kao da se radi o crnom tijelu).

Prema izrazu (2.48) proizlazi da je

$$\lambda_{\max} \times 293 = 2\,898$$

$$\lambda_{\max} = 9,9\ \mu\text{m}$$

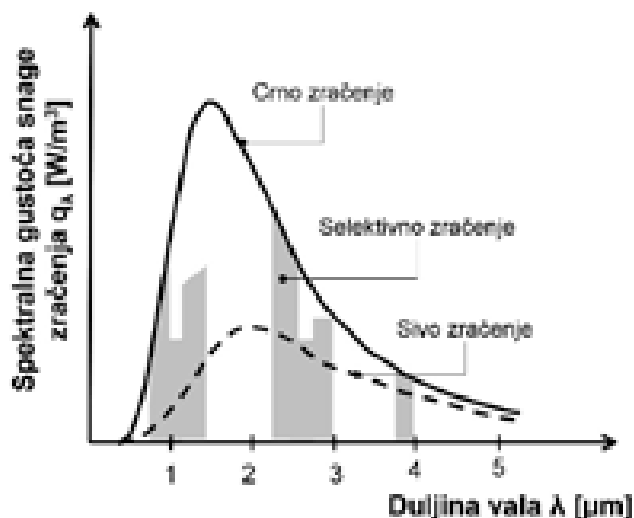
Glavnina IC zračenja leži u području valnih duljina između $\frac{1}{4} \lambda_{\max} = 2,5\ \mu\text{m}$ i $4 \lambda_{\max} = 40\ \mu\text{m}$.

Ukupno zračenje zidova i stropa prema (2.50) iznosi

$$q_s = 5,67 \times 10^{-8} \times 293^4$$

$$q_s = 418\ \text{W/m}^2$$

Planckova formula (2.47) daje najveću vrijednost gustoće energijskog toka zračenja, koja se postiže samo crnim zračilom. Kod realnih tijela odavanje zračenja je manje i razlikuje se prema vrsti između sivog i selektivnog zračenja. Ako je spektralna gustoća snage zračenja realnog tijela smanjena za konstantni faktor preko čitavog područja valnih duljina u odnosu na crno zračenje, to nazivamo sivo zračenje. „Sivo“ zračilo odzrači za jednaku temperaturu manji toplinski tok nego „crno“ zračilo. (vidjeti sliku 2.11). Pokazuje li zračenje međutim neravnomjernu razdiobu tj. razlikuje se u različitim dijelovima spektra, govorimo o selektivnom zračenju (vidjeti sliku 2.11). U mnogim tehničkim područjima može se s dovoljnom točnošću pretpostaviti da se radi o približno sivom zračenju u pojedinim spektrima valnih duljina.



Slika 2.11 Shematski prikaz spektralne gustoće snage zračenja

Odnos od površine realnog tijela emitirane gustoće snage zračenja q prema onoj crnog tijela q_s naziva se njegov **emisijski faktor** ili **emisivnost**, oznaka ϵ :

$$\epsilon = \frac{q}{q_s} \quad (2.52)$$

Ukupna gustoća snage zračenja q jednog takvog „sivog“ tijela u poluprstor je:

$$q = \epsilon \times \sigma \times T^4 \quad (2.53)$$

odnosno

$$q = \epsilon \times C_s \times (T/100)^4 \quad (2.54)$$

Emisivnost je svojstvo površine zračila. Ona nije čista karakteristika materijala, već ovisi o svojstvu površine (velikom dijelom da li je glatka ili mat). Emisivnost površine, ϵ , je za „crno“ tijelo jedan, a za „bijelo“ tijelo nula.

Faktor emisije, ϵ , je za zračilo karakteristična funkcija temperature. U području građevinarstva očekivane temperature zračenja u pravilu nisu više od 100 °C. U tablici 2.5 navedeni su faktori emisije nekih materijala za područje temperatura od 0 do 100 °C. Kod tako niskih temperatura zračenja može se provesti gruba podjela površina u dvije različite grupe. Razlikujemo između poliranih metalnih površina sa srednjim faktorom emisije ϵ od oko 0,05 i nemetalnih površina sa srednjim faktorom emisije ϵ od oko 0,9. Kod toga optička boja površine praktički ne igra nikakvu ulogu. Između stupnja emisije ϵ za dvije površine od kojih je jedna oličena s crnom a druga s bijelom uljenom bojom (jednagog sastava), jedva postoji neka razlika.

Svako temperaturno zračilo može preko svoje površine kako emitirati zračenje tako i apsorbirati ga. Prema Kirchoffovom zakonu, faktor emisije ϵ površine zračila kod svake temperature i za svaku duljinu vala jednak je faktoru apsorpcije α te površine:

$$\epsilon = \alpha \quad (2.55)$$

Tablica 2.5 Približne vrijednosti faktora emisije, ε , tehničkih površina temperature između 0 i 100 °C [25]

Površina	Faktor emisije, ε
Srebro, polirano	0,03
Bakar, polirani	0,04
Bakar, oksidirani - tamni	0,82
Staklo	0,88
Drvo	0,91
Beton, mort, žbuka	0,93
Opeka	0,93
Premaz bijelom uljenom bojom	0,89
Premaz crnom uljenom bojom, sjajno	0,90

Primjer 2.7

Emisivnost betona na uobičajenim temperaturama je oko $\varepsilon = 0,9$. Na temperaturi 20 °C ukupna emisija energije površine betona iznosi

$$q = 0,9 \times 5,67 \times 10^{-8} \times (273 + 20)^4$$

$$q = 376 \text{ W/m}^2$$

Intenzitet toplinskog zračenja nekog tijela ovisi, dakle, o temperaturi njegove površine koja zrači, ali i o emisivnosti te površine. Emisivnost nekog tijela mjeri se za njegovu sposobnost da emitira toplinsko zračenje. Većina građevnih materijala (izuzev metala, stakla i sl.) imaju emisivnost oko 0,9. To znači da oni zrače 90 % od najveće teoretske energije zračenja na danoj temperaturi. Sjajne polirane površine metala slabo emitiraju toplinsko zračenje. To znači da one na danoj temperaturi emitiraju (zrače) vrlo malo topline.

2.9.4.4 Prijenos (izmjena) topline zračenjem

Dosadašnji podaci odnosili su se na zračenje, odnosno upijanje dozračene topline, jedne jedine površine. U praksi postoji uvijek više tijela različitih temperatura, čije površine uzajamno izmjenjuju toplinu zračenjem. Kod toga, energiju zračenja emitiraju kako toplija tako i hladnija tijela.

Neovisno o svojoj temperaturi svako tijelo neprekinuto će zračiti energiju u svoj okoliš i isto tako preuzimati energiju koju zrače druga tijela iz njegova okoliša. Ukupna toplinska energija prenijeta zračenjem dobije se kao razlika između energije koju emitira površina nekog tijela i energija koje je ta ista površina apsorbirala pri dozračivanju. Kod analize prijenosa topline zračenjem mora se dakle promatrati međusobno djelovanje svih tijela koja zrače.

Za prijenos topline zračenjem nije potreban posebni medij tj. do prijenosa zračenjem dolazi i u vakuumu.

Kod razmatranja prijenosa energije zračenjem treba utvrditi razliku energije koju tijelo odzrači i energije što je apsorbira. Općeniti slučaj izmjene topline zračenjem je vrlo složen jer svaki element površine tijela emitira zračenje u svim smjerovima i prima zračenje iz svih smjerova. To znači da pored temperatura i emisivnosti površina izmjenu topline određuje i njihova geometrija i uzajamni položaj.

Relativno jednostavan za proračun je slučaj izmjene topline između dvije paralelne jednako velike plohe na relativno maloj udaljenosti. Primjer za to je sloj zraka unutar nekog

građevnog dijela zgrade [26]. Neka su nasuprotne površine temperature T_1 i T_2 i stupnjeva emisije ϵ_1 i ϵ_2 . Uz pretpostavku da je $T_1 > T_2$ izmjena topline između paralelnih ploha iznosi:

$$q_{12} = \epsilon_{12} \times \sigma \times (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.56)$$

ili pisano u malo drugačijem obliku:

$$q_{12} = \epsilon_{12} \times \sigma^* \times ((T_1/100)^4 - (T_2/100)^4) \quad (2.57)$$

gdje je:

$$\begin{aligned} \epsilon_{12} &= 1 / (1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2 - 1) \\ \sigma &= 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4) \\ \sigma^* &= 5,67 \text{ W/(m}^2\text{K}^4) \end{aligned} \quad (2.58)$$

Toplinski tok izmijenjen zračenjem, Φ_{12} , između dvije jednako velike ($A_1 = A_2$) paralelne „sive“ površine, na relativno malom razmaku, iznosi

$$\phi_{12} = A_1 \times q_{12} \quad (2.59)$$

Drugi relativno jednostavan slučaj je izmjena topline zračenjem između tijela relativno malih dimenzija koje se nalazi unutar drugog tijela. Takav je slučaj npr. osoba temperature T_1 , koja se nalazi u prostoriji zgrade s površinskom temperaturom okolnih građevnih dijelova T_2 . Drugi primjer ovakve izmjene topline zračenjem je zgrada s ovojnicom površinske temperature T_1 okružena drugim zgradama, vegetacijom, nebeskim svodom,... srednje temperature T_2 .

Kad je, dakle, „sivo“ tijelo ploštine A_1 potpuno obuhvaćeno „sivim“ tijelom ploštine A_2 , tada izraz za ϵ_{12} glasi:

$$\epsilon_{12} = 1 / ((1/\epsilon_1) + A_1/A_2 \times (1/\epsilon_2 - 1)) \quad (2.60)$$

Uvrštavanjem izraza (2.60) u izraz (2.56) dobije se toplinski tok izmijenjen zračenjem.

U slučaju da površina okolice ima vrlo niski faktor refleksije ($\rho_2 \approx 0$, odnosno $\alpha_2 \approx 1$ i $\epsilon_2 \approx 1$; crno tijelo) ili kad je ploha okolice vrlo udaljena, vrijedi približno:

$$\epsilon_{12} \approx \frac{1}{((1/\epsilon_1) + A_1/A_2 \times (1 - 1))} = \epsilon_1 \quad (2.61)$$

Ponekad je praktično prijenos topline zračenjem formalno računati sličnom formulom kao i prijenos topline konvekcijom, pa je u tom slučaju:

$$q_{12} = h_r \times (\theta_1 - \theta_2) \quad (2.62)$$

gdje je

h_r koeficijent prijelaza topline zračenjem koji iznosi:

$$h_r = \frac{(T_1^2 + T_2^2) \times (T_1 + T_2) \times \sigma}{(1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2 - 1)} \quad (2.63)$$

θ_1 i θ_2 su temperature tijela koja izmjenjuju toplinu zračenjem, u °C.

Tijelo će biti u toplinskoj ravnoteži sa svojim okolišem, kada su odzračena i dozračena količina energije po jedinici vremena i jedinici ploštine površine tijela međusobno jednake.

Primjer 2.8

Koliki je toplinski tok zračenjem između dvaju prozorskih stakala površine $A = 2 \text{ m}^2$, ako je temperatura zraka u prostoriji $T_1 = 293 \text{ K}$, temperatura vanjskog zraka $T_2 = 273 \text{ K}$, a faktor emisije stakla je $\epsilon = 0,9$. Pretpostavlja se da je temperatura prozorskih stakala jednaka temperaturi zraka s kojim su u dodiru.

Toplinski tok zbog prijenosa topline zračenjem iznosi:

$$\begin{aligned} \Phi_{12} &= \sigma \times A \times (T_1^4 - T_2^4) / (1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2 - 1) \\ \Phi_{12} &= 5,67 \times 10^{-8} \times 2 \times (293^4 - 273^4) / (1/0,9 + 1/0,9 - 1) \\ \Phi_{12} &= 168,44 \text{ W} \end{aligned}$$

3. GRAĐEVNI MATERIJALI, PROIZVODI I SUSTAVI ZA TOPLINSKU IZOLACIJU ZGRADA

3.1 Uvod

Graditeljstvo je gospodarska djelatnost koja se odnosi na planiranje, projektiranje, gradnju, održavanje, rekonstrukciju i uklanjanje građevina te razvoj i proizvodnju građevnih materijala, gotovih građevnih dijelova i sklopova. Ono obuhvaća područja rada građevinarstva i arhitekture te dijelova tehničkih djelatnosti: strojarstva, elektrotehnike, geodezije i dr. Krajnji cilj graditeljstva jest ostvarenje svrsishodne, ekonomski prihvatljive i estetski-oblikovno zadovoljavajuće građevine.

Građevinom se smatra sve što je nastalo kao rezultat građenja i čvrsto je povezano s tlom.

Građevine moraju u cijelosti i u svojim zasebnim dijelovima biti prikladne za njihovu namjeravanu uporabu, posebno vodeći računa o zdravlju i sigurnosti njihovih korisnika i to tijekom čitavog njihovog uporabnog vijeka. Uz uvjet uobičajenog održavanja, građevine moraju u ekonomski prihvatljivom uporabnom vijeku zadovoljiti **temeljne zahtjeve za građevinu** (Uredba EU br. 305/2011, [27]), koji se odnose na:

- mehaničku otpornost i stabilnost (da ne može doći do rušenja, velikih deformacija ili oštećenja građevine ili njenih dijelova),
- sigurnost u slučaju požara (ograničeno nastajanje i širenje požara, očuvanje nosivosti tijekom određenog vremena, sigurna evakuacija korisnika),
- higijenu, zdravlje i okoliš (građevina ne smije ugrožavati higijenu ili zdravlje korisnika i ne smije previše negativno utjecati na kvalitetu okoliša – otpuštanje štetnih tvari),
- sigurnost i pristupačnost pri uporabi (bez neprihvatljivih rizika od nezgoda ili oštećenja pri uporabi),
- zaštitu od buke (razina buke koja neće korisnicima ugroziti zdravlje, te ometati spavanje, odmor i rad),
- gospodarenje energijom i toplinsku zaštitu (mala potrošnja energije za rad tehničkih sustava, bez smanjenja toplinske ugodnosti korisnika),
- održivu uporabu prirodnih resursa (trajnost građevine, mogućnost recikliranja građevnih materijala,...).

Pojam građevine obuhvaća zgrade (stambene, poslovne, industrijske,...) i inženjerske građevine (mostove, ceste, tunele,...).

Zgrada je građevina koja ima zidove i krov. Sastoji se od tijela zgrade, ugrađenih tehničkih instalacija i opreme, te prostora zgrade.

Tijelo zgrade je dio zgrade koji sadrži vertikalne i horizontalne, vanjske i unutarnje građevne dijelove (zidove, stropove, krov,...). Građevni dijelovi zgrade su izgrađeni od različitih građevnih materijala.

Pojam materijala ne treba miješati s pojmom materije. **Materija** je sva i svaka objektivna realnost, koja je izravno ili posredno preko mjernih uređaja dostupna ljudskim osjetilima. Pojavljuje se u dva osnovna oblika: kao tvar koja ispunjava prostor i izgrađuje tijela i kao fizikalno polje tj. energija. Tvar ima masu. Veliki fizičar Albert Einstein je svojom teorijom relativnosti pokazao da su masa i energija ekvivalentni. Masa se može pretvarati u energiju i energija u masu, tako da su tvar i energija dva pojava oblika iste stvarnosti.

Tvar je pojavni vid materije koji se očituje kao organizirani skup čestica određene mase i obujma. **Materijalima** se, pak, nazivaju tvari uporabljene za ostvarenje nekog predmeta korisnog za određenu uporabu. Materijali su prirodne ili prerađene tvari od kojih se nešto proizvodi. Da bi neka tvar bila materijal ona mora, dakle, imati određena specifična svojstva korisna za primjenu te se mora moći prerađivati u željeni oblik. Materijali se dobivaju iz sirovina koje se, pak, dobivaju iz prirodnih izvora i koriste izravno ili se dalje obrađuju. **Sirovina** je, dakle, prirodna tvar od koje se dobivaju materijali.

Građevni materijali su svi materijali koji se ugrađuju u građevinu. Njihov životni ciklus polazi od ekstrakcije (odvajanja jedne komponente iz smjese tvari) iz sirovina, preko proizvodnje i prerade do ugradnje i uporabe te na kraju recikliranja ili odbacivanja kao otpada. Na slici 3.1 prikazan je zatvoreni proizvodno-ekonomsko-ekološki krug dobivanja građevnog materijala s konačnim povratkom u prirodu.



Slika 3.1 Životni ciklus građevnog materijala

3.2 Razvoj i uporaba građevnih materijala tijekom povijesti

Povijest čovječanstva vrlo je usko povezana s razvojem materijala. Tijekom povijesti čovjek je otkrivao, prerađivao, proizvodio i upotrebljavao različite materijale. Velika povijesna razdoblja: kameno doba, bakreno doba, brončano doba, željezno doba, dobila su imena po pretežito upotrebljavanim materijalima u tim epohama. U početku su ljudi upotrebljavali samo prirodne materijale koje su nalazili u svojoj blizini: drvo, kamen, glinu,..., a njihova uspješna primjena u graditeljstvu temeljila se na dugogodišnjem sakupljenom iskustvu graditelja. Od metala ljudi su najprije počeli koristiti one koji se pojavljuju u prirodi u elementarnom stanju (zlato, srebro, bakar), a zatim su postepeno razvijali zanatsku proizvodnju drugih metala iz ruda. Kasnije su mnoge materijale koji se pojavljuju u prirodi ljudi počeli dalje prerađivati i oplemenjivati, tako da su se materijali sve više usavršavali. Tek u 19. stoljeću, razvojem prirodnih znanosti, otkrivaju se postupci za industrijsko dobivanje suvremenijih materijala: metala i njihovih legura (slitina), polimernih materijala, kompozitnih materijala,..., a njihova ispravna primjena u graditeljstvu temelji se na opsežnim dokaznim proračunima.

Stalni razvoj znanosti i tehnologije praćen je i stalnim razvojem novih materijala. Prema nekim procjenama danas postoji do 100.000 različitih vrsta tehničkih materijala.

Svaki materijal pripada nekoj od četiri velike porodice materijala: keramike i stakla, metala i legura, polimernih (organskih) materijala te kompozitnih materijala.

Keramički materijali su anorganski složeni kemijski spojevi s vrlo širokim područjem uporabe. Tu spadaju građevna opeka, crijep, cement, keramičke pločice,... U pravilu su to kruti, čvrsti materijali, kemijski otporni i toplinski stabilni, s visokom tlačnom čvrstoćom.

Staklo je proziran, amorfni, čvrsti, kruti i kemijski postojan materijal.

Metali (kovine) su kemijski elementi. Svi su u čvrstom stanju osim žive koja je tekućina na uobičajenoj temperaturi korištenja. Dobri su vodiči električne struje i topline. U rastaljenom

stanju međusobno se miješaju i tako se dobivaju legure s povoljnijim svojstvima za određene namijene. Uobičajena podjela metala je na crne (željezo, čelik) i obojene metale (svi ostali metali). U graditeljstvu se metali najviše koriste za nosive konstrukcije (čelik i aluminijske legure) te za oblaganje krovova i pročelja zgrada (ravni i profilirani limovi od bakra, cinka, čelika,...).

Polimeri su makromolekularni spojevi izgrađeni od velikog broja osnovnih strukturnih jedinica tzv. **mera**, koje se ponavljaju. Postoje prirodni polimeri (celuloza, kaučuk,...) i umjetni (sintetski) polimeri dobiveni odgovarajućim kemijskim procesima (polimerizacija, polikondenzacija, poliadicija). Sintetski polimeri se uglavnom proizvode iz nafte i biološki su nerazgradivi.

Radi tehničke uporabljivosti polimeru se mijenjaju svojstva raznim niskomolekulskim dodacima (omekšivači, ojačala,...). Tako dobivena tvar kojoj osnovu čini polimer naziva se polimerni materijal, plastična masa ili plastika.

S obzirom na strukturu makromolekule, razlikuju se

- linearni polimeri, nastali povezivanjem mera u jedan kontinuiran niz ili lanac,
- razgranati polimeri, na neke mere u glavnom lancu vezani su kraći bočni lanci (grane),
- umreženi polimeri, imaju trodimenzijsku prostornu strukturu.

Fizikalna svojstva polimera bitno su određena njihovom strukturom. Prema fizikalnim svojstvima dijele se u tri glavne grupe:

- **elastomere**, sa slabo umreženim makromolekulama (mogu se elastično istezati),
- **plastomere** ili termoplaste, s linearnim i razgranatim makromolekulama (taljivi su tj. zagrijavanjem omekšaju, a nakon hlađenja ponovno očvrstnu, pri čemu im se svojstva ne mijenjaju),
- **duromere**, s gusto prostorno umreženim makromolekulama (netaljivi su tj. zagrijavanjem ne omekšavaju već se s povećanjem temperature kemijski razgrađuju).

Glavni postupci prerade polimernih materijala su:

- **ekstrudiranje**, postupak kontinuiranog potiskivanja zagrijanog i omekšanog polimera kroz mlaznicu,
- **kalandriranje**, postupak proizvodnje beskonačnih traka propuštanjem omekšanog polimera između dva valjka s podesivim međurazmakom,
- **lijevanje**, postupak u kojem polimerni materijal poprima oblik kalupa bez djelovanja dodatne vanjske sile,
- **prešanje**, postupak prerade polimernih materijala u kalupima pod djelovanjem topline i tlaka.

Polimere nastale preradom biljaka nazivamo **biopolimeri**.

Sintetske čvrste pjene (pjenasti ili ekspandirani polimerni materijali, npr. ekstrudirani polistiren, poliuretanska čvrsta pjena,...) dobivaju se miješanjem polimera prije preradbe s nekim plinom ili dodatkom za pjenjenje (pjenilom), uslijed čega u materijalu nastaju pore ispunjene zrakom ili nekim drugim plinom. Čvrsta pjena je disperzija (raspršivanje) plina u čvrstom materijalu.

Kompozitni materijali (kompoziti) su materijali proizvedeni kombinacijom dvaju ili više kemijski različitih materijala, s jasnom granicom između njih. Svrha proizvodnje kompozita je dobivanja novog materijala, čija svojstva su bolja od svojstava pojedinačnih komponenti. Kompozit u pravilu sadrži jedan materijal kao kontinuiranu fazu (matricu), a u nju su uklopljeni odvojeni dijelovi druge faze (ojačala: vlakna, čestice,...). Zadaća ojačala je da bude nosivi dio kompozita. Zadaća matrice je da štiti ojačalo od vanjskih djelovanja i omogućiti prijenos opterećenja na ojačalo.

U strukturne kompozite ubrajaju se laminati i složene konstrukcije. Laminati su plošni slojeviti proizvodi od različitih materijala (npr. šperploče). Složene konstrukcije se sastoje od više međusobno povezanih materijala (npr. sendvič konstrukcije).

Biokompoziti su kompozitni materijali koji se sastoje ili od prirodnih vlakana i polimera dobivenih iz nafte ili od sintetskih vlakana i biopolimera. Biokompoziti koji se sastoje od prirodnih vlakana i biopolimera nazivaju se i **zeleni kompoziti**.

Posebna skupina suvremenih materijala jest skupina „**pametnih**“ materijala. „Pametan“ ovdje označava da materijal prepoznaje uvjete u svojoj okolini (temperaturu, svjetlost, kemijsko djelovanje, električno ili magnetno polje,...) i na njih reagira tako da mijenja svoju strukturu i svojstva.

U zadnje vrijeme radi se na razvoju materijala nanometarske razine homogenosti. Nano strukture su tvari čija jedna dimenzija iznosi između 0,1 i 100 nm, što je puno sitnije nego što ljudsko oko može vidjeti (ljudsko oko razlučuje dimenzije do 20 μm). Radi usporedbe virusi su otprilike veličine 10 nm. To su, dakle, materijali koji imaju veliku površinu u odnosu na njihov obujam. Upravo zbog svoje nanometarske dimenzije oni imaju svojstva koja nemaju materijali istog sastava ali makroskopskih dimenzija. Primjer nano strukture je vrlo tanki sloj metala od nekoliko desetaka nanometara (npr. kod Low-E ostakljenja).

Sirovine i materijali su sastavni dio gospodarstva svake države. Zbog iscrpivosti prirodnih izvora sirovina za dobivanje materijala i sve veće zagađenosti okoliša, danas se teži razvoju i primjeni materijala koji se mogu reciklirati tj. ekološki prihvatljivih materijala dobivenih iz obnovljivih sirovina. **Eko-materijal** (ekološki materijal ili zdravi materijal) je građevni materijal koji zadovoljava uobičajene tehničke kriterije zahtijevane za predviđenu uporabu materijala, ali i kriterije okoliša i društveno-gospodarskog razvoja. To su materijali koji kroz čitav svoj životni ciklus (tj. od njegove proizvodnje do odstranjenja ili reciklaže) nemaju štetnih utjecaja na okoliš i zdravlje čovjeka. Ekološki materijali zahtijevaju malu količinu sirovine kao i malu količinu energije za proizvodnju i ugradnju i ne emitiraju štetne tvari. Po mogućnosti treba ih proizvoditi blizu mjesta ugradnje radi smanjenja potrošnje energije za njihov transport.

U graditeljstvu se danas koriste brojni građevni materijali, različitog porijekla i različitih svojstava. Građevni materijal mora biti podoban za predviđenu uporabu tj. mora uspješno obavljati ulogu koja mu je namijenjena u ispunjenju temeljnih zahtjeva u vezi s građevinom. Predviđena uporaba odnosi se, dakle, na funkciju građevnog proizvoda u građevini. Kod toga vrijedi poznato načelo starih graditelja da, općenito govoreći, nema dobrih odnosno loših materijala, već postoji samo ispravna ili pogrešna njihova primjena. Ispravna primjena građevnog materijala znači da kod obavljanja namijenjene mu funkcije u građevini, moraju doći do izražaja njegove korisne karakteristike, a djelovanje manje povoljnih karakteristika mora na odgovarajući način biti spriječeno. Ispravna primjena građevnog materijala pretpostavlja, dakle, poznavanje njegovih svojstava (mehaničkih, termodinamičkih,...), njegove strukture i kemijskog sastava, njegova ponašanja u uvjetima korištenja tijekom vremena te međusobnog djelovanja s tvarima iz okoline.

Ako svojstva građevnog materijala nisu dovoljno poznata ili se građevni materijal pogrešno primijeni, može doći do negativnih posljedica, odnosno građevinskih šteta i / ili ugroze zdravlja korisnika.

3.3 Podjela građevnih materijala

Građevni materijali se mogu podijeliti prema različitim kriterijima.

Prema nastanku i dobivanju (porijeklu) građevni materijali se razvrstavaju u

- **prirodne građevne materijale**: drvo, prirodni kamen, šljunak, glina, pluto, slama,... (ne proizvode se već po potrebi oblikuju – „kroje“). Tu se ubrajaju materijali koji se dobivaju iz prirodnih sirovina i koji se mogu upotrebljavati bez dodatne obrade kojom bi se promijenila njihova svojstva.

- **umjetne građevne materijale:** beton (proizveden od cementa, dodataka i vode), metali (proizvedeni iz ruda), staklo (proizvedeno iz kvarcnog pijeska), plastični materijali (proizvedeni iz nafte),... Prema sirovinama iz kojih se dobivaju razlikuju se umjetni anorganski materijali i umjetni organski materijali. U umjetne anorganske materijale ubrajaju se materijali dobiveni iz prirodnih sirovina mineralnog porijekla koje se prerađuju različitim fizikalnim i kemijskim postupcima. Umjetni organski materijali uglavnom se proizvode iz sirove nafte raznim kemijskim procesima.

Prema kemijskom sastavu građevni materijali se dijele na

- **organske materijale** tj. materijale koji su životinjskog ili biljnog podrijetla, a sastoje se pretežno od ugljikovodika, kao što su drvo, plastični materijali,...
- **anorganske materijale** tj. materijale koji ne sadrže ugljikovodike kao što su kamen, staklo, metali,...

Prema uređenju atoma / molekula (osnovne nadmolekulske strukture) građevni materijali se dijele na

- **materijale kristalne strukture** (postoji pravilnost u prostoru u rasporedu atoma / molekula): metali, većina mineralnih građevnih materijala (mineral je prirodni homogeni sastojak Zemljine kore),...
- **materijale amorfne strukture** (ne postoji uređenost atoma / molekula u cijelom prostoru, već samo na kraćim razmacima): staklo, keramika, većina polimernih materijala,...

Pri zagrijavanju materijala kristalne strukture, na određenoj temperaturi, raskidaju se naglo veze između čestica i zato ovi materijali imaju točno određenu temperaturu taljenja. Kod amorfni materijala privlačne sile između pojedinih čestica nisu jednake pa kod njihovog zagrijavanja ne postoji nagli prijelaz iz čvrstog u tekuće stanje već oni pri zagrijavanju prvo omekšavaju, a zatim se tale u određenom intervalu temperatura.

Prema odnosu između čvrste guste tvari i pora, razlikuju se sljedeće strukture materijala [28]:

- **zbijena / kompaktna struktura** sastoji se od fizički gustog materijala bez pora (metali,...),
- **gusta struktura** sastoji se od kombinacije čvrstog materijala s vrlo malo relativno malih pora (teški beton, kamen,...),
- **struktura s mješovitim porama** sastoji se od gustog materijala u kojem se nalaze pore u obliku mjehura i kapilara različitih veličina i rasporeda (plinobeton,...),
- **struktura s otvorenim porama** je porozan materijal s izrazitom mrežom kapilara (opeka, gips,...),
- **struktura sa zatvorenim porama** je porozan materijal sa zatvorenim porama odijeljenim međusobno čvrstim stjenkama (pjenasto staklo, ekstrudirani polistiren,...).

Prema namjeni građevni materijali se dijele na

- **veziva** (služe za spajanje različitih materijala): cement, vapno, ...,
- **konstrukcijske materijale** (mogu preuzeti statička i dinamička opterećenja): beton, armirani beton, čelik, kamen, opeka, drvo, ...,
- **izolacijske materijale** (materijali za toplinsku izolaciju, materijali za zvučnu izolaciju, hidroizolacijski materijali, ...),
- **materijale za oblaganje** (za zaštitu ugrađenih izolacijskih i konstrukcijskih materijala): žbuke, premazi, keramika, ...

3.4 Toplinsko-izolacijski materijali

Pojam **toplinska izolacija** koristi se u višestrukome značenju. Toplinska izolacija je proces smanjenja prijenosa topline kroz neki sustav (građevni dio zgrade, stjenku toplovodne cijevi, ...). Pojam toplinske izolacije povezan je, dakle, s mogućnošću kontrole prijenosa topline kada je važno da se ne prekorače određene granice. Često se tim pojmom označava i sloj

toplinsko-izolacijskog materijala („sloj toplinske izolacije“). Kad se želi smanjiti prijenos topline kroz neki postojeći građevni dio zgrade, govori se o izvedbi „dodatne toplinske izolacije“. Često se govori i o „unutarnjoj ili vanjskoj toplinskoj izolaciji“, ovisno o tome da li je položaj toplinsko-izolacijskog sloja sa strane prostorije ili sa strane vanjskog ili negrijanog prostora.

Općenito se **izolacijskim materijalima** nazivaju građevni materijali koji su prvenstveno namijenjeni za toplinsku i/ili zvučnu izolaciju tj. za zaštitu od gubitka topline i/ili zaštitu od buke. Neki izolacijski materijali istovremeno obavljaju obje ove zadaće.

Materijal za zvučnu izolaciju ili **zvuko-izolacijski materijal** je građevni materijal koji se zbog svojeg izraženog svojstva elastičnosti i/ili apsorpcije zvuka može rabiti za povećanje zvučne izolacije građevnog dijela od zračnog i/ili udarnog zvuka (uglavnom u povezanosti s drugim građevnim materijalima) i/ili za povećanje apsorpcije zvuka u prostoriji ili šupljini unutar građevnog dijela zgrade.

Materijal za toplinsku izolaciju ili **toplinsko-izolacijski materijal** jest materijal koji je, zbog svoje slabe toplinske vodljivosti (projektna vrijednost $\lambda \leq 0,10 \text{ W/(m}\times\text{K)}$), predviđen da obavi ulogu smanjenja prijenosa topline kroz sustav na koji ili u koji je ugrađen.

U nekim slučajevima zadaću toplinske izolacije može ispuniti materijal ili sustav predviđen za ispunjenje sasvim druge namjene. Primjerice nosivi zid zgrade od porobetonskih zidnih elemenata ili šuplje porozne opeke može pored svoje osnovne zadaće nosivosti ispuniti istovremeno i zahtjev toplinske izolacije. Ovdje se radi, dakle, o materijalima koji imaju dvostruku ulogu: nosivi su i toplinski izoliraju. Takvi materijali se nazivaju materijalima „s ravnomjerno razdijeljenom toplinskom izolacijom“. Njihov razvoj započeo je 70-tih godina 19. stoljeća kada je po prvi put u graditeljstvu postavljen zahtjev u vezi sa štednjom energije za grijanje zgrade. Često, međutim, s ovakvim rješenjima nije moguće dosegnuti danas zahtijevanu razinu toplinskih svojstava građevnih dijelova zgrade. U takvim slučajevima, ili kada se upotrijebi materijal koji zadovoljava samo svojstvo nosivosti, da bi se zadovoljio zahtjev ukupnog smanjenja prijenosa topline, potrebno je postojećem sustavu dodati toplinsko-izolacijski materijal s dobrim izolacijskim svojstvima (sloj mineralne vune, pjenaste plastike,...).

Kod toplinsko-izolacijskih materijala većinom se radi o poroznim materijalima s mnogo, jednoliko raspoređenih, malih šupljina - pora, najčešće ispunjenih zrakom. **Porozni materijal** jest materijal s fino raspodijeljenom čvrstom fazom materijala i pora. Karakterizira se porozitetom ξ , koji je odnos između obujma pora u materijalu i ukupnog obujma materijala s porama. Zrak u porama loš je vodič topline i zato povoljno djeluje na izolacijsko svojstvo poroznog materijala.

Porozni materijali se mogu podijeliti prema svojoj strukturi na:

- **vlaknaste porozne materijale**: u tu grupu pripadaju porozni materijali koji se sastoje od kontinuirane plinske faze s čvrstim sastojcima čija duljina prevladava u odnosu na druge dimenzije (vlakna). Vlakno je izduljeni, vlasasti oblik tvari, duljine mnogostruko veće od promjera. Vlakna se razlikuju prema vrsti materijala, duljini i promjeru. Prirodna organska vlakna su biljnog (celuloza, lan, pamuk,...) i životinjskog (svila) porijekla. Jedino prirodno anorgansko vlakno je azbest. Umjetna vlakna se dobivaju industrijskom proizvodnjom. Umjetna vlakna mogu biti anorganska (staklena vlakna, kamena vlakna,...) ili organska (na bazi polimera: poliesterska vlakna, polipropilenska vlakna,...). Anorganska vlakna imaju visoku toplinsku postojanost, a organska vlakna relativno nisku. Prirodna vlakna su u pravilu higroskopna, a umjetna nisu. Razvojem tehnologije izrade vlakana kemijskim putem, dobivena su vlakna koja imaju mnogo bolja svojstva od prirodnih vlakana. Moguće je i projektiranje određenih svojstava vlakana prema zahtijevanim svojstvima konačnog proizvoda.
- **zrnaste porozne materijale**: u tu grupu pripadaju porozni materijali koji se sastoje od kontinuirane plinske faze s nepravilnim čvrstim sastojcima porozne strukture, čiji oblik nema jednu prevladavajuću dimenziju (ekspandirani perlit, ekspandirani vermikulit,...).

- **penaste porozne materijale:** u tu grupu pripadaju porozni materijali koji se sastoje od kontinuirane čvrste faze sa šupljinama približno kuglastog oblika ispunjenima plinom (ekstrudirani polistiren, poliuretanska pjena,...). Pjenasti porozni materijali mogu biti sa zatvorenim šupljinama ili s međusobno povezanim šupljinama. Pjenasti porozni materijali s međusobno povezanim šupljinama sastoje se od kontinuirane čvrste faze sa šupljinama koje su međusobno povezane tako da je i plinska faza kontinuirana.

Prema različitim sirovinama iz kojih se dobivaju, toplinsko-izolacijski materijali mogu se načelno podijeliti u dvije grupe, u organske i anorganske izolacijske materijale. Organski toplinsko-izolacijski materijali sastoje se od ugljikovih spojeva, a dobivaju se kako iz biljnih rastućih sirovina (npr. drvo, pluto, celuloza,...) tako i iz sirove nafte (npr. polistiren, poliuretan, ...). Anorganski toplinsko-izolacijski materijali dobivaju se iz mineralnih sirovina (npr. kamena vuna, pjenasto staklo, perlit,...). Svaki od navedenih materijala su različite strukture, tako da ih se može svrstati u vlaknaste izolacijske materijale, penaste izolacijske materijale ili zrnaste materijale. U tablici 3.1 prikazana je razdioba toplinsko-izolacijskih materijala prema vrsti sirovine iz koje se proizvode [29], [30].

Tablica 3.1 Razdioba toplinsko-izolacijskih materijala prema vrsti sirovine

Toplinsko-izolacijski materijali			
Organski		Anorganski	
Umjetna sirovina	Prirodna sirovina	Umjetna sirovina	Prirodna sirovina
Ekspandirani polistiren (EPS)	Drvena vlakna	Mineralna vuna (staklena, kamena, od troske)	Ekspandirana glina
Ekstrudirani polistiren (XPS)	Drvena vuna		Perlit
Poliuretanska čvrsta pjena (PUR)	Pluto	Pjenasto staklo	Vermikulit
Poliuretanska pjena za ugradnju in-situ	Celulozna vlakna	Kalcijev silikat	Porobeton
Poliizocijanuratna pjena (PIR)	Kokosova vlakna		
Fenolna čvrsta pjena (PF)	Pamuk		
Poliesterska vlakna	Lanena vlakna		
	Konoplja		
	Trstika		
	Slama		
	Ovčja vuna		

Kod grupe anorganskih materijala sirovina se označava kao prirodna ako ona kod obrade ne promjeni svoj mineraloški sastav.

3.5 Proizvodi i sustavi za toplinsku izolaciju

Izolacijski materijali se prema njihovu obliku isporuke mogu podijeliti u sljedeće osnovne grupe:

- tvornički izrađene proizvode u obliku ploča, blazina, oblikovanih elemenata,...,
- nevezane zrnaste materijale za nasipanje (ekspandirana glina, ekspandirani perlit, ...),

- vunaste rahle materijale u vrećama za ispunu šupljina (mineralna vuna, ovčja vuna, lan, konoplja,...),
- toplinsko izolacijske smjese u tekućem stanju za nanošenje premazivanjem, prskanjem, ubrizgavanjem, injektiranjem,..., koje se pijene i otvrdnu nakon ugradnje (jednokomponentna ili dvokomponentna poliuretanska pijena),
- posebni proizvodi (transparentna toplinska izolacija, vakuumaska toplinska izolacija, aerogel,...).

Proizvod za toplinsku izolaciju ili toplinsko-izolacijski proizvod je toplinsko izolacijski materijal u svom konačnom obliku za primjenu (obliku isporuke) uključujući eventualnu površinsku oblogu ili prevlaku. Za svako područje primjene toplinsko-izolacijskih materijala postoje danas posebni razrađeni oblici isporuke materijala. Najčešće upotrebljavani proizvodi za toplinsku izolaciju su:

- **višeslojni izolacijski proizvod:** to je izolacijski proizvod sastavljen od dvaju ili više slojeva toplinsko-izolacijskog materijala, u kojem je svaki izolacijski sloj čvrsto povezan sa susjednim slojem. Pojedini slojevi mogu biti od istog ili različitog materijala.
- **spregnuti izolacijski panel:** to je panel izrađen od dvaju ili više različitih međusobno čvrsto povezanih materijala od kojih je jedan toplinsko-izolacijski materijal. Panelom se, inače, naziva samostalni plošni element koji služi za oblaganje ili zatvaranje zidova ili stropova. Svojstva spregnutog izolacijskog panela proizlaze iz kombinacije svojstava pojedinih materijala (npr. metala, iverice ili gipskartonske ploče i toplinsko-izolacijskog materijala).
- **sendvič panel:** to je kruti, spregnuti izolacijski panel sastavljen od toplinsko-izolacijskog materijala obloženog s obje strane pločastim materijalom, primjerice metalom.
- **lamelni izolacijski proizvod:** to je izolacijski proizvod izrađen od vlaknastih materijala u kojem je opća orijentacija vlakana okomita na glavnu površinu proizvoda. Lamele su često nalijepljene na aluminijsku foliju.
- **toplinsko-izolacijska ploča:** to je kruti ili polukruti proizvod pravokutnog oblika i pravokutnog poprečnog presjeka jednolične debljine koja je znatno manja od ostalih dimenzija. Ploče mogu imati oblogu debljine do 3 mm, npr. od specijalnog papira ili folije od plastike, metala ili tkanine, koja može imati određenu tehničku zadaću (zaštita od oborina, vjetrovna brana, parna brana,...) ili imati samo dekorativnu ulogu. Moguće su i površinske prevlake, debljine do 3 mm, nanijete bojanjem, prskanjem ili rastiranjem lopaticom. Ploče se mogu isporučiti i s površinskim utorima trokutastog, pravokutnog ili drugog poprečnog presjeka. Ploče s dubokim kanalima namijenjene su ugradnji na zakrivljenoj površini. Zakrivljene ploče s pravokutnim uzdužnim presjekom i poprečnim presjekom u obliku luka rabe se za izolaciju cijevi velikog promjera i valjkastih spremnika (posuda). Po posebnoj narudžbi, za konkretni ravni krov, mogu se proizvesti ploče s gornjom kosom površinom, s kojima se onda na zgradi izvodi sloj za pad krovne površine. Za proizvodnju ploča upotrebljavaju se mineralni toplinsko-izolacijski materijali (mineralna vuna, ekspanzirani perlit,...), sintetski toplinsko-izolacijski materijali (ekspanzirani polistiren, tvrda poliuretanska pijena,...) i toplinsko-izolacijski materijali biljnog porijekla (pluto, trstika, drvena vuna, ...).
- **toplinsko-izolacijska blazina (prostirka):** to je vlaknasti savitljivi toplinsko-izolacijski proizvod od pusta (filca), obično obložen s jedne ili obje strane specijalnim papirom, tkaninom, žičanom mrežom, istegnutim metalom ili sličnom oblogom koja je mehanički pričvršćena na izolacijski materijal. Tanje prostirke isporučuju se u obliku svitka (role, namotanog valjaka). Toplinsko-izolacijska blazina općenito je savitljivija i mekša od toplinsko-izolacijske ploče. Zato se ona bolje prilagođava neravnim

površinama. Kriterij kojim bi se jasno razgraničile blazine od ploča nije jednoznačno utvrđen. Događa se da proizvode sličnih svojstava netko naziva blazinama, a netko pločama. Općenito se može reći da je blazina savitljivija varijanta ploče.

- **cijevna obloga (cijevaci):** to je toplinsko-izolacijski proizvod oblikovan kao valjkasti prsten koji se može razdvojiti radi lakše ugradnje. Koristi se za toplinsku izolaciju cijevi.
- **toplinsko-izolacijska opeka:** to je opeka s velikim obujamskim udjelom zračnih pora i šupljina u odnosu na čvrsti dio.
- **lagani agregat ili lagani materijal za ispunu:** to je izolacijski materijal ili proizvod sastavljen od poroznih ekspanziranih granula (zrnaca).
- **toplinsko-izolacijska žbuka:** to je žbuka koja sadrži znatan obujamski udio laganog agregata.
- **toplinsko-izolacijski beton ili lagani beton:** to je beton koji sadrži znatan obujamski udio laganog agregata.
- **toplinsko-izolacijski proizvod izrađen in-situ:** to je toplinsko-izolacijski proizvod koji je izrađen na mjestu primjene (na gradilištu) ili je tamo dobio svoj konačni oblik i koji svoja svojstva postiže nakon ugradnje. Tu spadaju izolacijske pjene in-situ (poliuretanska pjena) i zrnasti toplinsko-izolacijski materijali. **Izolacijska pjena in-situ** jest materijal ili smjesa materijala koji se nanose, prskaju ili injektiraju na gradilištu, formirajući pjenu koja naknadno stvrdne dajući kruti izolacijski proizvod. **Zrnasti** (rahli, rastresiti) **toplinsko-izolacijski materijal** su granule, valjčići, perle, prah, pahuljice ili slični oblici izolacijskog materijala predviđeni za ručnu ugradnju ili pomoću pneumatske opreme.

Značajke toplinsko-izolacijskih materijala ili toplinsko izolacijskih proizvoda mogu biti opisane i u kombinaciji s drugim građevnim materijalima ili građevnim elementima kao sustav toplinske izolacije sa specifičnim svojstvima. **Sustav toplinske izolacije** jest, dakle, sklop dviju ili više komponenata od kojih je najmanje jedna toplinsko-izolacijski materijal ili proizvod. Svojstva sustava su svojstva čitavog sklopa (npr. ETICS sustav). Prednost sustava toplinske izolacije je da osim zadaće toplinske zaštite zgrade, u pravilu rješava istovremeno i neke druge važne zadaće.

U tablici 3.2 navedeni su normirani toplinsko izolacijski proizvodi za zgrade.

Tablica 3.2 Normirani toplinsko izolacijski proizvodi za zgrade (od [31] do [40])

HRN EN	Skraćeni naziv norme
13162	Tvornički izrađeni proizvodi od mineralne vune (MW)
13163	Tvornički izrađeni proizvodi od ekspaniranog polistirena (EPS)
13164	Tvornički izrađeni proizvodi od ekstrudirane polistirenske pijene (XPS)
13165	Tvornički izrađeni proizvodi od tvrde poliuretanske pijene (PUR)
13166	Tvornički izrađeni proizvodi od fenolne pjene (PF)
13167	Tvornički izrađeni proizvodi od pjenastog stakla (CG)
13168	Tvornički izrađeni proizvodi od drvene vune (WW)
13169	Tvornički izrađeni proizvodi od ekspaniranog perlita (EPB)
13170	Tvornički izrađeni proizvodi od ekspaniranog pluta (ICB)
13171	Tvornički izrađeni proizvodi od drvenih vlakana (WF)

Prikladnom primjenom toplinsko-izolacijskih materijala, proizvoda i sustava znatno se smanjuju toplinski gubici zgrada. Tako materijali za toplinsku izolaciju bitno doprinose uštedi energije i zaštiti okoliša. Ekološki aspekt uporabe toplinsko-izolacijskih materijala razlikuje se od većine drugih proizvoda. Toplinska izolacija ugrađena u zgradu smanjuje potrošnju fosilnih goriva za grijanje zgrade te time neposredno utječe na smanjenje onečišćenja okoliša. Kod toga, naravno, treba uzeti u obzir opterećenje okoliša koje nastaje proizvodnjom, ugradnjom, održavanjem i zbrinjavanjem samog toplinsko-izolacijskog materijala. Osim ovog njihovog primarnog djelovanja, ugradnjom toplinsko-izolacijskih materijala, poboljšava se i ugodnost klime u prostoru zgrade te sprječavaju građevinske štete od vlage na građevnim dijelovima zgrade. Također se poboljšava i zvučna izolacija za zračni zvuk laganih dvodijelnih građevnih dijelova kao što su pregradni zidovi, ovješeni stropovi ili predstjenke mekane na savijanje te zaštita od udarnog zvuka kod plivajućih podova.

3.6 Područja primjene toplinsko-izolacijskih materijala

Toplinsko-izolacijski materijali su namijenjeni za toplinsku izolaciju vertikalnih i horizontalnih građevnih dijelova zgrade koji graniče s vanjskim zrakom, tlom ili negrijanim prostorima unutar zgrade. Kod toga položaj sloja toplinsko-izolacijskog materijala može biti s vanjske (hladne) strane, u jezgri ili s unutarnje (tope) strane građevnog dijela. Ovisno o vrsti i položaju sloja izolacijskog materijala u višeslojnom građevnom dijelu, izolacijski materijal može osim zadaće toplinske izolacije obaviti istovremeno i zadaću zvučne izolacije ili apsorpcije zvuka.

U tablici 3.3 navedena su područja najčešćih primjena izolacijskih materijala.

Tablica 3.3 Područja najčešćih primjena toplinsko-izolacijskih materijala u zgradarstvu

Zid / stup	Izolacija s vanjske (hladne) strane	Iza obloge (ventilirana fasada)
		Ispod žbuke (ETICS sustav)
		Područje podnožja (sokl)
	Izolacija u jezgri	Dvodijelni zidovi
		Skeletne i okvirne drvene konstrukcije
		Lagani montažni elementi
Izolacija s unutarnje (tople) strane	Ispod žbuke	
	Ispod obloge pločama	
Strop / krov	Izolacija s vanjske (hladne) strane	Neventilirani ravni krov (topli krov), toplinska izolacija ispod hidroizolacije
		Ventilirani ravni krov (hladni krov), kosi krov, toplinska izolacija ispod pokrova
		Obrnuti krov, toplinska izolacija neposredno izložena vremenskim utjecajima
		Izolacija između rogova kosog krova, neprohodni pod tavana
	Izolacija s unutarnje (tople) strane	Izolacija ispod estriha, bez zahtjeva za izolacijom zvuka udara
		Izolacija ispod estriha, sa zahtjeva za izolacijom zvuka udara
		Izolacija ispod rogova kosog krova, ispod nosive konstrukcije, ovješeni stropovi
		Ispod stropa u svrhu apsorpcije zvuka
Perimetarska toplinska izolacija	Toplinska izolacija zida s vanjske strane prema tlu (s vanjske strane sloja hidroizolacije)	
	Toplinska izolacija prema tlu ispod podne ploče (s vanjske strane sloja hidroizolacije)	

Zahtjevi koje moraju zadovoljiti svojstva izolacijskih materijala ovisni su o njihovom području primjene. Svaki toplinsko-izolacijski materijal nije prikladan za svako područje primjene. Kod toga treba, u prvom redu, napraviti razliku između mehanički neopterećenih i opterećenih područja primjene. Da bi se kod mehanički neopterećenih izolacijskih materijala i proizvoda osiguralo zadržavanje oblika tijekom skladištenja i provođenja izvedbenih radova, postavljaju se i na te proizvode minimalni zahtjevi u pogledu čvrstoće. Kod postavljanja toplinske izolacije na vanjske zidove moraju se uzeti u obzir posmična naprezanja te vlačne sile okomite na ravninu ploča zbog sisajućeg djelovanja vjetra. Potreba ispunjenja mehaničkih zahtjeva ponekad ograničava mogući izbor toplinsko-izolacijskih proizvoda.

S gledišta građevinsko-fizikalnog projektiranja zgrade, na toplinsko-izolacijske materijale i proizvode postavljaju se i zahtjevi u pogledu toplinske zaštite (ugodnost boravka), zaštite od vlage iz prostora zgrade, zvučne zaštite i zaštite od požara.

Izolacijski sloj u plivajućim podovima mora imati svojstvo elastičnosti (dinamička krutost) i istovremeno biti nosiv za stalno i pokretno opterećenje.

Ovisno o kemijskom sastavu i strukturi, toplinsko-izolacijski materijali pokazuju određene specifičnosti u pogledu ponašanja u uvjetima požara i različito reagiraju na opterećenje vlagom. Ta građevinsko-fizikalna svojstva mogu ograničiti ili čak potpuno isključiti uporabu pojedinih toplinsko-izolacijskih materijala za određena područja primjene.

U tablici 3.4 prikazana su uobičajena područja primjene normiranih izolacijskih materijala.

Tablica 3.4 Uobičajena područja primjene normiranih izolacijskih materijala (od [31] do [40])

Oznaka izolacijskog materijala	HRN EN ... Norma za proizvod	Zid / stup								Strop / krov								Perimetarska izolacija	
		Izvana		U jezgri				Iznutra		Izvana				Iznutra					
		Ventilirana fasada	Ispod žbuke	Područje podnožja (sokl)	Dvodijelni zidovi	Skeletni i okvirni zidovi	Lagani izolacijski paneli	Ispod žbuke	Ispod obloge pločama	Ispod hidroizolacije	Ispod pokrova	Obrnuti krov	Između rogova	Ispod estriha (bez. izol. udara)	Ispod estriha (izol. udara)	Ispod nosive konstrukcije	Radi apsorpcije zvuka	prema tluS vanjske strane zida	Ispod podne ploče
MW	13162	X	X	-	X	X	X	X	X	X	X	-	X	X	X	X	X	-	-
EPS	13163	X	X	X	X	-	X	X	X	X	X	-	X	X	X	X	-	-	-
XPS	13164	X	X	X	X	-	-	X	X	X	X	X	-	X	-	X	-	X	X

PUR	13165	X	-	-	X	-	X	-	-	X	X	-	X	X	-	X	-	-	-
PF	13166	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-	X	X	-	X	X	-	-
CG	13167	-	-	X	-	-	-	-	-	X	-	-	-	X	-	-	-	X	X
WW	13168	X	X	-	X	X	-	X	X	-	X	-	-	X	X	X	X	-	-
EPB	13169	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-	X	X	X	X	X	-	-
ICB	13170	X	X	-	X	X	-	X	X	X	X	-	X	X	-	X	X	-	-
WF	13171	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-	X	X	X	X	X	-	-

Kod izbora toplinsko-izolacijskog materijala potrebno je voditi računa i o ekološkim kriterijima. Oni se uglavnom uvijek svode na životni ciklus toplinsko-izolacijskog proizvoda. Primarni cilj ugradnje toplinsko-izolacijskih materijala jest smanjenje uporabe energije za grijanje prostora zgrade. Usporedi li se tako uštedena energija za grijanje s energijom potrebnom za dobivanje i prijevoz sirovine, proizvodnju toplinsko-izolacijskog materijala, prijevoz do gradilišta i ugradnju, dobije se vrijeme energetske amortizacije. To vrijeme za uobičajene toplinsko-izolacijske materijale i proizvode iznosi do najviše oko dvije godine. S obzirom na mnogo dulji uporabni vijek zgrade, proizlazi da kod ekološkog ocjenjivanja, ugrađena energija u toplinsko-izolacijske materijale i proizvode, za uobičajene uvjete, igra podređenu ulogu. Za ekološku ocjenu toplinsko-izolacijskog materijala mnogo važnije je isključiti eventualna onečišćenja okoliša i ugrozu zdravlja korisnika zgrade zbog otpuštanja raznih štetnih hlapljivih tvari, fenolformaldehida, prirodnog radioaktivnog zračenja i opterećenja prašinom te opasnosti od zaostalih pesticida.

Kao ekonomski kriterij kod odabira toplinsko-izolacijskog materijala služi, naravno, prvenstveno njegova cijena. No pored cijene samog materijala odnosno proizvoda treba voditi računa i o stupnju složenosti njegove ugradnje u zgradu, troškovima održavanja te o njegovoj trajnosti. Osim toga, od velikog značaja na funkcionalnost toplinske izolacije i njenu trajnost kao i trajnost građevnog dijela zgrade u koji je ugrađena, jest i osigurana stručna podrška od strane proizvođača toplinsko-izolacijskog materijala.

3.7 Prikaz uređenja tržišta građevnih materijala i proizvoda u Europskoj Uniji (Uredba EU br. 305/2011)

3.7.1 Uvod

Jedinstveno unutarnje tržište EU počiva na četiri velike slobode: slobodan promet ljudi, kapitala, usluga i roba. U prvo vrijeme slobodan promet roba uvelike je bio otežan zbog različitih nacionalnih tehničkih propisa i normi koje su morali zadovoljiti pojedini proizvodi u

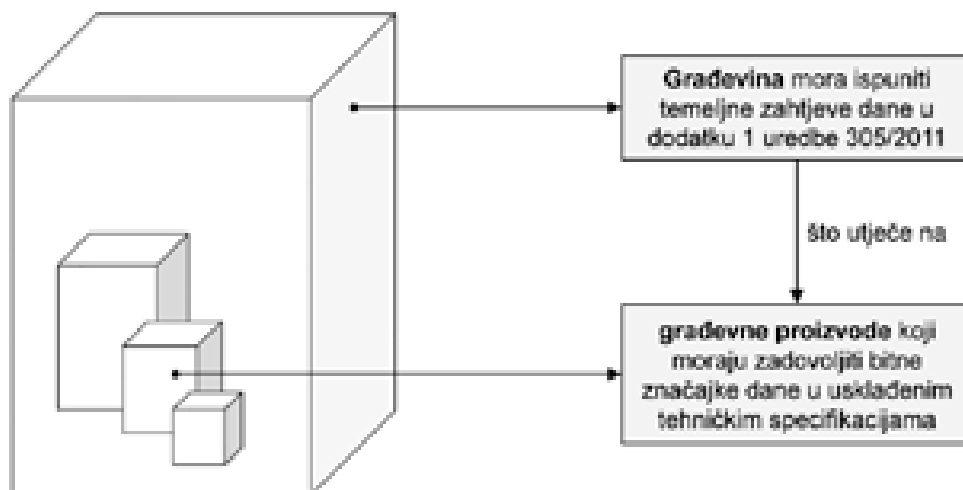
pojedinin državam članicama EU. Da bi se omogućio slobodan promet roba iz jedne države članice u drugu bez potrebe za dodatnim kontrolama, morala su određena pravila koncipiranja, proizvodnje i sigurnosti proizvoda postati zajednička za sve države članice EU. Na taj način trebale su se otkloniti tehničke zapreke, koje su predstavljale različiti nacionalni postupci ispitivanja i certificiranja, i uspostavila bi se zajednička tehnička regulativa za sve države članice. Kod toga je također trebalo zajamčiti zadovoljavajuću razinu sigurnosti europskih potrošača i ograničiti nepovoljna djelovanja proizvoda na okoliš. U tom cilju Europska komisija je počela uređivati proizvod po proizvod sastavljajući vrlo detaljne i precizne tehničke specifikacije. Takav pristup ubrzo se pokazao sporim i neučinkovitim. Da bi se ubrzao ovaj proces Europska komisija je 1985. godine utvrdila novi način tehničkog usklađivanja, nazvan „**novi pristup**“ (eng.: new approach). Novim pristupom donose se **direktive** – dokumenti koji se odnose na pojedine kategorije proizvoda. U njima se utvrđuju opći bitni zahtjevi sigurnosti, zaštite zdravlja i zaštite okoliša. Proizvod koji zadovolji zahtjeve dane u direktivi koja se odnosi na taj proizvod, dobiva oznaku CE. Ta oznaka dopušta slobodan promet proizvoda unutar EU. Da bi se pomoglo proizvođačima da zadovolje zahtjeve direktiva upućuje se na odgovarajuće usklađene europske norme za proizvode. Te norme su izrađene od europskih normiranih organizacija (CEN – europski odbor za normizaciju i CENELEC – europski odbor za elektrotehničku normizaciju) prema mandatu Europske komisije. U normama su definirane tehničke značajke i svojstva koja pojedini proizvod mora zadovoljiti, kao i metode ispitivanja koje treba koristiti. Općenito, usklađene norme se primjenjuju dragovoljno, osim za građevne proizvode za koje je dodatak ZA u normama obavezan za primjenu od strane proizvođača. Za proizvod koji je izrađen u skladu s usklađenom europskom normom pretpostavlja se da je sukladan s bitnim zahtjevima koji se na njega odnose, a dani su u pripadnoj direktivi. Na takav proizvod proizvođač stavlja oznaku CE i proizvod može slobodno putovati zajedničkim europskim tržištem bez dodatnih kontrola u pojedinim državama članicama. Oznaka CE je vizualni znak da proizvod zadovoljava europsko zakonodavstvo koje se na njega odnosi. To je obavezna oznaka za proizvode koji se tiču direktiva novog pristupa.

Direktive su dokumenti EU koji zahtijevaju transpoziciju (prijenos, prebacivanje) u svako nacionalno zakonodavstvo država članica EU. Što se tiče Direktive o građevnim proizvodima (Direktiva 89/106/EEZ) [41], pokazalo se da postoje značajne razlike u primjeni direktive u pojedinim državama članicama, što se negativno odražavalo na funkcioniranje zajedničkog tržišta građevnih proizvoda. Npr. označavanje CE znakom građevnih proizvoda nije smatrano obaveznim u čak četiri države članice. Zato je Europska komisija odlučila Direktivu o građevnim proizvodima zamijeniti s Uredbom o građevnim proizvodima, instrumentom koji je direktno primjenjiv u državama članicama, koji dakle, ne zahtjeva transpoziciju u svako nacionalno zakonodavstvo. Time se željelo izbjeći razlike između pojedinih nacionalnih transpozicija direktive.

3.7.2 Kratki prikaz Uredbe o građevnim proizvodima

Uredba (EU) br. 305/2011 [27], skraćeno nazvana Uredba o građevnim proizvodima, obavezno se primjenjuje od 01. 07. 2013. Ona definira **temeljne zahtjeve** (eng.: basic requirements) koji se odnose na projektiranje i izgradnju građevina (vidjeti točku 3.1), a koji se tiču zdravlja i sigurnosti ljudi, trajnosti građevina, racionalne uporabe energije, zaštite okoliša i drugih aspekata zaštite javnog interesa. Ti temeljni zahtjevi za građevine izravno utječu na zahtjeve u vezi s građevnim proizvodima namijenjenim ugradnji u te građevine (vidjeti sliku 3.2). Građevni proizvodi ugradnjom postaju sastavni dio građevine i sudjeluju u ispunjenju temeljnih zahtjeva u vezi s građevinom u koju su ugrađeni. Zato oni moraju biti podobni za uporabu. Prema ulozi koja je namijenjena građevnom proizvodu u ispunjenju temeljnih zahtjeva u vezi s građevinom u koju će se ugraditi, utvrđuju se **bitne značajke** (eng.: essential characteristics) građevnih proizvoda relevantne za namjeravanu uporabu. Proizvođač je dužan objaviti **svojstva građevnog proizvoda** (eng.: performance of a

construction product) u odnosu na navedene bitne značajke (izjava o svojstvima). Tako, primjerice, zbog temeljnog zahtjeva gospodarenja energijom i toplinskom zaštitom, zgrada mora biti što manje propusna za zrak, kako ne bi došlo do povećanih toplinskih gubitaka zbog nepotrebne izmjene zraka. Na prirodnu izmjenu zraka zgrade značajno utječe propusnost zraka kroz spojnice krila prozora i doprozornika. Na taj način temeljni zahtjev za građevinu koji se odnosi na gospodarenje energijom i toplinsku zaštitu ima utjecaja na kvalitetu prozora. Značajka prozora u odnosu na propusnost za zrak spojnice krila i doprozornika jest bitna značajka jer je u vezi sa ispunjenjem temeljnog zahtjeva u vezi sa zgradom. Proizvođač prozora mora stoga objaviti vrijednost svojstva koji se odnosi na propusnosti za zrak predmetnog prozora [42].



Slika 3.2 Utjecaj temeljnih zahtjeva u vezi s građevinom na bitne značajke građevnih proizvoda

Prvenstveni cilj Uredbe o građevnim proizvodima je da uskladi pravila o načinu izražavanja svojstava građevnih proizvoda i o korištenju oznake CE. Oznaka CE potvrđuje sukladnost građevnog proizvoda s objavljenim svojstvima koja su u vezi s bitnim značajkama građevnog proizvoda. Ona potvrđuje da su svi podaci koji prate proizvod dobiveni u skladu s odredbama Uredbe o građevnim proizvodima pa se stoga moraju smatrati točnim i pouzdanim.

Treba razlikovati objavljenu vrijednost svojstva nekog proizvoda od nazivne vrijednosti i referentne vrijednosti. **Objavljena vrijednost** svojstva nekog proizvoda jest vrijednost koju je objavio proizvođač, a izvedena je iz izmjerenih vrijednosti uz određene uvjete i pravila. **Nazivna vrijednost** jest vrijednost svojstva proizvoda kojom se proizvod identificira. Nazivna vrijednost se smije razlikovati od objavljene vrijednosti. Ponekad se koristi i tzv. **referentna vrijednost**. To je vrijednost svojstva proizvoda određena za posebne uvjete uporabe proizvoda u skladu s dogovorenim pravilima.

3.7.3 Građevni proizvodi u smislu Uredbe o građevnim proizvodima

Da bi se neki proizvod smatrao građevnim proizvodom u smislu Uredbe o građevnim proizvodima i time morao ispuniti odredbe iz te Uredbe, moraju biti istovremeno zadovoljena četiri uvjeta:

- da je proizvod nastao određenim procesom proizvodnje,
- da je proizvod stavljen na tržište radi prodaje,
- da je proizvod namijenjen trajnoj ugradnji u građevinu,

- da proizvod ugrađen u građevinu utječe na temeljne zahtjeve u vezi s građevinom (svojstva proizvoda utječu na svojstva građevine u vezi s temeljnim zahtjevima za građevinu).

Proizvod se ne smatra građevnim proizvodom u smislu Uredbe o građevnim proizvodima i ne podliježe odredbama te Uredbe ako je:

- proizveden pojedinačno ili prema posebnoj narudžbi u izvanserijskom postupku te ugrađen u građevinu,
- izrađen na gradilištu građevine u koju će biti ugrađen,
- proizveden u sklopu neindustrijskog postupka, na tradicionalan način, u svrhu njegove ugradnje pri rekonstrukciji postojeće građevine posebne arhitektonske ili povijesne vrijednosti (u RH to su zgrade upisane u Registar kulturnih dobara RH).

Za proizvod koji se ne smatra građevnim proizvodom u smislu Uredbe, proizvođač građevnog materijala preuzima odgovornost za proizvod, a odgovornost za njegovu sigurnu ugradnju preuzimaju osobe odgovorne za izgradnju građevine prema važećim nacionalnim propisima.

3.7.4 Usklađene norme

Za potvrđivanje sukladnosti građevnog proizvoda s objavljenim svojstvima, Uredba o građevnim proizvodima nalaže korištenje **usklađenih tehničkih specifikacija** (eng.: harmonised technical specifications). Postoje dvije vrste usklađenih tehničkih specifikacija: usklađene norme (vidjeti sliku 3.3) i europski dokumenti za ocjenjivanje (vidjeti sliku 3.4).

Usklađena norma (eng.: harmonised standard) jest norma koju je donijelo jedno od europskih normiranih tijela (CEN ili CENELEC) na temelju zahtjeva koji je izdala Europska komisija. Bibliografski podaci o donesenim usklađenim normama objavljuju se u službenom listu EU, serija C.

Usklađene norme služe kao poveznica između temeljnih zahtjeva u vezi s građevinama i svojstava građevnih proizvoda u odnosu na njihove bitne značajke i njihovu predviđenu uporabu.

Usklađena norma sadrži popis bitnih značajki predmetnog građevnog proizvoda i određuje metode i kriterije za ocjenjivanje svojstava građevnih proizvoda u vezi s njihovim bitnim značajkama. Usklađena norma može se smatrati „receptom“ koji proizvođač treba slijediti da bi ocijenio svojstva građevnog proizvoda kojeg želi staviti na tržište. Kad je neki proizvod obuhvaćen usklađenom normom, proizvođač mora koristiti metode ispitivanja i metode proračuna na koje upućuje usklađena norma.

Stavljanje na tržište građevnog proizvoda koji je obuhvaćen usklađenom normom mora biti popraćeno izjavom o svojstvima u vezi s bitnim značajkama građevnog proizvoda, a sastavlja je proizvođač. Kako bi se zajamčila točnost i pouzdanost izjave o svojstvima, svojstva građevnog proizvoda potrebno je ocijeniti s odgovarajućim sustavom ocjenjivanja i provjere stalnosti svojstava građevnog proizvoda (ukupno pet različitih sustava). Ovisno o značaju i utjecaju pojedinih građevnih proizvoda na zdravlje i sigurnost korisnika te zaštitu okoliša, u usklađenoj normi je navedeno za svaki građevni proizvod ili porodicu sličnih proizvoda, odnosno za pojedine bitne značajke proizvoda, koji sustav treba primijeniti.

Usklađena norma također uređuje način provođenja tvorničke kontrole proizvodnje vodeći računa o specifičnostima dotičnog procesa proizvodnje.



Slika 3.3 Postupak za građevne proizvode obuhvaćene usklađenom normom

3.7.5 Europski dokumenti za ocjenjivanje i europske tehničke ocjene

Usklađene norme ne mogu obuhvatiti sve postojeće građevne proizvode. Kako bi se proizvođačima građevnih materijala omogućilo sastavljanje izjave o svojstvima i stavljanje CE oznake i za proizvode koji nisu obuhvaćeni usklađenom normom, Uredba o građevnim proizvodima predviđala je paralelni sustav kojim se izrađuju europski dokumenti za ocjenjivanje i izdaju europske tehničke ocjene. Na zahtjev proizvođača, europske tehničke ocjene izdaju **tijela za tehničko ocjenjivanje**, tzv. TAB-ovi (eng.: Technical Assessment Bodies) koje imenuju države članice (imenovano tijelo) na svom državnom teritoriju za jedno ili više proizvodnih područja i o tome obavještavaju Europsku komisiju i druge države članice EU. Imenovano tijelo tvori tijelo treće strane koje je neovisno o radnoj organizaciji ili građevnom proizvodu koji ocjenjuje. Na razini EU nacionalni TAB-ovi uspostavljaju organizaciju za tehničko ocjenjivanje (organizacija TAB-ova), koja koordinira TAB-ovima te izrađuje i donosi europske dokumente za ocjenjivanje.

Europska tehnička ocjena (ETA, eng.: European Technical Assessment) mora sadržavati popis svojstava proizvoda koja je potrebno objaviti, onih bitnih značajki koje su relevantne za objavljenu namjeravanu uporabu proizvoda, kao i tehničke detalje potrebne za provedbu sustava ocjenjivanja i provjere stalnosti svojstava. Europska tehnička ocjena „ekvivalentna“ je usklađenoj normi. Ona omogućava proizvođaču da provede ocjenjivanje svojstava svog proizvoda i u konačnici postavi na proizvod oznaku CE.

Europski dokument za ocjenjivanje (EAD, eng.: European Assessment Document) jest dokument kojeg je donijela organizacija TAB-ova u svrhu izdavanja europskih tehničkih ocjena. Europski dokument za ocjenjivanje mora sadržavati, barem, opći opis građevnog proizvoda, popis bitnih značajki relevantnih za namjeravanu uporabu proizvoda, kao i metode i kriterije ocjenjivanja svojstava proizvoda u odnosu na navedene bitne značajke. Nadalje u europskom dokumentu za ocjenjivanje potrebno je utvrditi načela primjenjive tvorničke kontrole proizvodnje, vodeći računa o uvjetima proizvodnog postupka predmetnog građevnog proizvoda.

Proizvođač proizvoda koji nije u skladu s nijednom usklađenom normom podnosi zahtjev TAB-u za izdavanje europske tehničke ocjene. Ako predmetni proizvod nije obuhvaćen nijednim postojećim europskim dokumentom za ocjenjivanje, tijelo za tehničko ocjenjivanje sastavlja odgovarajući nacrt europskog dokumenta za ocjenjivanje kojeg mora prihvatiti i donijeti organizacija TAB-ova. Europski dokument za ocjenjivanje moći će kasnije poslužiti kao osnovni dokument za izdavanje europske tehničke ocjene zahtijevane od proizvođača sličnog proizvoda.



Slika 3.4 Postupak za građevne proizvode koji nisu obuhvaćeni usklađenom normom

3.7.6 Sustavi ocjenjivanja i provjere stalnosti svojstava

Sustavi ocjenjivanja i provjere stalnosti svojstava određuju radnje koje treba obaviti i tko ih treba obaviti, da bi se ocijenila svojstva u vezi s bitnim značajkama građevnog proizvoda i u konačnici na proizvod mogla staviti oznaka CE. U svakom sustavu predviđen je različiti broj i različite vrste radnji. U Uredbi o građevnim proizvodima utvrđeno je pet različitih sustava ocjenjivanja i provjere stalnosti svojstava, označenih brojevima 1+, 1, 2+, 3 i 4. Poredani su po opsegu i razini složenosti radnji koje treba provesti, tako da je sustav 1+ najzahtjevniji, a sustav 4 najjednostavniji. Proizvodi ili njihove bitne značajke koje imaju najznačajniju ulogu u ispunjenju temeljnih zahtjeva u vezi s građevinom i/ili koji predstavljaju veliki rizik za korisnike, svrstani su u sustav 1+, a proizvodi koji najmanje utječu na zdravlje i sigurnost korisnika i zaštitu okoliša u razred 4.

Pregled sustava ocjenjivanja i provjere stalnosti svojstava dan je u tablici 3.5.

Tablica 3.5 Pregled sustava ocjenjivanja i provjere stalnosti svojstava

Sustav ocjenjivanja i provjere stalnosti svojstava	Radnje ocjenjivanja i provjere stalnosti svojstava					
	Određivanje tipa proizvoda	Početni pregled proizvodnog pogona i tvorničke kontrole proizvodnje	Dodatno ispitivanje uzoraka	Tvornička kontrola proizvodnje	Ispitivanje slučajnih uzoraka prije stavljanja na tržište	Stalni nadzor, ocjenjivanje i vrednovanje tvorničke kontrole proizvodnje
Sustav 1+	Prijavljeno tijelo za certificiranje proizvoda	Prijavljeno tijelo za certificiranje proizvoda	Proizvođač	Proizvođač	Prijavljeno tijelo za certificiranje proizvoda	Prijavljeno tijelo za certificiranje proizvoda
Sustav 1	Prijavljeno tijelo za certificiranje proizvoda	Prijavljeno tijelo za certificiranje proizvoda	Proizvođač	Proizvođač	-	Prijavljeno tijelo za certificiranje proizvoda
Sustav 2+	Proizvođač	Prijavljeno tijelo za certificiranje kontrole proizvodnje	Proizvođač	Proizvođač	-	Prijavljeno tijelo za certificiranje kontrole proizvodnje
Sustav 3	Prijavljeni ispitni laboratorij	-	-	Proizvođač	-	-
Sustav 4	Proizvođač	-	-	Proizvođač	-	-

Ovisno o primijenjenom sustavu, postupak ocjenjivanja i provjere stalnosti svojstava odvija se kroz slijedeće radnje:

- **određivanje tipa proizvoda.** Radi se o određivanju modela proizvoda koji će se zatim tvornički izrađivati. To se radi na temelju ispitivanja tipa (uključujući

uzorkovanje), proračuna u vezi s tipom, vrijednosti uzetih iz tablica ili opisne dokumentacije proizvoda. Tip proizvoda jest skup vrijednosti reprezentativnih svojstava u vezi s bitnim značajkama građevnog proizvoda, koji je proizveden uporabom danih kombinacija sirovina u određenom proizvodnom procesu,

- **početni pregled proizvodnog pogona i tvorničke kontrole proizvodnje.** Tim pregledom treba potvrditi da je stalnost svojstava proizvoda održavana tijekom serijske proizvodnje,
- **dodatno ispitivanje uzoraka uzetih u tvornici.** Kada je nakon početnog pregleda propisan plan ispitivanja, proizvođač mora pristupiti dodatnim ispitivanjima na uzorcima uzetim u tvornici,
- **tvornička kontrola proizvodnje.** Radi se o stalnoj i dokumentiranoj unutarnjoj kontroli proizvodnje, koja se provodi u tvornici u skladu s pripadnim usklađenim tehničkim specifikacijama,
- **ispitivanje slučajnih uzoraka prije stavljanja na tržište,**
- **stalni nadzor, ocjenjivanje i vrednovanje tvorničke kontrole proizvodnje.**

Više subjekata je uključeno u gore navedene radnje ocjenjivanja i provjere stalnosti svojstava proizvoda. To su:

- **proizvođač,**
- **prijavljeno tijelo za certificiranje proizvoda.** To je ovlašteno, neovisno tijelo, koje je država članica prijavila Europskoj komisiji i drugim državama članicama, za obavljanje certificiranja proizvoda u postupku ocjenjivanja i provjere stalnosti svojstava prema Uredbi o građevnim proizvodima,
- **prijavljeno tijelo za certificiranje tvorničke kontrole proizvodnje.** To je ovlašteno, neovisno tijelo, koje je država članica prijavila Europskoj komisiji i drugim državama članicama, za obavljanje certificiranja tvorničke kontrole proizvodnje u postupku ocjenjivanja i provjere stalnosti svojstava prema Uredbi o građevnim proizvodima,
- **prijavljeni ispitni laboratorij.** To je ovlašteni, neovisni laboratorij, kojeg je država članica prijavila Europskoj komisiji i drugim državama članicama, za mjerenje, ispitivanje, istraživanje, umjeravanje ili određivanje na drugi način svojstava građevnih materijala ili proizvoda, u postupku ocjenjivanja i provjere stalnosti svojstava prema Uredbi o građevnim proizvodima.

Navedena ovlaštena tijela uključena u ocjenjivanje sukladnosti, nezavisna od proizvođača i kupca, nazivaju se treća strana (prva strana: proizvođač / dobavljač, druga strana: kupac). Države članice prijavljuju Europskoj komisiji i drugim zemljama članicama tijela koja su ovlaštena za obavljanje zadaća treće strane u postupku ocjenjivanja i provjere stalnosti svojstava (prijavljeno tijelo). Isto tijelo može biti prijavljeno za certificiranje proizvoda i certificiranje tvorničke kontrole proizvodnje te za provedbu ispitivanja. Tijela koja provode ocjenjivanje i provjeru stalnosti svojstava građevnih proizvoda trebala bi izvršavati svoje zadaće na istoj stručnoj i tehničkoj razini i pod jednakim uvjetima. Zato su u Uredbi utvrđeni zahtjevi koje ova tijela, ako žele biti prijavljena u smislu Uredbe, moraju ispuniti (nužno osoblje s tehničkim znanjem, potrebna oprema i uređaji,...).

U sustavima 1+ i 1 prijavljeno tijelo za certificiranje proizvoda, nakon što je obavilo svoje zadaće, izdaje **certifikat o stalnosti svojstava proizvoda**. Certifikatom o stalnosti svojstava proizvoda certifikacijsko tijelo potvrđuje da je proizvod sukladan zahtjevima iz usklađene tehničke specifikacije.

U sustavu 2+ prijavljeno tijelo za certificiranje kontrole proizvodnje, nakon što je obavilo svoje zadaće, izdaje **certifikat o sukladnosti tvorničke kontrole proizvodnje**. Certifikatom o sukladnosti tvorničke kontrole proizvodnje certifikacijsko tijelo potvrđuje da je sustav kontrole proizvodnje sukladan odgovarajućoj usklađenoj tehničkoj specifikaciji, odnosno da je proizvođač sposoban izrađivati proizvode sukladne specifikaciji.

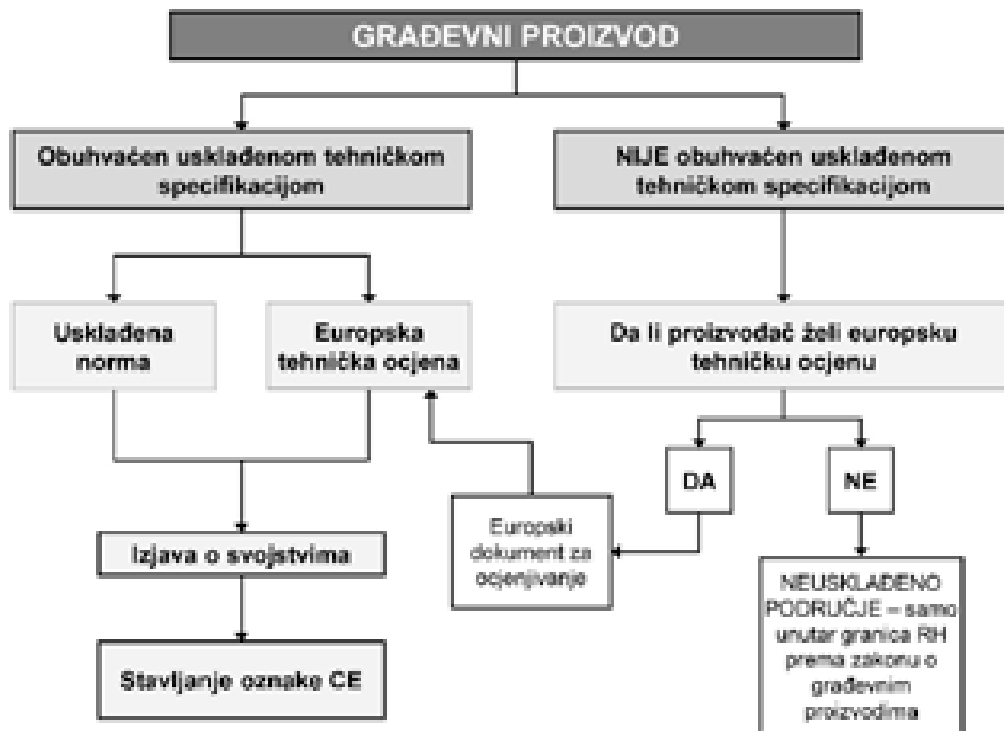
Pod pojmom **sukladnosti** razumijeva se udovoljavanje proizvoda postavljenim zahtjevima. Pod **ocjenjivanjem sukladnosti** razumijeva se svaka radnja koja se odnosi na izravno ili

posredno određivanje da li su ispunjeni odgovarajući zahtjevi. **Certifikacija** (potvrđivanje) sukladnosti označava djelovanje treće strane kojim se potvrđuje da je postignuto odgovarajuće povjerenje da je proizvod sukladan odgovarajućoj specifikaciji. To povjerenje se temelji na jasno prepoznatljivim kriterijima, postupcima ocjenjivanja, dokumentiranosti, kompetentnosti, organiziranosti,... Rezultat certifikacije stalnosti svojstava proizvoda i sukladnosti tvorničke kontrole proizvodnje treba biti povjerenje kupca u proizvod odnosno proizvođačevu sposobnost da ispuní dogovorene / propisane zahtjeve za proizvod.

U svim sustavima ocjenjivanja i provjere stalnosti svojstava, nakon provedenih svih radnji koje zahtjeva dotični sustav, proizvođač sastavlja izjavu o svojstvima građevnog proizvoda u odnosu na njegove bitne značajke.

3.7.7 Izjava o svojstvima

Kad je građevni proizvod u skladu s usklađenom normom ili s europskom tehničkom ocjenom koja je za njega izdana, proizvođač je obavezan sastaviti izjavu o svojstvima, prije nego taj proizvod stavi na tržište (vidjeti sliku 3.5). **Izjava o svojstvima** (DoP, eng.: Declaration of Performance) je dokument koji sadrži određeni broj obaveznih obavijesti o građevnom proizvodu (tip proizvoda, primijenjeni sustav ocjenjivanja i provjere stalnosti svojstava, namjeravana uporaba proizvoda,...) i popis svojstava proizvoda u vezi s njegovim bitnim značajkama koje se odnose na predviđenu uporabu, kako je to utvrđeno u usklađenim tehničkim specifikacijama. Izjava o svojstvima mora sadržavati svojstvo barem jedne bitne značajke građevnog proizvoda koja je relevantna za objavljenu namjeravanu uporabu. Sastavljanjem izjave o svojstvima, proizvođač preuzima odgovornost za sukladnost građevnog proizvoda s takvim objavljenim svojstvima. Države članice obavezne su prihvatiti izjavu o svojstvima, koju je proizvođač sastavio, kao točnu i pouzdanu.



Slika 3.5 Građevni proizvod i oznaka CE

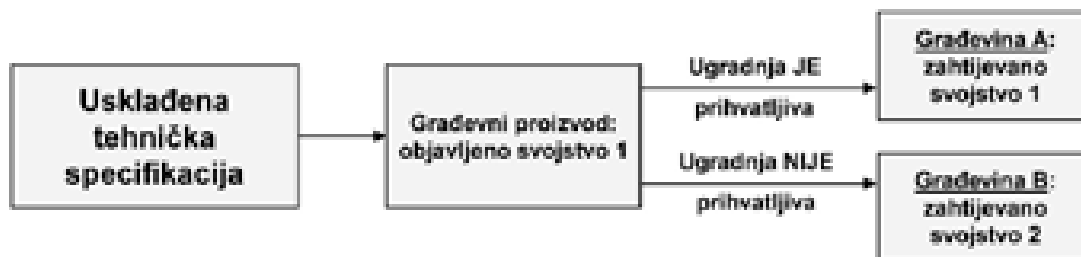
Svojstva građevnog proizvoda iskazuju se razinom, razredom ili opisom. **Razina** jest rezultat ocjenjivanja svojstva građevnog proizvoda iskazan brojčanom vrijednošću. U usklađenim tehničkim specifikacijama, kad namjeravana uporaba proizvoda to zahtjeva, utvrđuju se

granične razine. **Granična razina** znači najmanju ili najveću razinu svojstva u vezi s bitnom značajkom građevnog proizvoda. Ona predstavlja općenito priznatu graničnu vrijednost za bitnu značajku predmetnog građevnog proizvoda u svim državama članicama EU.

Razred jest raspon razina svojstva građevnog proizvoda ograničen najmanjom i najvećom vrijednošću.

U izjavi o svojstvima, u rubrici objavljena svojstva, slova „NPD“ znače „bez utvrđenog svojstva“ (eng.: No Performance Determined). Ona se upisuju u slučaju kad svojstvo nije objavljeno.

Ispunjavanje odredbi iz Uredbe o građevnim proizvodima omogućava proizvođaču da sastavi izjavu o svojstvima građevnog proizvoda. Izjava o svojstvima je ključni dokument za učesnike u gradnji. Ona omogućava korisniku tih proizvoda da dobije točnu i pouzdanu informaciju o njihovim svojstvima, tako da može izabrati odgovarajući proizvod za predviđenu namjenu (vidjeti sliku 3.6). Potrebnu razinu svojstava građevnog proizvoda s kojom bi se zajamčila sigurnost, zaštita zdravlja, zaštita okoliša itd. propisuje svaka država članica EU svojim nacionalnim propisima u ovisnosti o klimatskim, geografskim i drugim uvjetima koji prevladavaju u zemlji članici. Na korisniku građevnog proizvoda je, dakle, da procjeni da li određeni građevni proizvod, s obzirom na razinu svojih svojstava, odgovara za primjenu za koju ga je on namijenio.



Slika 3.6 Podobnost građevnog proizvoda za ugradnju u građevinu

Izjava o svojstvima za tip proizvoda ostaje valjana dok se ništa ne promjeni što bi moglo utjecati na bitne značajke (osnovna sirovina, sastav, tehnološki proces,...). Kada iz bilo kojeg razloga dođe do promjene svojstava proizvoda, mora se sastaviti nova izjava o svojstvima.

3.7.8 Uporaba oznake CE

Oznaka CE postavlja se na one građevne proizvode za koje je proizvođač sastavio izjavu o svojstvima. Oznaku CE na proizvod postavlja proizvođač.

Postavljanjem oznake CE proizvođač naznačuje da preuzima odgovornost za sukladnost građevnog proizvoda s objavljenim svojstvima i sa svim primjenjivim zahtjevima iz Uredbe o građevnim proizvodima i drugim relevantnim usklađenim zakonodavstvom EU.

Država članica ne smije zabraniti niti ometati, unutar svojeg područja, stavljanje na tržište građevnih proizvoda koji nose oznaku CE.

Oznaku CE potrebno je postaviti na vidljiv, čitljiv i neizbrisiv način na građevni proizvod ili na etiketu pričvršćenu na njega ili kad to nije moguće, oznaka se postavlja na ambalažu ili na popratne dokumente. Oznaka CE postavlja se prije nego je građevni proizvod stavljen na tržište. Znak CE popraćen je s nekoliko dodatnih obavijesti među kojima i s referentnim brojem izjave o svojstvima, razinom ili razredom objavljenih svojstava i predviđenom uporabom.

Ako građevni proizvod podliježe odredbama više europskih dokumenata koji predviđaju postavljanje oznake CE, na proizvod se postavlja samo jedna oznaka CE i ona znači da je proizvod sukladan primjenjivim zahtjevima svih tih različitih dokumenata.

Treba imati na umu da „sama“ oznaka CE na nekom građevnom proizvodu određene namjene ne znači automatski da je taj proizvod i najprihvatljiviji proizvod za tu namjenu.

3.8 Tehnička svojstva toplinsko-izolacijskih materijala i proizvoda

3.8.1 Uvod

Tehnička svojstva materijala su odgovor materijala na vanjsku pobudu (toplinsku pobudu, mehaničku pobudu,...). Materijali pokazuju raznovrsna tehnička svojstva. Tako razlikujemo: kemijska, mehanička, toplinska, optička, električna i magnetska svojstva materijala. Svojstva se, u pravilu, ocjenjuju normiranim metodama ispitivanja. Kod toga su propisani oblik i dimenzije epruveta za ispitivanje, uvjeti okoliša kod ispitivanja, fizikalne karakteristike mjernih uređaja, postupak provođenja ispitivanja i način iskazivanja dobivenog rezultata.

Osnovna svojstva neoblikovanog materijala u pravilu su neovisna o obliku i dimenzijama konačnog proizvoda i usporediva su za različite vrste materijala. Kod toplinsko-izolacijskih proizvoda teži se, međutim k tome, da se odrede svojstva koja se više odnose na proizvod, a ne na sam materijal. Preradom i obradom materijala dobivaju se, naime, proizvodi konačnog oblika i dimenzija što utječe na svojstva tih proizvoda. Kod toplinsko-izolacijskih proizvoda cilj je, dakle, što vjernije utvrditi njihovo ponašanje u uvjetima primjene.

U tablici 3.7 dan je popis normi za ispitivanje svojstava normiranih toplinsko-izolacijskih materijala.

Tablica 3.7 Norme o ispitivanjima svojstava normiranih toplinsko izolacijskih proizvoda

HRN EN	Skraćeni naziv norme
822	Određivanje duljine i širine
823	Određivanje debljine
824	Određivanje pravokutnosti
825	Određivanje ravnosti
826	Određivanje ponašanja pri tlačnom opterećenju
1602	Određivanje prividne gustoće
1603	Određivanje stabilnosti dimenzija u uvjetima stabilnih normalnih laboratorijskih uvjeta (23 °C / 50 % relativne vlažnosti)
1604	Određivanje stabilnosti dimenzija u uvjetima određenih temperatura i vlažnosti
1605	Određivanje deformacije u uvjetima određenih tlačnih i temperaturnih opterećenja
1606	Određivanje puzanja pri tlačnom opterećenju
1607	Određivanje vlačne čvrstoće okomito na ravninu ploče
1608	Određivanje vlačne čvrstoće u ravnini ploče
1609	Određivanje kratkotrajne vodoupojnosti kod kratkotrajnog djelomičnog uranjanja
12085	Određivanje linearnih dimenzija ispitnih uzoraka
12086	Određivanje paropropusnosti
12087	Određivanje dugotrajne vodoupojnosti pri uranjanju
12088	Određivanje dugotrajne vodoupojnosti pri difuziji
12089	Određivanje ponašanja pri savijanju
12090	Određivanje ponašanja pri posmiku

12091	Određivanje otpornosti na smrzavanje – odmrzavanje
12429	Uspostavljanje ravnotežne vlažnosti u uvjetima određene temperature i vlažnosti
12430	Određivanje ponašanja pod točkastim opterećenjem
12431	Određivanje debljine izolacijskih proizvoda za plivajuće podove

3.8.2 Gustoća tvari, specifični obujam i poroznost

Gustoća tvari, oznaka ρ , jest omjer mase neke homogene tvari m i obujma V prostora koji ta homogena tvar zauzima:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.1)$$

Mjerna jedinica gustoće u SI sustavu je kilogram po kubnom metru, oznaka kg/m^3 .

Za tvari koje su porozne i šupljikave upotrebljavaju se pojmovi prave gustoće ρ_s i prividne gustoće ρ_g .

Prava gustoća ρ_s , koja se ponekad naziva i stvarna gustoća ili gustoća same tvari, omjer je mase tvari i njenog stvarnog obujma, dakle, bez uključivanja obujma šupljina.

Prividna gustoća ρ_g , koja se ponekad naziva i gustoća tvari s porama ili obujamska masa, omjer je mase tvari i njenog ukupnog obujma, tj. zajedno s porama i šupljinama.

Kad se u graditeljstvu govori o gustoći uvijek se misli na prividnu gustoću, a koriste se nazivi „gustoća“ ili „obujamska masa“.

Specifični obujam v recipročna je veličina gustoće ρ :

$$v = \frac{V}{m} \quad (3.2)$$

Mjerna jedinica specifičnog obujma u SI sustavu je kubni metar po kilogramu, oznaka m^3/kg .

Poroznost ξ , jednaka je ukupnom obujmu pora i šupljina u poroznom materijalu podijeljenom s ukupnim obujmom tog materijala zajedno s porama i šupljinama. Poroznost materijala se može odrediti jednadžbom

$$\xi = \frac{(\rho_s - \rho_g)}{\rho_s} \quad (3.3)$$

3.8.3 Toplinska vodljivost, λ

Toplinska svojstva građevnih materijala izražavaju se uglavnom njihovom sposobnošću vođenja topline. **Toplinska vodljivost**, λ , je svojstvo građevnog materijala da u manjoj ili većoj mjeri provodi toplinu, a određuje se mjerenjem prema normiranom postupku. Što je toplinska vodljivost, λ , veća, to materijal bolje provodi toplinu. U zračnim porama i šupljinama toplinsko-izolacijskih materijala mogući su, svi mehanizmi prijenosa topline: vođenjem, konvekcijom i zračenjem, ali se za potrebe toplinskih proračuna smatra da se prijenos topline u građevnim materijalima odvija samo po zakonu toplinske vodljivosti. Toplinska vodljivost, λ , predstavlja dakle ekvivalent ukupnom prijenosu topline kroz čvrsti skelet materijala vođenjem i kroz šupljine u materijalu vođenjem, konvekcijom i zračenjem. Iz jednadžbe (2.29) slijedi da je

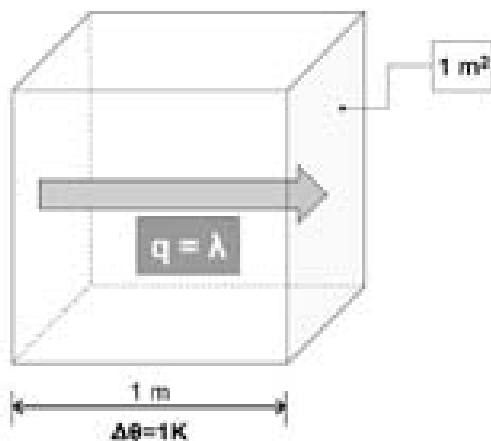
$$\lambda = \frac{\phi \times d}{(A \times \Delta\theta)} \quad (3.4)$$

gdje je:

- λ toplinska vodljivost građevnog materijala ispitnog uzorka, u $\text{W}/(\text{m} \times \text{K})$,
- ϕ izmjereni toplinski tok kroz ispitni uzorak, u W ,

- d debljina sloja građevnog materijala ispitnog uzorka, u m,
 A ploština površine ispitnog uzorka kroz koju prolazi toplinski tok Φ , u m²,
 $\Delta\theta$ konstantna razlika temperatura između obje površine ispitnog uzorka, u K.

Toplinska vodljivost, λ , je, dakle, toplinski tok Φ koji proteče kroz 1 m² ploštine sloja građevnog materijala debljine 1 m, kada razlika temperatura između obje površine tog sloja iznosi 1 K (vidjeti sliku 3.7).



Slika 3.7 Shematski prikaz definicije toplinske vodljivosti, λ , W/(m×K)

Toplinska vodljivost, λ , ovisno o kemijskom sastavu i strukturi materijala mijenja se kod čvrstih materijala u vrlo širokim granicama. Kod metala i njihovih legura, zbog postojanja slobodnih elektrona, toplinska vodljivost je vrlo velika (od $\lambda = 40$ W/(m×K) do $\lambda = 380$ W/(m×K)). Nemetali općenito provode toplinu znatno lošije nego metali, a vrijednost toplinske vodljivosti ovisi bitno o strukturi materijala. Gusti građevni materijali, npr. armirani beton, ima toplinsku vodljivost preko $\lambda = 2,10$ W/(m×K). Kod amorfni materijala, npr. stakla, toplinska vodljivost je znatno manja, od $\lambda = 0,80$ W/(m×K) do $\lambda = 1,10$ W/(m×K). Kod amorfni materijala s makromolekulama, npr. gustih plastičnih materijala, ona je još manja, od $\lambda = 0,12$ W/(m×K) do $\lambda = 0,40$ W/(m×K). Kod toplinsko-izolacijskih materijala, zbog velikog udjela pora ispunjenih zrakom ili nekim drugim plinom, toplinska vodljivost je izuzetno mala i kreće se u granicama od $\lambda = 0,025$ W/(m×K) do $\lambda = 0,10$ W/(m×K). U tablici 3.8 dani su uobičajeni rasponi projektnih vrijednosti toplinske vodljivosti, λ , za normirane toplinsko-izolacijske materijale (norme proizvoda HRN EN 13162 [31] do HRN EN 13172 [40]).

Tablica 3.8 Projektne vrijednosti toplinske vodljivosti, λ , normiranih toplinsko-izolacijskih materijala

Projektne vrijednosti toplinske vodljivosti λ W/(m×K)	0,025	0,030	0,035	0,040	0,045	0,050	0,055	0,060	0,090
Mineralna vuna (MW)									
Ekspandirani polistiren (EPS)									
Ekstrudirana polistirenska pjena (XPS)									
Tvrda poliuretanska pjena (PUR)									

Fenolna pjena (PF)									
Pjenasto staklo (CG)									
Ploče od drvene vune (WW)									
Ploče od ekspandiranog perlita (EPB)									
Ploče od ekspandiranog pluta (ICB)									
Ploče od drvenih vlakana (WF)									

Miran zrak u porama / šuplinama poroznog materijala vrlo slabo provodi toplinu (za zrak $\lambda = 0,024 \text{ W/(m}\times\text{K)}$). Zato se kod poroznih materijala koji u sebi sadrže mnogo zraka smanjuje prijenos topline. Što je materijal porozniji to će njegova toplinska vodljivost, λ , biti manja. Poroznost materijala može se postići bilo umjetno proizvedenim porama pomoću određenog sredstva za pjenjenje (kao kod plinobetona, pjenaste plastike,...), bilo dodavanjem poroznog agregata za ispunu (kao kod laganog betona,...), bilo izradom rupa kod proizvodnje blokova za zidanje (kao kod šuplje blok opeke).

Kod pjenastih poroznih materijala povoljniji je veći broj manjih pora, a kod vlaknastih poroznih materijala povoljniji je položaj vlakana okomito na smjer toplinskog toka. Toplinska vodljivost u šuplinama poroznog materijala može se smanjiti osim finijom poroznom strukturom čvrstog materijala, i tako da se zrak u šuplinama zamijeni s plinom koji lošije provodi toplinu nego zrak, kao što su to visokomolekularni plinovi (npr. CFC s $\lambda = 0,0074 \text{ W/(m}\times\text{K)}$ do $\lambda = 0,0118 \text{ W/(m}\times\text{K)}$), pentan ($\lambda = 0,0135 \text{ W/(m}\times\text{K)}$) ili ugljikov dioksid, CO_2 , ($\lambda = 0,0153 \text{ W/(m}\times\text{K)}$). Daljnja mogućnost za smanjenje toplinske vodljivosti u šuplinama poroznog materijala je smanjenje tlaka zraka u šuplinama (kao kod vakuum toplinske izolacije).

Zbog malih dimenzija šupljina unutar poroznog materijala, prijenos topline konvekcijom u šuplinama nema većeg utjecaja na ekvivalentnu vrijednost toplinske vodljivosti. Ovaj utjecaj je nešto veći kod otvorenih, međusobno povezanih šupljina.

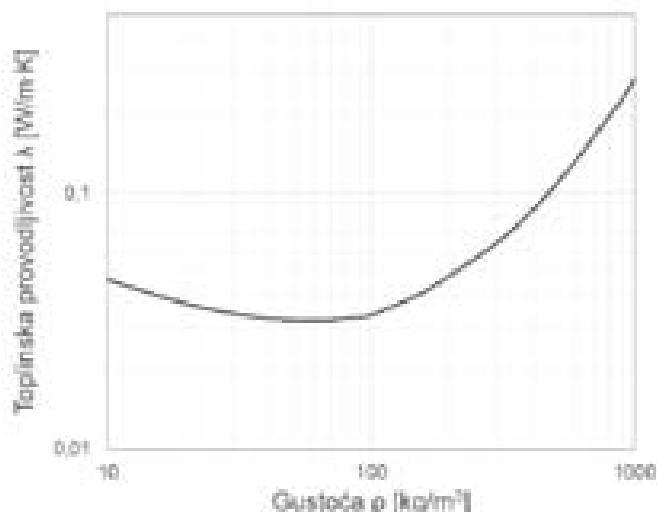
Izmjena topline zračenjem u zračnim šuplinama ovisi o svojstvima zračenja površina koje ograđuju šupljine. Za uobičajene toplinsko-izolacijske materijale faktor emisije zračenja ovih površina je istog reda veličine tako da je doprinos izmjene topline zračenjem u tim poroznim materijalima približno podjednak. Ako bi se, međutim, stjenke šupljina u poroznom materijalu obložile nekim reflektirajućim materijalom tada bi zbog smanjene izmjene topline zračenjem došlo i do smanjenja ekvivalentne toplinske vodljivosti tako obrađenog materijala.

Idealan toplinsko-izolacijski materijal sastojao bi se, dakle, iz vakuuma (bez konvekcije i vođenja topline u porama), sa što je moguće manjom količinom nosivog čvrstog skeleta, koji bi bio od materijala s vrlo malom toplinskom vodljivošću i malim faktorom emisije. Realni toplinsko-izolacijski materijali približavaju se tim uvjetima najčešće proizvodnjom materijala s velikim udjelom obujma sitnih pora ispunjenih zrakom ili nekim plinom male toplinske vodljivosti. Zato su toplinsko-izolacijski materijali, u pravilu, vrlo male obujamske mase, manje od svih drugih građevnih materijala.

Toplinska vodljivost i gustoća materijala

Zbog niske gustoće zraka smanjuje se obujamska masa poroznog materijala. Mnogo zračnih šupljina smanjuje, dakle, ne samo toplinsku vodljivost već i obujamsku masu poroznog materijala. Zato općenito vrijedi da su materijali male obujamske mase ujedno i male toplinske vodljivosti.

Neovisno o strukturi materijala i vrsti materijala čvrste faze, postoji ovisnost (s određenim rasipanjem) između obujamske mase materijala, ρ , (sa zrakom ispunjenim šupljinama) i toplinske vodljivosti, λ . S porastom obujamske mase materijala, ρ , poraste i njegova toplinska vodljivost, λ . Da bi se postigla najmanja moguća toplinska vodljivost treba nastojati da se područje obujamske mase materijala nalazi otprilike između 20 kg/m^3 i 100 kg/m^3 , ovisno o vrsti materijala. Kod još nižih obujamskih mase, zbog povećanja udjela izmjene topline zračenjem, povećava se i ekvivalentna toplinska vodljivost. Na slici 3.8 dan je, za neki fiktivni građevni materijal, načelni prikaz ovisnosti toplinske vodljivosti, λ , o njegovoj obujamskoj mase, ρ .



Slika 3.8 Načelni prikaz ovisnosti toplinske vodljivosti, λ , o njegovoj obujamskoj mase, ρ , za neki fiktivni građevni materijal

Toplinska vodljivost, λ , građevnog materijala određene gustoće nije, međutim, konstantna vrijednost. Ona ovisi kako o sadržaju vlage u materijalu tako i o temperaturi materijala.

Toplinska vodljivost i vlažnost materijala

Utjecaj sadržaja vlage u materijalu na njegovu toplinsku vodljivost je vrlo značajan. S povećanjem vlažnosti materijala znatno raste njegova toplinska vodljivost. To je posljedica činjenice da voda, koja se umjesto zraka nalazi u porama vlažnog materijala, ima toplinsku vodljivost $\lambda = 0,57 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, što je oko 20 puta veća vrijednost od one za zrak. Toplinska vodljivost još više poraste u slučaju smrzavanje vode u materijalu, jer je toplinska vodljivost leda oko $\lambda = 2,3 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, što je oko 4 puta veća vrijednost od toplinske vodljivosti vode.

Zbog velikog utjecaja sadržaja vlage u materijalu na njegovu toplinsku vodljivost, toplinski proračuni ne mogu se provesti dovoljno točno ako nije poznata vlažnost materijala. Kako građevni materijali ugrađeni u zgradu uvijek u sebi sadrže određenu količinu vlage, potrebno je uzeti u obzir njen utjecaj kod ocjenjivanja projektnih vrijednosti toplinske vodljivosti.

U svakom slučaju potrebno je odgovarajućim tehničkim rješenjima spriječiti prekomjerno i nepotrebno povećanje vlage u toplinsko-izolacijskim materijalima tijekom njihova skladištenja, ugradnje i kasnije tijekom korištenja zgrade.

Toplinska vodljivost i temperatura materijala

Na toplinsku vodljivost, λ , utječe i temperatura materijala. S porastom temperature materijala poraste i toplinska vodljivost (osim nekoliko izuzetaka, kao primjerice metala). Razlog tome je povećanje toplinske vodljivosti čvrste tvari materijala i zraka u porama zbog porasta kinetičke energije molekula te povećanje izmjene topline zračenjem u zračnim šupljinama zbog više temperature stjenki šupljina.

U graditeljskoj praksi ovisnost toplinske vodljivosti, λ , o temperaturi nema većeg praktičnog značaja jer se radi o relativno malom rasponu promjena temperatura građevnih materijala ugrađenih u zgradu. Zato se za toplinske proračune u graditeljstvu koriste vrijednosti toplinske vodljivosti, λ , koje vrijede za jedinstvenu srednju vrijednost temperature materijala $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.8.4 Toplinski otpor, R

Učinkovitost toplinsko-izolacijskih proizvoda u obliku ploča ne ovisi samo o toplinskoj vodljivosti materijala već i o debljini proizvoda. Zato se za takve proizvode, kao osnovno toplinsko svojstvo navodi toplinski otpor. **Toplinski otpor**, R , u $\text{m}^2\text{K/W}$ je količnik debljine građevnog proizvoda, d , u m, i toplinske vodljivosti, λ , u $\text{W}/(\text{m}\times\text{K})$, materijala tog proizvoda:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (3.5)$$

Toplinsku vodljivost, λ , i toplinski otpor, R , građevnih materijala i proizvoda zajednički nazivamo **toplinska svojstva**.

Što je veći toplinski otpor, R , nekog proizvoda to on bolje toplinski izolira. Veličina R karakterizira, dakle, toplinsko-izolacijsko djelovanje nekog proizvoda. Zato se u svakodnevnom govoru toplinski otpor često naziva toplinska izolacija.

Zidovi od zidnih elemenata međusobno povezanih mortom za zidanje nisu homogeni i strogo gledajući ne može se govoriti o toplinskoj vodljivosti, λ , zidova. Zidni elementi i mort u reškama između zidnih elemenata različito provode toplinu tako da kroz njih prolaze različiti toplinski tokovi, a i temperature na površinama zida su različite na zidnom elementu i na mortu. Međutim, zbog pravilne izmjene površina zidnih elemenata i površina morta, ako se izmjeri ukupni toplinski tok kroz veću površinu zida (mjerni uzorak barem $1\times 1\text{ m}$) i srednja razlika površinskih temperatura, može se odrediti srednja toplinska vodljivost, λ_m , zida ili srednji toplinski otpor zida, R_m .

3.8.5 Mehanička svojstva

Mehanička svojstva materijala odnose se na ponašanje materijala pod utjecajem vanjskih sila (opterećenja). Pod utjecajem vanjskih sila materijal / proizvod mijenja svoj oblik i obujam, a u njemu se pojavljuju unutarnje sile, raspodijeljene po površini presjeka, koje nazivamo **naprezanje**. Naprezanje se iskazuje u paskalima (oznaka, Pa; $\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2$). Unutarnjim naprezanjima u materijalu, koja se javljaju pod djelovanjem vanjskih sila, čestice se materijala opiru deformaciji. **Deformacijom** nazivamo promjenu oblika i obujma materijala / proizvoda do koje dolazi uslijed djelovanja opterećenja. Iznos i oblik deformacije ovise o vanjskom opterećenju, temperaturi i fizikalnim svojstvima materijala. Deformacija materijala pod djelovanjem vanjskih sila nastavlja se sve dok se ne uspostavi ravnoteža između vanjskih i unutarnjih sila.

Deformacija je **elastična** ako materijal nakon prestanka djelovanja vanjskih sila (rasterećenja) poprimi u potpunosti svoj prvobitni oblik. Deformacija je djelomično elastična ili **elasto-plastična** ako ona nakon rasterećenja ne iščeznu u potpunosti. Preostale deformacije nazivamo trajnim ili **plastičnim deformacijama**. Realni materijali posjeduju u većoj ili manjoj mjeri i svojstvo elastičnosti i svojstvo plastičnosti.

Osnovna mehanička svojstva materijala / proizvoda su: čvrstoća, tvrdoća, žilavost, plastičnost, elastičnost,...

Čvrstoća materijala je mehaničko svojstvo materijala da pruža otpor djelovanju opterećenja tj. plastičnom deformiranju ili kidanju, odnosno lomu. Ovisno o načinu djelovanja vanjske sile razlikuje se: čvrstoća na tlak, čvrstoća na vlak, čvrstoća na savijanje, čvrstoća na odrez (smik), čvrstoća na uvijanje te nosivost na izvijanje. Djelovanje vanjske sile može biti kratkotrajno ili dugotrajno. S obzirom na promjenjivost tijekom vremena ono može biti statičko (ne mijenja se tijekom vremena) i dinamičko (promjenjivo s vremenom).

Čvrstoća na vlak (vlačna čvrstoća) je osnovno mehaničko svojstvo nekog materijala da pruža otpor djelovanju vlačnog naprezanja. Iskazuje se naprezanjem σ pri najvećoj sili F utvrđenoj statičkim vlačnim ispitivanjem ispitne epruvete, početne površine poprečnog presjeka A_0 , pri čemu je $\sigma = F/A_0$. Relativno produljenje ispitne epruvete, dilatacija ili uzdužna duljinska deformacija, ε , jednaka je odnosu produljenja Δl i početne duljine l_0 , $\varepsilon = \Delta l/l_0$.

Kad sila djeluje okomito na površinu proizvoda, tako da nastoji smanjiti njegovu debljinu, govori se o **tlačnom naprezanju**. Ono je jednako odnosu sile F koja djeluje okomito na površinu i ploštine A_0 površine presjeka.

Ovisno o mjestu ugradnje i naprezanjima izloženim tijekom prijevoza na gradilište te kod ugradnje i nakon ugradnje, toplinsko-izolacijski materijali i proizvodi moraju zadovoljiti određena mehanička svojstva.

Tlačna čvrstoća ili tlačno naprezanje kod 10 % sabijanja (stlačivosti)

Da bi se odredilo ponašanje toplinsko-izolacijskog materijala / proizvoda na tlačno naprezanje provodi se ispitivanje na epruvetama u obliku kocke. Epruvete se sabijaju dok se ne postigne sabijenost od 10 % u odnosu na početnu visinu epruvete. Iz krivulje tlačno naprezanje – sabijanje (σ - ε dijagram) može se odrediti ili tlačno naprezanje kod 10 % sabijanja ili, ako ranije dođe do popuštanje materijala epruvete, može se odrediti tlačna čvrstoća s pripadnom deformacijom.

Tlačna čvrstoća ili tlačno naprezanje kod 10 % sabijanja navodi se kao razina u kPa. Označava se kao:

CS(10/Y)x	tlačno naprezanje x kod 10 % sabijanja ili tlačna čvrstoća x,
CS(10)x	tlačno naprezanje x kod 10 % sabijanja,
CS(Y)x	tlačna čvrstoća x

x se iskazuje u kPa.

Primjer 3.1

Oznaka CS(10/Y)200 znači da toplinsko-izolacijski proizvod ima tlačnu čvrstoću, odnosno pokazuje tlačno naprezanje kod 10 % deformacije od najmanje 200 kPa = 0,2 N/mm². Nijedna ispitna vrijednost ne smije biti manja od navedene vrijednosti od 200 kPa.

Vlačna čvrstoća okomito na ravninu ploče

Vlačna čvrstoća je na ploštinu površine poprečnog presjeka ispitne epruvete svedena najveća vlačna sila kod vlačnog ispitivanja do sloma. Ona označava čvrstoću strukture materijala i povezanosti između različitih slojeva kod višeslojnog toplinsko-izolacijskog proizvoda. Vlačna naprezanja može izazvati sisajuće djelovanje vjetra.

Vlačna čvrstoća okomito na ravninu ploče navodi se kao razina, a označava se s TRx, gdje je x vrijednost vlačne čvrstoće u kPa.

Primjer 3.2

Oznaka TR50 znači da toplinsko-izolacijski proizvod ima vlačnu čvrstoću od najmanje 50 kPa = 0,05 N/mm². Nijedna ispitna vrijednost ne smije biti manja od navedene vrijednosti od 50 kPa.

Ponašanje na puzanje

Puzanje je pojava porasta plastične deformacije tijekom vremena pri konstantnom naprezanju. To svojstvo je značajno za toplinsko-izolacijske materijale / proizvode koji će, ugrađeni u zgradu, biti podvrgnuti trajnom opterećenju.

Ponašanje na puzanje toplinsko-izolacijskog proizvoda navodi se kao razina, a označava se kao $CC(i_1/i_2/y)\sigma_c$. CC je skraćenica od engleskog naziva „Compressive Creep“. i_1 je vrijednost ukupne promjene dimenzija u %, a i_2 vrijednost deformacije puzanja u %. Za neke toplinsko-izolacijske materijale ove se vrijednosti navode u milimetrima. Oznaka y (skraćenica od „years“) stoji za vremensko razdoblje u godinama tijekom kojeg djeluje tlačno naprezanje σ_c , u kPa, za koje vrijede dane vrijednosti deformacija u danom vremenskom razdoblju.

Primjer 3.3

Oznaka $CC(2/1,5/50)100$ znači da kod nazivnog tlačnog naprezanja od $100 \text{ kPa} = 0,10 \text{ N/mm}^2$, kroz vrijeme od 50 godina dolazi do ukupne deformacije od 2 %, a deformacija puzanja iznosi 1,5 %. Udio deformacije puzanja u ukupnoj deformaciji iznosi, dakle, $1,5 / 2,0 = 0,75$ ili 75 %.

Čvrstoća na savijanje

Ispitivanje se može provesti na uzorcima proizvoda isporučenih dimenzija ili na izrezanim ispitnim epruvetama debljine kao kod isporučenog proizvoda.

Ako kod ispitivanja ne dođe do loma ispitnog uzorka, iz krivulje sila-savijanje odredi se naprezanje na savijanje s pripadnim progibom.

Kod ekspaniranog polistirena ovaj podatak karakterizira kvalitetu međusobnog zavarivanja ekspaniranih granula polistirena.

Čvrstoća na savijanje navodi se kao razina, a označava se s BSi , gdje je i dobivena vrijednost naprezanja.

Primjer 3.4

Oznaka $BS50$ znači da toplinsko-izolacijski proizvod ima čvrstoću na savijanje najmanje $50 \text{ kPa} = 0,05 \text{ N/mm}^2$.

3.8.6 Upijanje vode

Da bi se ocijenilo upijanje vode od strane toplinsko-izolacijskih materijala koriste se dva kriterija:

- upijanje vode procesom difuzije vodene pare, i
- neposredno upijanje vode kod polaganja ispitnih epruveta u vodu.

Upijanje vode procesom difuzije

Kod ispitivanja upijanja vode procesom difuzije vodene pare, ispitna epruveta materijala podvrgne se razlici parcijalnih tlakova vodene pare tijekom vremenskog razdoblja od 28 dana. Probni uzorak se postavi iznad vodene kupke temperature $50 \text{ }^\circ\text{C}$ i prekrije hladnom pločom koja se održava na temperaturi $1 \text{ }^\circ\text{C}$. Svaki 7 dana probni uzorak se okrene.

Upijanje vode procesom difuzije navodi se u razinama, a označava se s $WD(V)x$. x je upijanje vlage u obujamskim postocima. Znak V označava da se radi o obujamskim postocima. Navedena vrijednost razine ne smije se prekoračiti.

Primjer 3.5

Oznaka $WD(V)2$ znači da toplinsko-izolacijski materijal, kod ispitivanja difuzije vodene pare, ne upija vlage više od 2 % obujamskog udjela.

Upijanje vode kod uranjanja u vodu

Kod ispitivanja neposrednog upijanja vode kod uranjanja u vodu razlikuju se slijedeći slučajevi:

- upijanje vode kod kratkotrajnog djelomičnog uranjanja, oznaka WSx,
- upijanje vode kod dugotrajnog djelomičnog uranjanja, oznaka WL(P)x,
- upijanje vode kod dugotrajnog potpunog uranjanja, oznaka WL(T)x.

Kod ispitivanja upijanja vode kratkotrajnim djelomičnim uranjanjem, ispitna epruveta se sa svojom donjom stranom zamoči u vodu u trajanju od 24 sata. Mjerenjem mase uzorka prije i nakon uranjanja izračuna se promjena mase uzorka tj. masa upijene vode. Dobivena vrijednost svede se na kvadratni metar materijala.

Kod ispitivanja upijanja vode dugotrajnim uranjanjem u vodu, ispitna epruveta se djelomično ili potpuno uroni u vodu u trajanju od 28 dana. Zatim se odredi masa upijene vode i svede na kvadratni metar materijala kao i u prethodnom slučaju.

Primjer 3.6

Oznaka WS0,5 znači da toplinsko-izolacijski materijal, kod kratkotrajnog djelomičnog uranjanja u vodu, upije vode najviše do 0,5 kg/m².

Oznaka WL(P)1,5 znači da toplinsko-izolacijski materijal, kod dugotrajnog djelomičnog uranjanja u vodu, upije vode najviše do 1,5 kg/m².

Oznaka WL(T)0,9 znači da toplinsko-izolacijski materijal, kod dugotrajnog potpunog uranjanja u vodu, upije vode najviše do 0,9 kg/m².

3.8.7 Otpornost na izmjenično zamrzavanje – odmrzavanje

Otpornost na izmjenično zamrzavanje – odmrzavanje utvrđuje se kroz određivanje promjene upijanja vode i promjene tlačne čvrstoće odnosno tlačnog naprezanja kod 10 % sabijanja, nakon provedenih 300 ciklusa zamrzavanja – odmrzavanja. Označava se s FTx. Ovdje je x oznaka razine dopuštenog upijanja vode, a ne vrijednost te razine. Npr. FT2 znači da upijanje vode izraženo u obujamskom udjelu, nakon provedenih ciklusa zamrzavanja – odmrzavanja, ne smije biti veće od 1 %. Upijanje vode se određuje ili procesom difuzije vodene pare ili dugotrajnim potpunim uranjanjem u vodu.

3.8.8 Faktor otpora difuziji vodene pare

Faktor otpora difuziji vodene pare, μ , pokazuje koliko je puta veći otpor difuzijskom prolasku vodene pare kroz sloj promatranog građevnog materijala nego kroz sloj mirnog zraka jednake debljine i jednake temperature. To je omjerna veličina bez dimenzije. Za zrak on je jednak 1,0. Faktor μ je svojstvo materijala koje ovisi o gustoći materijala i strukturi njegovih pora.

Faktor otpora difuziji vodene pare, μ , navodi se u razinama, a označava s MUx, gdje je x vrijednost faktora. Niti jedna ispitna vrijednost ne smije biti manja od objavljene vrijednosti razine.

Primjer 3.7

Oznaka MU100 znači da je, za toplinsko-izolacijski materijal, vrijednost faktora otpora difuziji vodene pare, μ , najmanje 100.

3.8.9 Stabilnost dimenzija

Stabilnost dimenzija toplinsko-izolacijskih materijala može se ispitati za različite rubne uvjete i to:

- u standardnoj klimi,
- kod određenih uvjeta temperature okolnog zraka,
- kod određenih uvjeta temperature i vlažnosti okolnog zraka.

Stabilnost dimenzija u standardnoj klimi

Standardna klima je određena temperaturom zraka (23 ± 2) °C i relativnom vlažnosti zraka (50 ± 5) %.

Stabilnost dimenzija toplinsko-izolacijskog materijala ispituje se utvrđivanjem relativne promjene dimenzija (duljine i širine) ispitnih uzoraka nakon njihova smještaja u prostoru sa standardnom klimom u trajanju od najmanje 28 dana. Rezultat ispitivanja se navodi u razredima, a označava se s DS(N)x, gdje je x broj razreda. Relativne promjene dimenzija toplinsko-izolacijskog materijala ne smiju prekoračiti vrijednosti navedene kao granične za dotični razred. Taj podatak je važan za toplinsko-izolacijske materijale podložne procesu skupljanja.

Primjer 3.8

Oznaka DS(N)5 znači da nije prekoračena relativna promjena dimenzija od $\pm 0,5$ %.

Stabilnost dimenzija kod određenih uvjeta temperature i vlažnosti

Ovo ispitivanje se provodi u temperaturnim uvjetima različitim od onih kod standardne klime. Kod toga se mogu istovremeno promijeniti ili ne promijeniti uvjeti vlažnost zraka u odnosu na uvjete standardne klime. I kod ovog ispitivanja mjeri se relativna promjena dimenzija ispitnih tijela nakon njihova smještaja u željenim klimatskim uvjetima u trajanju od (24 ± 1) h ili od (48 ± 1) h. Svojsvo se navodi u razinama, a označuje s DS(T,H)x. Umjesto T navodi se temperatura zraka kod ispitivanja, a umjesto H relativna vlažnost zraka. X je broj razreda.

Primjer 3.9

Oznaka DS(70,90)1 znači da relativna promjena dimenzija (duljine, širine i debljine) ne smije biti veća od 2 % nakon 48 sati smještaja ispitnih tijela u prostor temperature zraka 70 °C i relativne vlažnosti zraka 90 %.

3.8.10 Dinamička krutost

Za toplinsko-izolacijske materijale koji moraju zadovoljiti i zahtjeve u pogledu izolacije od zvuka udara (ugradnja u plivajuće podove), mora se objaviti i podatak o dinamičkoj krutosti materijala.

U mehanici krutost, s , općenito, označava otpornost neke strukture na deformacije. Što je struktura kruća, to će, uz jednako opterećenje, njene deformacije biti manje. Dinamička krutost, s' , označava elastično ponašanje sloja toplinske izolacije ugrađenog kao međusloj u višeslojnom građevnom dijelu zgrade, kod promjenjive mehaničke pobude. Što je manja dinamička krutost izolacijskog sloja to su bolja zvuko-izolacijska svojstva višeslojnih građevnih dijelova (npr. veće je smanjenje udarnog zvuka ΔL plivajućeg poda izvedenog s takvim izolacijskim slojem).

Dinamička krutost se označava sa s' , navodi u MN/m^3 i određuje jednačinom:

$$s' = \frac{E_{\text{dyn}}}{d} \quad (3.6)$$

gdje je:

E_{dyn} dinamički modul elastičnosti, u MN/m^2 ,
 d debljina toplinsko izolacijskog sloja, u m.

Modul elastičnosti, E , u Pa ($\text{Pa} = \text{N/m}^2$), je koeficijent razmjernosti između naprezanja, σ , i deformacije, ε , pri jednoosnom naprezanju ($\sigma = E \times \varepsilon$). Kod deformacija s višim frekvencijama, to znači u području čujnog zvuka, naziva se dinamički modul elastičnosti. Modul elastičnosti

raste s frekvencijom. Deformacija kod statičkog opterećenja je veća nego kod dinamičkog djelovanja.

Dinamička krutost toplinsko izolacijskih materijala navodi se u razinama i označava sa SD_x . x je ovdje vrijednost dinamičke krutosti u MN/m^3 , koja se ne smije prekoračiti.

Primjer 3.10

Oznaka SD_{30} znači da za toplinsko-izolacijski materijal dinamička krutost mora biti $s' \leq 30 MN/m^3$.

3.8.11 Ponašanje u uvjetima požara

3.8.11.1 Gorenje

Gorenje je kemijska reakcija gorivog materijala s oksidansom (najčešće kisikom), koja se odvija uz oslobađanje topline (egzotermni proces) [43]. Za materijal koji ima sposobnost gorenja kažemo da je **goriv**. Materijal koji nema sposobnost gorenja u specificiranim uvjetima je **negoriv**. Za gorenje je potrebna dovoljna količina gorivog materijala i oksidacijskog sredstva (najčešće kisika) i prikladni izvor zapaljenja. **Izvor zapaljenja** je izvor energije koja uzrokuje početak gorenja. Gorenje započinje kada je prekoračena **temperatura zapaljenja** (minimalna temperatura pri kojoj može započeti gorenje), koja je različita za pojedine gorive materijale. Djelovanjem izvora zapaljenja poraste temperatura gorivog materijala i započinje njegova nepovratna kemijska razgradnja. Taj proces kemijske razgradnje materijala zbog djelovanja topline naziva se **piroliza**. Nastali gorivi plinovi pirolize reagiraju s oksidansom (kisikom iz zraka) uz istovremeno oslobađanje topline i svjetla u obliku plamena ili samo žara. Kad jednom započne proces gorenja on se dalje sam održava i traje sve dok se ne potroši gorivi materijal ili oksidans.

Ako svi elementi u gorivom materijalu u potpunosti oksidiraju govori se o potpunom izgaranju. Kod nepotpunog izgaranja dio produkata pirolize ostaje neizgoren i najčešće se pojavljuje u obliku različitih štetnih i otrovnih plinova i dima. **Dim** je vidljivi dio plinova koji nastaju kod gorenja, uključivo i lebdeće sitne čestice tvari.

Gorenje gorivih plinova pirolize praćeno emisijom svjetlosti nazivamo gorenje s plamenom. **Plamen** je područje gorenja plinovite faze materijala. Svojstvo materijala da gori s plamenom nazivamo **zapaljivost**, a za takav materijal kažemo da je **zapaljiv**. Boja i temperatura plamena ovise o vrsti gorivog materijala. Materijal koji ne gori s plamenom je **nezapaljiv**.

Gorenje materijala u krutoj fazi bez plamena, ali uz emisiju svjetla iz područja gorenja, nazivamo **žarno gorenje**.

Tinjanje je gorenje bez plamena i bez emisije vidljivog svjetla. Ono je, u pravilu, praćeno porastom temperature te razvojem dima i raznih plinova.

Samostalno (samoodrživo) gorenje, koje je namjerno tako postavljeno da proizvodi korisne učinke i čiji je obujam kontroliran vremenski i prostorno, nazivamo **vatra**.

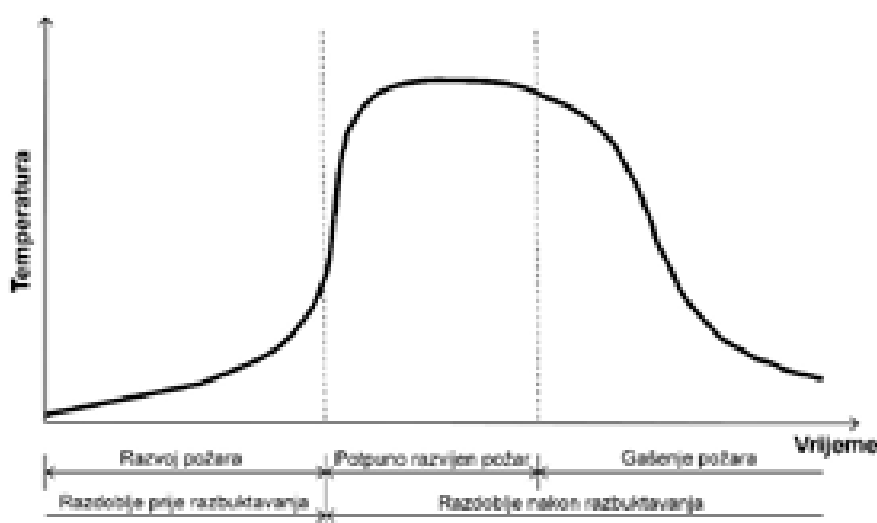
3.8.11.2 Nastanak i razvoj požara

Požar je samostalno (samoodrživo) gorenje koje se nekontrolirano razvija u prostoru i vremenu. To je burno gorenje koje razara prirodu (šumski požari,...) i sve što je čovjek stvorio (požari u zgradama,...). Osim materijalne štete požar ugrožava i ljudske živote. Najveći broj požara ima ljudsko porijeklo, bilo da se radi o nepažnji ili zlonamjernosti, ili pak tehnički uzrok: kratak spoj, iskrenje,...

Da bi započelo gorenje nekog predmeta, dio materijala tog predmeta mora preći u plinovito stanje, nastali plinovi se moraju pomiješati sa zrakom i zapaliti se. Zapaljenje se događa pomoću izvora zapaljenja. Djelovanjem topline oslobođene kod zapaljenja, sve veća količina gorivog materijala prelazi u plinovitu fazu, tako da se požar sam podržava i dalje se širi.

Svaki požar u prostoriji započinje s malim izvorom zapaljenja (npr. goruća šibica ili opušak bačeni u koš za papir). Izvor zapaljenja zagrijava i toplinski razgrađuje gorivi materijal koji se nalazi u njegovoj blizini. Kad se steknu za to uvjeti, gorivi materijal se zapali (npr. zapaljenje sadržaja koša za papir). Nakon te početne faze, požar ulazi u fazu razvoja i širenja (npr. vatra zapaljenog koša za papir širi se na okolne gorive materijale). Ova faza rasta požara traje određeno vrijeme, da bi na kraju ove faze, temperatura u prostoriji porasla na oko 400 °C do 600 °C, ovisno o vrsti gorivog materijala i svojstvima prostorije. Kada temperatura dovoljno poraste naglo (nenadano) dolazi do razbuktavanja požara (flash-over). **Razbuktavanje** je prijelaz u fazu požara u kojoj cjelokupne površine gorivih materijala u nekom zatvorenom prostoru sudjeluju u požaru. Razbuktavanje je, dakle, prijelaz lokalnog požara u potpuno razvijen požar ili opći požar. U potpuno razvijenom požaru svi gorivi materijali u prostoriji sudjeluju u požaru. Temperatura u prostoriji poraste do oko 1100 °C. Kroz otvore u vanjskim zidovima sukljaju veliki plamenovi. Brzina gorenja u fazi općeg požara određena je prije svega dotokom svježeg zraka potrebnog za gorenje. Nakon što se potroši većina gorivih materijala i smanji nastajanje gorivih plinova pirolize, započinje faza gašenja požara.

Na slici 3.9 shematski je prikazan vremenski tijek razvoja požara u prostoriji.



Slika 3.9 Shematski prikaz vremenskog tijeka razvoja požara u prostoriji

3.8.11.3 Ponašanje građevnih materijala i proizvoda te građevnih dijelova zgrade u uvjetima požara

Jedan od temeljnih zahtjeva za građevine, kojeg treba ispuniti kod projektiranja i izgradnje zgrada, jest zahtjev sigurnosti u slučaju požara. Zgrada mora biti projektirana i izgrađena tako da u slučaju izbijanja požara korisnici zgrade mogu neozlijeđeni napustiti zgradu te da spasilačke ekipe / vatrogasci mogu sigurno intervenirati. Građevni proizvodi mogu igrati značajnu ulogu u nastanku i širenju požara. Zato ponašanje ugrađenih građevnih materijala i proizvoda mora biti takvo da nastajanje i širenje požara i dima u zgradi budu ograničeni, a nosivost građevnih dijelova zgrade, u slučaju izbijanja požara, da bude očuvana tijekom određenog vremena. Pod **ponašanjem u požaru**, općenito podrazumijevamo promjenu fizikalnih i /ili kemijskih svojstava građevnih materijala i proizvoda ili građevnih dijelova

zgrade koji su izloženi djelovanju požara. Kod toga se razlikuje „reakcija na požar“ i „otpornost na požar“.

Reakcija na požar građevnog materijala ili proizvoda je njegovo ponašanje u smislu doprinosa požaru kojem je izložen, njegovom vlastitom razgradnjom, kod specificiranih uvjeta.

Otpornost na požar je sposobnost građevnog dijela zgrade da kod normiranog ispitivanja, kroz određeno vrijeme, sačuva zahtijevanu nosivost i / ili cjelovitost i / ili toplinsku izolaciju i / ili druga zahtijevana svojstva.

U razdoblju od pojave požara do njegova razbuktavanja potrebno je sigurno evakuirati korisnike zgrade. Da bi se ta zadaća uspješno provela, važno je kako se ugrađeni građevni materijali i proizvodi ponašaju u smislu njihove reakcije na požar. U razdoblju nakon razbuktavanja požara, važno je da nosivi građevni dijelovi zgrade sačuvaju svoju nosivost i spriječe širenje požara na susjedne požarne sektore ili susjedne zgrade. Zato je, s gledišta sigurnosti u slučaju požara, u ovom razdoblju razvoja požara važna otpornost na požar građevnih dijelova zgrade.

3.8.11.4 Reakcija na požar

Građevni proizvodi (osim podnih obloga i materijala za toplinsku izolaciju cijevi), uključivo i toplinsko-izolacijske materijale, proizvode i sustave za toplinsku izolaciju vertikalnih i horizontalnih građevnih dijelova zgrade, razvrstavaju se s obzirom na svoju reakciju na požar u sedam razreda označenih s A1, A2, B, C, D, E i F (vidjeti normu HRN EN 13501-1, [44]). Razredi su poredani po svojstvima materijala u pogledu njihova doprinosa širenju požara, od materijala razreda A1 koji su najpovoljniji (negorivi materijali) do materijala razreda F koji su u pogledu širenja požara najnepovoljniji. Navedeni razredi materijala nazivaju se **eurorazredima** kako bi se označilo da su dobiveni u skladu s europskim usklađenim sustavom razredbe građevnih proizvoda prema njihovoj reakciji na požar. Građevni materijali i proizvodi se svrstavaju u određeni eurorazred temeljem rezultata ispitivanja reakcije materijala na požar.

U razred A1 svrstavaju se materijali i proizvodi koji su negorivi. Oni ne sadrže organske sastojke ili su ti sastojci prisutni u vrlo ograničenim količinama. Ti materijali ne doprinose razvoju požara ni u potpuno razvijenom požaru. Pod određenim uvjetima, poznati materijali stabilnih svojstava kao što su metali i anorganski mineralni materijali, mogu se svrstati u eurorazred A1 bez dodatnog ispitivanja (odluka 96/603/EEZ, [45]).

U eurorazred A2 svrstavaju se materijali koji su vrlo malo gorivi, tj. koji kod gorenja oslobađaju neznatnu količinu topline. Oni se moraju ispitati kako bi se utvrdio njihov doprinos širenju požara.

U eurorazred B svrstavaju se građevni proizvodi čiji je doprinos razbuktavanju požara vrlo ograničen, a u eurorazred C oni čiji je doprinos razbuktavanju požara ograničen. Građevni proizvodi svrstani u eurorazred D značajno doprinose razbuktavanju požara.

Zapaljivi građevni proizvodi čiji je doprinos razbuktavanju požara vrlo značajan pripadaju eurorazredu E.

Proizvodi koji ne zadovoljavaju kriterije za svrstavanje u razred E ili proizvodi za koje nisu propisana minimalna svojstva u pogledu reakcije na požar pa stoga nisu ispitani, svrstavaju se u eurorazred F.

Važno je razlikovati građevne materijale i proizvode koji ne doprinose općem požaru od materijala koji vlastitom razgradnjom doprinose općem požaru. Građevni materijali i proizvodi svrstani u eurorazrede A1, A2 i B ne doprinose općem požaru.

Da bi se građevni proizvodi svrstali u određeni eurorazred reakcije na požar moraju zadovoljiti određene zahtjeve. Smatra se da proizvodi svrstani u dani eurorazred zadovoljavaju sve zahtjeve svih nižih razreda.

Osim razredbe prema svojstvu širenja požara, sustav eurorazreda obuhvaća i dvije dodatne razredbe: razredbu prema stvaranju dima i razredbu prema stvaranju gorućih kapi / čestica.

Nastajanje dima u požaru je vrlo značajna karakteristika gorivih materijala. Smatra se da je za 2/3 ljudskih žrtava u požaru odgovoran dim. Sklonost nastajanju dima tijekom požara ispituje se samo za razrede A2, B, C i D. Za proizvode svrstane u razred A1 pretpostavlja se da ne predstavljaju nikakvu opasnost od stvaranja dima. Dodatnu razredbu za proizvodnju dima označavamo sa s1, s2 i s3. Proizvodi koji kod pirolize oslobađaju vrlo malo ili gotovo nula dima svrstavaju se u razred s1. Proizvodi koji oslobađaju ograničenu količinu dima (srednje gusti dim) pripadaju razredu s2. Građevni materijali i proizvodi koji oslobađaju velike količine dima svrstavaju se u razred s3 (nema propisane gornje granice za proizvodnju dima).

Goruće kapljice / čestice potpomažu širenje požara, a mogu prouzročiti i povredu ljudi (opekline kože). Dodatna razredba za goruće kapljice / čestice označava se s d0, d1 i d2. Proizvodi svrstani u eurorazred A2, B, C i D, kod kojih tijekom ispitivanja ne dolazi do stvaranja gorućih kapljica / čestica svrstavaju se u razred d0. Ako goruće kapljice / čestice tijekom ispitivanja gore manje od 10 sekunda, materijal se svrstava u razred d1, a ako gore dulje od 10 sekunda, materijal pripada razredu d2 (nema postavljene gornje granice za gorenje kapljica / čestica).

U nastavku je dan prikaz svih kombinacija eurorazreda reakcije na požar za građevne materijale i proizvode namijenjene za oblaganje zidova i stropova.

A1

A2-s1,d0	A2-s1,d1	A2-s1,d2
A2-s2,d0	A2-s2,d1	A2-s2,d2
A2-s3,d0	A2-s3,d1	A2-s3,d2
B-s1,d0	B-s1,d1	B-s1,d2
B-s2,d0	B-s2,d1	B-s2,d2
B-s3,d0	B-s3,d1	B-s3,d2
C-s1,d0	C-s1,d1	C-s1,d2
C-s2,d0	C-s2,d1	C-s2,d2
C-s3,d0	C-s3,d1	C-s3,d2
D-s1,d0	D-s1,d1	D-s1,d2
D-s2,d0	D-s2,d1	D-s2,d2
D-s3,d0	D-s3,d1	D-s3,d2

E

E-d2

F

Sustav eurorazreda zasniva se na požarnom scenariju koji se temelji na razvoju požara u prostoriji. **Požarni scenarij** je detaljan opis uvjeta u kojima se odvija jedna ili više faza požara, od zapaljenja do završetka gorenja, nekog realnog požara ili simuliranog požara u okviru ispitivanja u prirodnoj veličini. Za sve građevne proizvode (osim podnih obloga i materijala za toplinsku izolaciju cijevi), smatra se da požar nastaje u prostoriji, u njoj se razvija i, eventualno, ovisno o svojstvima ugrađenih građevnih proizvoda, dolazi do razbuktavanja požara (referentni požarni scenarij). Za svaku od tri faze razvoja požara u prostoriji (pojava plamena, razvoj i širenje požara te razbuktavanje požara i njegovo prerastanje u opći požar) utvrđena je odgovarajuća požarna situacija. **Požarna situacija** je stanje razvoja požara karakterizirano vrstom i jakošću toplinskog djelovanja na uključene

građevne proizvode. Pod tim različitim toplinskim opterećenjima (požarnim situacijama) ocjenjuje se ponašanje građevnih proizvoda.

1. Faza razvoja požara

To je početak požara. Promatrani građevni proizvod izloži se početnom djelovanju malog plamena, na ograničenoj površini. Promatra se ponašanje građevnog proizvoda u pogledu obujma gorenja u funkciji vremena te eventualno padanje gorućih kapljica / čestica materijala. Ispitivanje u svrhu razredbe proizvoda provodi se prema HRN EN 11925-2, [46], a rezultati ispitivanja se koriste za razredbu u razrede B, C, D i E.

2. Faza razvoja požara

To je razvoj požara prije razbuktavanja. Ta faza požara simulira se pomoću nekog predmeta u požaru, smještenog u uglu prostorije, koji odaje određeni toplinski tok prema susjednim građevnim dijelovima zgrade. Promatra se ponašanje građevnih proizvoda u pogledu širenja plamena, odavanja topline i dima te eventualno padanje gorućih kapljica / čestica materijala. Ispitivanje se provodi prema HRN EN 13832, [47], (ispitivanje gorenjem pojedinačnog predmeta, tzv. SBI ispitivanje), a rezultati ispitivanja se koriste za razredbu u razrede A2, B, C i D.

3. Faza razvoja požara

To je potpuno razvijeni požar u prostoriji nakon razbuktavanja. Svi građevni proizvodi u prostoriji sudjeluju u požaru. Promatra se odavanje / ne odavanje topline i dima od strane građevnih proizvoda. Ispitivanje se provodi prema HRN EN ISO 1182, [48] (ispitivanje negorivosti) i HRN EN ISO 1716, [49] (ispitivanje topline izgaranja), a rezultati ispitivanja se koriste za razredbu u razrede A1 i A2.

Sustav eurorazreda za reakciju na požar zasniva se na ispitivanjima ispitnih uzoraka u malom mjerilu, prema gore navedenim normama. Ocjene proizvoda na temelju njihova ponašanja kod SBI ispitivanja u malom mjerilu usporedive su s ocjenama njihova ponaša kod ispitivanja istih proizvoda u velikom mjerilu. Naime, osnova za ocjenu reakcije na požar građevnih proizvoda bilo je ispitivanje u velikom mjerilu (prirodnoj veličini) koje predstavlja referentni požarni scenarij razvoja požara u prostoriji, nazvan „room corner“. Za to ispitivanje koristila se norma ISO 9705 [50] – ispitivanje u uglu prostorije. Kao glavna podloga razredbe uzeto je vrijeme od početka požara do njegova razbuktavanja.

Ispitivanje u prirodnoj veličini (velikom mjerilu) je ispitivanje kojim se simulira primjena ispitivanog građevnog proizvoda uzimajući u obzir njegove stvarne dimenzije, stvarne uvjete ugradnje i stvarne uvjete u okolišu. Ispitivanja reakcije na požar prema ISO 9705 [50] provodi se u prostoriji dimenzija 2,4×3,6×2,4 metra, čija su tri zida i strop obloženi proizvodom koji se ispituje. U jednom od kutova prostorije, gorenje nekog predmeta simulira se plamenikom koji odaje toplinsku snagu 100 kW za vrijeme od 10 minuta i zatim snagu od 300 kW za vrijeme drugog vremenskog intervala od 10 minuta.

Da bi se odredile granice između pojedinih razreda reakcije na požar, opisanom metodom ispitano je ukupno 28 različitih građevnih proizvoda [51]. Kao podloga glavne razredbe građevnih proizvoda prema njihovoj reakciji na požar uzeto je vrijeme do razbuktavanja i pripadajući parametri. Prema rezultatima ispitivanja svi ispitani proizvodi svrstani su u tri grupe, ovisno o tome da li je tijekom ispitivanja došlo do razbuktavanja požara i ako je do te pojave došlo, ovisno o proteklom vremenu od početka ispitivanja do razbuktavanja. Smatra se da do razbuktavanja požara (općeg požara) u prostoriji, prema ISO 9705, dolazi kada

ukupni toplinski tok prijeđe 1000 kW. Taj ukupni toplinski tok posljedica je dijelom gorenja plamenika, a drugim dijelom, gorenja ispitivanog građevnog proizvoda. Ako prag od 1 000 kW nije dosegnut kroz vrijeme rada plamenika (20 minuta), proizvod se svrstava u eurorazred B. Ako je prag od 1 000 kW dosegnut između 10. i 20. minute, dakle, kad plamenik odaje 300 kW, a to znači da gorenje ispitivanog proizvoda odaje više od 700 kW, proizvod pripada eurorazredu C. Ako je prag dosegnut između 2. i 10. minute, dakle, kada plamenik odaje 100 kW, a to znači da gorenje ispitivanog proizvoda odaje više od 900 kW, proizvod pripada eurorazredu D. Ako do rasplamsavanja požara dolazi još ranije tj. prije 2. minute proizvod pripada eurorazredu E.

Imajući u vidu troškove ispitivanja u pravoj veličini razrađena je u normi HRN EN 13823 [47] metoda ispitivanja, poznata pod nazivom SBI (eng.: Single Buring Item). Isti građevni proizvodi koji su ispitani u velikom mjerilu po normi ISO 9705 [50] ispitani su i u malom mjerilu (po tri ispitna uzorka) po normi HRN EN 13823 [47]. Statističkom obradom rezultata ispitivanja utvrđena je korelacija između ispitivanja SBI i referentnog ispitivanja prema ISO 9705 [50]. Ispitivanje SBI omogućava, dakle, da se građevnim proizvodima dodijeli razred reakcije na požar jednak onome koji bi se dobio ispitivanjem referentnim pokusom u velikom mjerilu.

Građevne proizvode, načelno, treba ispitivati na način da se razredba reakcije na požar odnosi na njihova svojstva u krajnjoj primjeni. **Krajnja primjena** odnosi se na tipične uvjete u kojima će građevni proizvod biti ugrađen u građevinu. Ona obuhvaća količinu, orijentaciju, položaj u odnosu na susjedne proizvode, način pričvršćenja i sl. Kako potencijalni doprinos širenju požara može biti različit u ovisnosti o krajnjoj primjeni proizvoda, pojedini proizvod može biti svrstan u više različitih razreda. Područje primjene razreda odnosi se na raspon krajnje primjene za koji se smatra da vrijedi za dani razred.

Sustavi ocjenjivanja i provjere stalnosti svojstava toplinsko izolacijskih proizvoda obično se određuju prema eurorazredu reakcije na požar u koji je svrstan promatrani proizvod i prema opasnosti da se tijekom proizvodnje promjeni njegova reakcija na požar. Tako za toplinsko izolacijske proizvode svrstane u eurorazred reakcije na požar A1, A2, B ili C, kod kojih postoji opasnost da se reakcija na požar promjeni tijekom proizvodnje (npr. s dodatcima usporivača požara ili zbog promjene sastava) potrebno je primijeniti sustav ocjenjivanja i provjere stalnosti svojstava 1. Za proizvode svrstane u gornje razrede kod kojih nema opasnosti od promjene reakcije na požar tijekom proizvodnog procesa, dovoljno je primijeniti sustav ocjenjivanja i provjere stalnosti svojstava 3. Za materijale razreda A1 za koje se ne zahtjeva ispitivanje reakcije na požar i za građevne proizvode svrstane u eurorazrede D, E ili F dovoljno je primijeniti sustav ocjenjivanja i provjere stalnosti svojstava 4.

3.9 Objavljene toplinske vrijednosti

Toplinska vrijednost (vrijednost toplinskog svojstva) je zajednički naziv za vrijednost toplinske vodljivosti, λ , ili vrijednost toplinskog otpora, R .

Objavljena toplinska vrijednost, λ_D ili R_D , je očekivana vrijednost toplinskog svojstva građevnog materijala ili proizvoda ocjenjena iz izmjerenih podataka uz referentne uvjete temperature i vlažnosti, dana za određen udio i razinu povjerenja (statistička obrada), i koja odgovara ekonomski prihvatljivom uporabnom vijeku uz uobičajene uvjete.

Predviđena uporaba nekog materijala ili proizvoda odnosi se na ulogu koja je namijenjena materijalu odnosno proizvodu u ispunjenju temeljnih zahtjeva u vezi s građevinom. Vijek uporabe je vremensko razdoblje u kojem se svojstva građevine u koju je ugrađen promatrani materijal odnosno proizvod mogu održati na razini koja omogućava ispunjenje temeljnih zahtjeva. Ekonomski prihvatljivi uporabni vijek pretpostavlja uzimanje u obzir svih troškova uporabe, održavanja, popravaka,..., koji nisu u nerazmjeru s vrijednosti dotičnog materijala odnosno proizvoda.

Mjerenje vrijednosti toplinske vodljivosti, λ , ili toplinskog otpora, R , provodi se primjenom slijedećih metoda:

- metodom zaštićene vruće ploče, prema HRN ISO 8302 [52],
- tokomjernom metodom, prema HRN ISO 8301 [53],
- metodom umjerene i zaštićene vruće kutije, prema HRN EN ISO 8990 [54].

Postupak određivanja toplinske vodljivosti, λ , i toplinskog otpora, R , za proizvode velikog i srednjeg toplinskog otpora (izraziti toplinsko-izolacijski materijali) dan je u HRN EN 12667 [55] ili HRN EN 12939 [56].

Ispitivanje se provodi pri srednjoj temperaturi ispitnog uzorka $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ nakon skladištenja uzorka na temperaturi $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ i pri 50 % relativne vlažnosti zraka do postizanja ravnotežne vlažnosti. S $u_{23,50}$ označava se ravnotežni sadržaj vlage u materijalu koji se uspostavi kad se materijal nalazi u zraku temperature $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$ i relativne vlažnosti 50 %.

Toplinski otpor, R_i , i toplinska vodljivost, λ_i , ispitnog uzorka i , mogu se mjeriti i pri srednjoj temperaturi različitoj od $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ i nakon mjerenja preračunati na srednju temperaturu $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ uz uvjet da je utvrđen točan odnos između temperature i toplinskog svojstva.

Rezultati mjerenja toplinske vodljivosti na raznim uzorcima, u pravilu će se međusobno razlikovati. Zato treba provesti veći broj mjerenja i dobivene rezultate statistički obraditi. Na bazi uzoraka ocjenjuje se vrijednost toplinskog svojstva predmetnog građevnog materijala, a statističkim metodama određuje se pouzdanost (vjerojatnost) i preciznost te ocjene. Preciznija ocjena uz istu pouzdanost može se postići povećanjem broja uzoraka. Nastoji se da ocjena bude što pouzdanija i što preciznija, ali i da prateći troškovi za ispitivanje pri tome budu u prihvatljivim granicama.

Da bi proizvođač mogao ocijeniti objavljenu toplinsku vrijednost mora imati najmanje deset rezultata mjerenja toplinske vodljivosti ili toplinskog otpora. Izmjerene vrijednosti izražavaju se s tri značajne znamenke. Ako svi podaci nisu dobiveni mjerenjem uz jednake referentne uvjete, treba ih najprije svesti na referentne uvjete, a tek potom izvršiti statističku obradu rezultata mjerenja.

Za građevni proizvod određene debljine uvijek se objavljuje toplinski otpor, R_D , a toplinska vodljivost, λ_D , objavljuje se ako je to praktički moguće. Objavljena toplinska vrijednost neovisna je o uvjetima primjene proizvoda. Ona se zato može koristiti za međusobnu usporedbu različitih materijala.

Objavljena vrijednost toplinske vodljivosti

Objavljena vrijednost toplinske vodljivosti, λ_D , izvodi se iz izmjerenih vrijednosti, λ_i , primjenom statističkih metoda i teorije vjerojatnosti, uz pretpostavku Gaussove normalne razdiobe. Objavljena vrijednost toplinske vodljivosti mora biti navedena kao 90 %-tni fraktil uz 90 % povjerenja, što se označuje s $\lambda_{90/90}$, i zaokružena u skladu s dolje navedenim pravilima. To znači da objavljena vrijednost toplinske vodljivosti, λ_D , treba predstavljati najmanje 90 % proizvodnje i to s vjerojatnosti 90 %.

Sasvim općenito, **fraktili** (za fraktil se u novije vrijeme koristi naziv kvantil) su vrijednosti numeričke varijable koje niz podataka poredanih po veličini dijele na određen broj dijelova. Broj dijelova predstavlja red fraktila, p , pri čemu vrijedi $0 \leq p \leq 1$. Fraktil reda p ili p – fraktil je ona vrijednost numeričke varijable, za koju je $n \times p$ vrijednosti varijable manje od nje, a ostalih $n \times (1-p)$ varijabli imaju vrijednost veću od nje. n je ukupan broj vrijednosti numeričke varijable.

Statistička vrijednost toplinske vodljivosti, $\lambda_{90/90}$, je 90 %-tni fraktil (fraktil reda 0,9 ili 9/10) tj. vrijednost toplinske vodljivosti, λ , koja označava gornju granicu jednostranog intervala dopuštenog odstupanja vrijednosti λ . 90 % svih budućih rezultata mjerenja λ_i neće prekoračiti tu granicu, odnosno samo 10 % izmjerenih vrijednosti biti će veće od te granične vrijednosti. Vjerojatnost da će se to zaista dogoditi mora biti 90 %.

Postupak proračuna objavljene vrijednosti toplinskog svojstva, dan u nastavku, naveden je u HRN EN ISO 10456 [57].

Statistička vrijednost toplinske vodljivosti, $\lambda_{90/90}$, koja predstavlja 90 %-tni fraktile uz razinu povjerenja od 90 %, određena je jednačom:

$$\lambda_{90/90} = \lambda_{\text{mean}} + k_2(n; p; 1-\alpha) \times s_\lambda \quad (3.7)$$

gdje je

- λ_{mean} srednja vrijednost izmjerenih toplinskih vodljivosti, u W/(m×K),
- k_2 koeficijent za određivanje $\lambda_{90/90}$ kad je standardna devijacija procijenjena. On ovisi o broju ispitanih uzoraka, n , redu fraktile, p , i razini povjerenja, $1-\alpha$. Vrijednosti su dane u tablici 3.9 za 90 %-tnu razinu povjerenja ($1 - \alpha = 0,90$) i red fraktile $p = 90 \%$,
- n broj ispitanih uzoraka,
- p red fraktile koji daje najmanji dio ukupnog broja vrijednosti toplinske vodljivosti (u ovom slučaju 90 %) za koji se zahtjeva da se nalazi u intervalu dopuštenog odstupanja
- $1 - \alpha$ razina povjerenja (u našem slučaju 90 %) za zahtjev da dio ukupnog broja vrijednosti koji je veći ili jednak redu fraktile p , leže u intervalu dopuštenog odstupanja,
- s_λ je procjena standardne devijacije toplinske vodljivosti. Ona znači procjenu prosječnog odstupanja pojedinačnih vrijednosti toplinske vodljivosti od njene srednje vrijednosti, u W/(m×K).

Srednja vrijednost toplinske vodljivosti, λ_{mean} , je aritmetička sredina od n rezultata mjerenja i izračuna se jednačom:

$$\lambda_{\text{mean}} = \frac{(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_i + \dots + \lambda_n)}{n} \quad (3.8)$$

Procjena standardne devijacije toplinske vodljivosti dana je jednačom:

$$s_\lambda = \left[\frac{\sum (\lambda_i - \lambda_{\text{mean}})^2}{(n-1)} \right]^{0,5} \quad (3.9)$$

$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_n$ su pojedinačni rezultati mjerenja toplinske vodljivosti, λ . n je broj rezultata mjerenja.

Objavljena vrijednost, λ_D , je statistička vrijednost toplinske vodljivosti, $\lambda_{90/90}$, dobivena na opisani način, izražena u W/(m×K), zaokružena prema slijedećim pravilima:

- ako je $\lambda \leq 0,08$ tada se zaokružuje na najbližih većih 0,001 W/(m×K),
- ako je $0,08 < \lambda \leq 0,20$ tada se zaokružuje na najbližih većih 0,005 W/(m×K),
- ako je $0,20 < \lambda \leq 2,00$ tada se zaokružuje na najbližih većih 0,01 W/(m×K),
- ako je $2,00 < \lambda$ tada se zaokružuje na najbližih većih 0,1 W/(m×K).

Proizvođač može (radi svoje sigurnosti) objaviti i veću vrijednost.

Tablica 3.9 Vrijednosti k_2 za jednostrani 90 %-tni interval dopuštenog odstupanja uz razinu pouzdanosti od 90 %, (prema HRN EN ISO 10456 [57])

Ukupni broj rezultata ispitivanja	k_2	Ukupni broj rezultata ispitivanja	k_2
3	4,26	14	1,90
4	3,19	15	1,87
5	2,74	16	1,84
6	2,49	17	1,82
7	2,33	18	1,80
8	2,22	19	1,78

9	2,13	20	1,77
10	2,07	30	1,66
11	2,01	40	1,60
12	1,97	50	1,58
13	1,93	100	1,47

Što je manji broj rezultata ispitivanja biti će veća objavljena vrijednost toplinske vodljivosti.

Primjer 3.11

Poznato je 14 rezultata mjerenja toplinske vodljivosti jednog proizvoda, danih u tablici 3.10. Mjerenja su provedena uz referentne uvjete +10 °C / $u_{23/50}$.

Tablica 3.10 Rezultati mjerenja toplinske vodljivosti, λ .

Redni broj ispitivanja	1	2	3	4	5	6	7
λ_i W/(m×K)	0,0366	0,0390	0,0382	0,0378	0,0410	0,0412	0,0397
Redni broj ispitivanja	8	9	10	11	12	13	14
λ_i W/(m×K)	0,0417	0,0415	0,0402	0,0417	0,0406	0,0408	0,0421

Srednja vrijednost toplinske vodljivosti aritmetička je sredina od 14 rezultata ispitivanja, određena jednadžbom (3.8) i iznosi:

$$\lambda_{\text{mean}} = 0,0401 \frac{\text{W}}{(\text{m} \times \text{K})}$$

Procjena standardne devijacije toplinske vodljivosti, s_λ , određena je primjenom jednadžbe (3.9) i iznosi:)

$$s_\lambda = 0,00166 \frac{\text{W}}{(\text{m} \times \text{K})}$$

Statistička vrijednost toplinske vodljivosti $\lambda_{90/90}$ određena je pomoću jednadžbe (3.7) uz $k_2 = 1,90$:

$$\lambda_{90/90} = 0,0401 + 1,90 \times 0,00166$$

$$\lambda_{90/90} = 0,0433 \frac{\text{W}}{(\text{m} \times \text{K})}$$

Zaokruživanjem na više do najbližeg 0,001 W/(m×K) dobije se objavljena toplinska vodljivost:

$$\lambda_D = 0,044 \frac{\text{W}}{(\text{m} \times \text{K})}$$

Objavljena vrijednost toplinskog otpora

Objavljena vrijednost toplinskog otpora, R_D , izvodi se iz izmjerenih vrijednosti, R_i , primjenom statističkih metoda i teorije vjerojatnosti, uz pretpostavku Gaussove normalne razdiobe. Objavljena vrijednost toplinskog otpora mora biti navedena kao 90 %-tni fraktil uz 90 % povjerenja, što se označuje s $R_{90/90}$, zaokružena u skladu s dolje navedenim pravilima.

Statistička vrijednost toplinskog otpora, $R_{90/90}$, proračunava se pomoću jednadžbe:

$$R_{90/90} = R_{\text{mean}} - k_2(n;p;1 - \alpha) \times s_R \quad (3.10)$$

gdje je

R_{mean} srednja vrijednost toplinskog otpora, u $\text{m}^2 \times \text{K}/\text{W}$,

k_2 koeficijent za određivanje $R_{90/90}$ kad je standardna devijacija procijenjena. On ovisi o broju ispitanih uzoraka, n , redu fraktila, p , i razini povjerenja, $1 - \alpha$. Vrijednosti su dane u tablici 3.9 za 90 %-tnu razinu povjerenja ($1 - \alpha = 0,90$) i red fraktil $p = 90 \%$,

- n broj ispitanih uzoraka,
 p red fraktila koji daje najmanji dio ukupnog broja vrijednosti toplinskog otpora (u ovom slučaju 90 %) za koji se zahtjeva da se nalazi u intervalu dopuštenog odstupanja,
 $1 - \alpha$ razina povjerenja (u našem slučaju 90 %) za zahtjev da dio ukupnog broja vrijednosti koji je veći ili jednak redu fraktila p , leže u intervalu dopuštenog odstupanja,
 s_R je procjena standardne devijacije toplinskog otpora. Ona znači procjenu prosječnog odstupanja pojedinačnih vrijednosti toplinskog otpora od njegove srednje vrijednosti, u $m^2 \times K/W$.

Srednja vrijednost toplinskog otpora, R_{mean} , je aritmetička sredina od n rezultata mjerenja i izračuna se jednadžbom:

$$R_{mean} = \frac{(R_1 + R_2 + \dots + R_i + \dots + R_n)}{n} \quad (3.11)$$

Procjena standardne devijacije toplinskog otpora dana je jednadžbom:

$$s_R = \left[\frac{\sum (R_i - R_{mean})^2}{(n-1)} \right]^{0,5} \quad (3.12)$$

$R_1, R_2, \dots, R_i, \dots, R_n$ su pojedinačni rezultati mjerenja toplinskog otpora, R . n je ukupni broj rezultata mjerenja.

Ako je izračunata vrijednost $\lambda_{90/90}$, vrijednost za $R_{90/90}$ se dobije iz izraza:

$$R_{90/90} = \frac{d_N}{\lambda_{90/90}} \quad (3.13)$$

gdje je d_N nazivna debljina proizvoda u metrima.

Objavljena vrijednost, R_D , je statistička vrijednost toplinskog otpora, $R_{90/90}$, dobivena na opisani način, izražena u $m^2 \times K/W$, zaokružena na najbližu manju vrijednost na ne više od dvije decimale ili tri značajna mjesta, odnosno kako je to specificirano u normama za pojedine proizvode. Za toplinsko-izolacijske proizvode s $\lambda < 0,08 W/(m \times K)$ vrijednost toplinskog otpora R_D zaokružuje se na niže na najbližih $0,05 m^2 \times K/W$.

Proizvođač može (radi svoje sigurnosti) objaviti i manju vrijednost.

Primjer 3.12

Poznato je 14 rezultata mjerenja toplinskog otpora na uzorcima jednog proizvoda, danih u tablici 3.11. Mjerenja su provedena uz referentne uvjete $+10^\circ C / u_{23/50}$.

Tablica 3.11 Rezultati mjerenja toplinskog otpora, R .

Redni broj ispitivanja	1	2	3	4	5	6	7
$R_i m^2 \times K/W$	2,19	2,05	2,10	2,12	1,95	1,94	2,01
Redni broj ispitivanja	8	9	10	11	12	13	14
$R_i m^2 \times K/W$	1,92	1,93	1,99	1,92	1,97	1,86	1,90

Srednja vrijednost toplinskog otpora aritmetička je sredina od 14 rezultata ispitivanja, određena jednadžbom (3.11) i iznosi:

$$R_{mean} = 1,99 \frac{m^2 \times K}{W}$$

Procjena standardne devijacije toplinskog otpora, s_R , određena je primjenom jednadžbe (3.12) i iznosi:

$$s_R = 0,0944 \frac{\text{m}^2 \times \text{K}}{\text{W}}$$

Statistička vrijednost toplinskog otpora $R_{90/90}$ određen je pomoću jednadžbe (3.10) uz $k = 1,90$

$$R_{90/90} = 1,99 - 1,90 \times 0,0944$$

$$R_{90/90} = 1,81 \frac{\text{m}^2 \times \text{K}}{\text{W}}$$

Zaokruženjem na niže do najbližeg $0,05 \text{ m}^2 \times \text{K/W}$ dobije se objavljeni toplinski otpor:

$$R_D = 1,80 \frac{\text{m}^2 \times \text{K}}{\text{W}}$$

Primjer 3.13

Za proizvod iz zadatka 3.11, koji je nazivne debljine $d_N = 80 \text{ mm}$, izračunati toplinski otpor $R_{90/90}$ i objavljeni toplinski otpor R_D .

Statistička vrijednost toplinskog otpora $R_{90/90}$ određena je jednadžbom:

$$R_{90/90} = \frac{d_N}{\lambda_{90/90}}$$

Odatle je:

$$R_{90/90} = \frac{0,080}{0,0433} = 1,848 \frac{\text{m}^2 \times \text{K}}{\text{W}}$$

Nakon zaokruženja na niže do najbližih $0,05 \text{ m}^2 \times \text{K/W}$ dobije se objavljeni toplinski otpor:

$$R_D = 1,80 \frac{\text{m}^2 \times \text{K}}{\text{W}}$$

3.10 Projektne toplinske vrijednosti

Za proračune prijenosa topline u zgradama treba koristiti **projektne toplinske vrijednosti** (projektne vrijednosti toplinskog svojstva), a to su projektna toplinska vodljivost, λ_u , i projektni toplinski otpor, R_u . One osim kolebanja svojstava materijala uzimaju u obzir i utjecaj stvarnog sadržaja vlage u ugrađenom materijalu u uvjetima korištenja zgrade i utjecaj starenja materijala. Određeni građevni proizvod može imati više od jedne projektne toplinske vrijednosti za različite primjene ili različite uvjete u okolici zgrade. Projektna toplinska vrijednost se određuje u skladu s planiranom primjenom građevnog proizvoda i klimatskim uvjetima na lokaciji zgrade.

Projektna toplinska vodljivost, λ_u , jest vrijednost toplinske vodljivosti građevnog materijala ili proizvoda pod posebnim (projektnim) vanjskim i unutarnjim uvjetima, koja se može smatrati kao karakteristično svojstvo toga materijala ili proizvoda kad je ugrađen u promatrani građevni dio zgrade.

Projektni toplinski otpor, R_u , jest vrijednost toplinskog otpora građevnog proizvoda pod posebnim (projektnim) vanjskim i unutarnjim uvjetima, koja se može smatrati kao karakteristično svojstvo toga proizvoda kad je ugrađen u promatrani građevni dio zgrade.

Projektne vrijednosti se mogu dobiti iz objavljenih vrijednosti, zatim neposredno iz izmjerenih vrijednosti ili pak iz tabličnih vrijednosti. Ako se skup uvjeta koji vrijedi za objavljene, izmjerene ili tablične toplinske vrijednosti može smatrati odgovarajućim za stvarnu konkretnu primjenu predmetnog građevnog materijala ili proizvoda, tada se te vrijednosti mogu koristiti izravno kao projektne toplinske vrijednosti. U protivnom se mora provesti pretvorba tih vrijednosti u projektne toplinske vrijednosti za novi skup uvjeta.

Projektne toplinske vrijednosti moraju se zaokružiti u skladu s pravilima koja vrijede za zaokruživanje objavljenih toplinskih vrijednosti, tj. za toplinsku vodljivost na najbližu veću vrijednost u $\text{W}/(\text{m} \times \text{K})$, a za toplinski otpor na najbližu manju vrijednost u $\text{m}^2 \times \text{K/W}$.

Ako se projektna vrijednost proračunava iz objavljene vrijednosti, objavljena se vrijednost mora pretvoriti s obzirom na projektne uvjete temperature i vlažnosti.

Ako se projektna vrijednost proračunava iz izmjerenih vrijednosti, prvo se moraju, ako je to potrebno, mjerni podaci pretvoriti s obzirom na projektne uvjete temperature i vlažnosti, a zatim se mora proračunati procijenjena statistička jednobrojčana vrijednost, kao kod statističkih objavljenih vrijednosti.

Za materijale za koje nisu dostupne niti objavljene niti izmjerene toplinske vrijednosti, projektne se vrijednosti mogu dobiti iz tablica koje sadrže prikupljene postojeće podatke. Tablica u Prilogu 3.1 sadrži tipične projektne vrijednosti prihvatljive za uporabu u proračunima prijenosa topline, ako o razmatranom materijalu / proizvodu nema posebnih podataka. Tablica sadrži podatke za materijale koji se obično ugrađuju u zgrade.

Pretvorba toplinskih vrijednosti iz jednog skupa uvjeta (λ_1, R_1) u drugi skup uvjeta (λ_2, R_2) provodi se prema slijedećim jednadžbama [57]:

$$\lambda_2 = \lambda_1 \times F_T \times F_m \times F_a \quad (3.14)$$

$$R_2 = \frac{R_1}{F_T \times F_m \times F_a} \quad (3.15)$$

gdje je

F_T faktor pretvorbe za temperaturu, veličina bez dimenzija,
 F_m faktor pretvorbe za vlagu, veličina bez dimenzija,
 F_a faktor pretvorbe za starenje, veličina bez dimenzija

Faktor pretvorbe za temperaturu

Faktor pretvorbe za temperaturu, F_T , određen je izrazom

$$F_T = e^{f_T \times (T_2 - T_1)} \quad (3.16)$$

gdje je:

f_T koeficijent pretvorbe za temperaturu, u K^{-1} ,
 T_1 temperatura prvog skupa uvjeta, u K,
 T_2 temperatura drugog skupa uvjeta, u K.

Vrijednosti koeficijenta pretvorbe za temperaturu, f_T , toplinsko-izolacijskih materijala i materijala za zide dane su u Prilogu 3.2. Za međuvrijednosti se može provesti linearna interpolacija. Vrijednosti toplinske vodljivosti iz tablica vrijede samo kao parametri identifikacije. Dani koeficijenti pretvorbe vrijede za srednje temperature od 0 °C do +30 °C. Utjecaj temperature na toplinska svojstva drugih građevnih materijala općenito nije značajan za proračune prijenosa topline i obično se može zanemariti.

Projektne toplinske vrijednosti treba odrediti za očekivanu srednju temperaturu toplinsko-izolacijskog materijala ugrađenog u građevni dio zgrade u konkretnoj klimi.

Faktor pretvorbe za vlagu

Faktor pretvorbe za vlagu, F_m , ako je sadržaj vlage u materijalu određen kao masa / masa, dan je izrazom:

$$F_m = e^{f_u \times (u_2 - u_1)} \quad (3.17)$$

gdje je:

f_u koeficijent pretvorbe za vlagu, određen kao masa / masa, u kg / kg,
 u_1 sadržaj vlage u materijalu određen kao masa / masa za prvi skup uvjeta, u kg/kg,
 u_2 sadržaj vlage u materijalu određen kao masa / masa za drugi skup uvjeta, u kg/kg.

Faktor pretvorbe za vlagu, F_m , ako je sadržaj vlage u materijalu određen kao obujam / obujam, dan je izrazom:

$$F_m = e^{f_\psi \times (\psi_2 - \psi_1)} \quad (3.18)$$

gdje je

- f_{ψ} koeficijent pretvorbe za vlagu, određenu kao obujam / obujam, u m^3/m^3 ,
 ψ_1 sadržaj vlage određen kao obujam / obujam za prvi skup uvjeta, u m^3/m^3 ,
 ψ_2 sadržaj vlage određen kao obujam / obujam za drugi skup uvjeta, u m^3/m^3 .

Vrijednosti koeficijenata pretvorbe za vlagu, f_u i f_{ψ} , toplinsko-izolacijskih materijala i materijala za zide dane su u Prilogu 3.3. Dani koeficijenti pretvorbe vrijede za srednje temperature od 0°C do $+30^\circ\text{C}$. Podaci o sadržaju vlage dani u tablici pri temperaturi $+23^\circ\text{C}$ i relativnoj vlažnosti 50 % i 80 %, su ravnotežni sadržaji vlage promatranih materijala u tipičnim uporabama za zgradu. Ravnotežni sadržaj vlage za posebne uporabe s velikim sadržajem vlage potrebno je posebno utvrditi.

Prema našem Tehničkom propisu koji uređuje područje racionalne uporabe energije i toplinske zaštite u zgradama [58], prijenos topline kroz građevne dijelove, za zgrade primjereno zaštićene od vlage, treba proračunavati s projektnim toplinskim vrijednostima koje vrijede za ravnotežni sadržaj vlage u materijalu u klimi temperature zraka $+23^\circ\text{C}$ i relativne vlažnosti 80 % ($u_{23/80}$).

Faktor pretvorbe za starenje

Starenje toplinsko-izolacijskog materijala ovisi o tipu materijala, sredstvu za pjenjenje, zaštitnoj oblozi iznad materijala, temperaturi materijala,.... Ako je kod utvrđivanja objavljene toplinske vrijednosti starenje već uzeto u obzir, ne moraju se projektne vrijednosti mijenjati nikakvim pretvorbama za starenje.

Ako se koristi faktor pretvorbe, F_a , on mora omogućiti proračun vrijednosti toplinskog svojstva za ostarjeli materijal tj. za materijal korišten u razmatranoj uporabi nakon vremena ne kraćeg od polovine uporabnog vijeka proizvoda. Često se uzima da je uporabni vijek 50 godina. Postupci utvrđivanja „ostarjelih“ vrijednosti λ ili faktora starenja, F_a , dani su u normama za pojedine građevne proizvode.

Primjer 3.14

Rezultati mjerenja toplinske vodljivosti na 10 uzoraka ploča od mineralne vune prikazani su u tablici 3.12. Mjerenja su provedena pri srednjoj temperaturi uzorka od $+11^\circ\text{C}$. Uzorci su kondicionirani na temperaturi zraka $+23^\circ\text{C}$ i relativnoj vlažnosti zraka 50 %. Potrebno je odrediti objavljenu vrijednost toplinske vodljivosti, λ_D .

Tablica 3.12 Rezultati mjerenja toplinske vodljivosti, λ

Redni broj ispitivanja	1	2	3	4	5
λ_i W/(m×K)	0,0331	0,0343	0,0346	0,0338	0,0336
Redni broj ispitivanja	6	7	8	9	10
λ_i W/(m×K)	0,0341	0,0334	0,0342	0,0335	0,0339

Srednja vrijednost toplinske vodljivosti aritmetička je sredina od 10 rezultata ispitivanja, određena jednadžbom (3.8) i iznosi:

$$\lambda_{\text{mean}} = 0,03385 \frac{\text{W}}{(\text{m} \times \text{K})}$$

Procjena standardne devijacije toplinske vodljivosti, s_λ , određena je primjenom jednadžbe (3.9) i iznosi:

$$s_\lambda = 0,000460 \frac{\text{W}}{(\text{m} \times \text{K})}$$

Statistička vrijednost toplinska vodljivost $\lambda_{90/90}$, određena pomoću jednadžbe (3.7) uz $k_2 = 2,07$ (za $n = 10$), iznosi:

$$\lambda_{90/90} = 0,03385 + 2,07 \times 0,000460$$

$$\lambda_{90/90} = 0,03480 \frac{\text{W}}{(\text{m} \times \text{K})}$$

Tu vrijednost treba sada pretvoriti u vrijednost za srednju temperaturu materijala $+10^\circ\text{C}$ pomoću jednadžbe (3.14):

$$\lambda_2 = \lambda_1 \times F_T$$

Faktor pretvorbe za temperaturu, F_T , proračuna se iz jednadžbe (3.16). Koeficijent pretvorbe za temperaturu, f_T , za ploče mineralne vune toplinske vodljivosti $0,0348 \text{ W}/(\text{m} \times \text{K})$ dan je u tablici 3.2.1 u Prilogu 3.2 i iznosi (uz linearnu interpolaciju):

$$f_T = 0,0045$$

Faktor pretvorbe za temperaturu, F_T , iznosi:

$$F_T = e^{0,0045 \times (10 - 11)}$$

$$F_T = 0,99551$$

Pretvorena vrijednost toplinske vodljivost iznosi:

$$\lambda_2 = 0,03480 \times 0,99551$$

$$\lambda_2 = 0,03463$$

Zaokruženjem na više do najbližeg $0,001 \text{ W}/(\text{m} \times \text{K})$ dobije se objavljena toplinska vodljivost:

$$\lambda_D = \frac{0,035 \text{ W}}{(\text{m} \times \text{K})}$$

Primjer 3.15

Objavljena vrijednost toplinske vodljivosti, λ_D , ploča od ekspandiranog polistirena iznosi $0,036 \text{ W}/(\text{m} \times \text{K})$. Očekuje se da će nakon ugradnje ploča u zgradu, s obzirom na unutarnje uvjete u zgradi, sadržaj vlage u pločama iznositi $0,02 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Treba proračunati projektnu vrijednost toplinske vodljivosti ekspandiranog polistirena.

Jedina potrebna pretvorba u ovom slučaju je pretvorba za sadržaj vlage. Faktor pretvorbe za vlagu, F_m , proračuna se pomoću jednadžbe (3.18). Koeficijent pretvorbe za vlagu, f_m , dan je u Prilogu 3.3 i iznosi:

$$f_\psi = 4,0$$

Faktor pretvorbe za vlagu je:

$$F_m = e^{4,0 \times (0,02 - 0)}$$

Pretvorena toplinska vodljivost je

$$\lambda_2 = 0,036 \times 1,0833$$

$$\lambda_2 = 0,0389988 \frac{\text{W}}{(\text{m} \times \text{K})}$$

Projektna vrijednost je najbliža veća vrijednost zaokružena na $0,001 \text{ W}/(\text{m} \times \text{K})$ i iznosi:

$$\lambda_U = 0,039 \frac{\text{W}}{(\text{m} \times \text{K})}$$

3.11 Kratak opis toplinsko-izolacijskih materijala [59] [60] [61]

3.11.1 Celuloza

Celuloza je prirodno vlakno. To je bijela vlaknasta tvar koja je glavni sastojak stjenki biljnih stanica i daje im čvrstoću i elastičnost. Primjerice u pamuku sadržaj celuloze iznosi preko 90 %, a u drvu je ima između 40 % i 50 %. To je najrašireniji organski spoj na Zemlji. Celuloza je prirodni polimer. Ona je osnovni sastojak mnogih industrijskih proizvoda koje svakodnevno koristimo: svih vrsta papira, vate, celuloznih vlakana za tekstilnu industriju,...

Celuloza se industrijski proizvodi iz različitih sirovina biljnog porijekla. U prvoj se fazi drvo ili druge biljne sirovine usitnjavaju, a zatim se obrađuju određenim kemikalijama na povišenoj temperaturi i tlaku.

Celulozna toplinska izolacija izrađuju se prije svega recikliranjem starog papira uz dodatak borovih soli (do masenog udjela 10 %) radi poboljšanja ponašanja materijala u uvjetima požara. Borova sol je i prirodni konzervans tako da istodobno pruža zaštitu od truljenja, plijesni i raznih štetočina. Ova izolacija od starog papira dobila je ime celulozna izolacija po celulozi koja je glavni sastojak papira. Postoje i drugi toplinsko-izolacijski materijali koji se većim dijelom sastoje od celuloze, ali se ne nazivaju celulozna izolacija, već imaju posebne nazive, npr. pamuk.

Celuloza je bez mirisa, netopljiva u vodi i organskim otapalima. Može se reciklirati. Nije štetna za ljudsko zdravlje.

Celulozna toplinska izolacija se isporučuje u obliku nevezanih pahuljica i blazina (vidjeti sliku 3.10). Celulozna izolaciju u obliku pahuljica ugrađuje se ručnim nasipavanjem na ravne površine, zatim strojnim upuhavanjem u šuplje prostore ili prskanjem na nosive površine, uz mali dodatak vode. Blazine se proizvode s našivenim vlaknima od poliolefina. One su elastične i postojanog oblika, ali nisu nosive za tlačna opterećenja. Ugrađuju se uglavnom između i ispod rogova, zatim između nosivih elemenata u stropovima te u laganim pregradnim zidovima za poboljšanje zvučne izolacije.

Celulozna izolacija izdrži bez oštećenja temperaturu do oko 100 °C. Toplinska vodljivost celulozne toplinske izolacije je između $\lambda = 0.040 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ i $\lambda = 0.045 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Faktor otpora difuziji vodene pare je između $\mu = 1$ i $\mu = 2$.



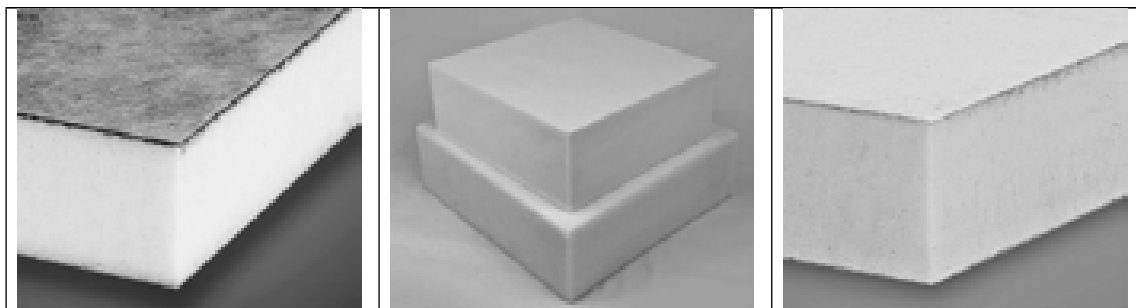
Slika 3.10 Celuloza u obliku pahuljica [137], blazine od celuloze [138], strojno prskanje pahuljica celuloze [139]

3.11.2 Čvrsta poliuretanska pjena

Poliuretanska pjena je sintetička pjena na bazi poliuretana, s pretežno zatvorenom pjenastom poroznom strukturom. Industrijska proizvodnja poliuretanske pjene započela je 1964. godine. Kao sirovine za proizvodnju poliuretana služe poliizocijanati i polioli, a kao pjenila se koriste najčešće pentan i ugljikov dioksid. Poliuretanske pjene se prema svojoj krutosti dijele na mekane, polučvrste i čvrste pjene. Stupanj njihove krutosti ovisi o vrsti upotrijebljenog poliola. Kao toplinsko-izolacijski materijal u graditeljstvu upotrebljava se čvrsta

poliuretanska pjena. Za proizvodnju čvrste poliuretanske pjene reakcijska smjesa se unese u odgovarajuće metalne kalupe. Tijekom polimerizacije, zbog zagrijavanja, pjenilo isparuje stvarajući pjenastu strukturu sa zatvorenim porama (najmanje 90 %). Obujam zraka u materijalu iznosi oko 97 % ukupnog obujma. Nakon proizvodnje blokovi moraju određeno vrijeme odležati na skladištu a zatim se iz njih režu toplinsko-izolacijske ploče ili izolacijski elementi određenog oblika.

Toplinsko-izolacijskim pločama od čvrste poliuretanske pjene (PUR ploče) srodne su toplinsko-izolacijske ploče proizvedene od većinskog udjela poliizocijanurata (vidjeti sliku 3.11). Za te ploče se koristi skraćenica PIR. Obje varijante ploča svrstavaju se u grupu poliuretanskih ploča. PIR ploče od čvrste pjene imaju najmanju vrijednost toplinske vodljivosti od svih pjenastih i vlaknastih toplinsko-izolacijskih materijala i ona iznosi između $\lambda = 0,020 \text{ W/(m}\times\text{K)}$ i $0,025 \text{ W/(m}\times\text{K)}$.



Slika 3.11 Razne varijante toplinsko-izolacijskih PIR ploča [140], [141], [142]

Čvrsta poliuretanska pjena otporna je na razrijeđene kiseline i lužine. Kratkotrajno može podnijeti temperaturu do $+250 \text{ }^{\circ}\text{C}$, a dugotrajno temperature između $-30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ i $+90 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Mogu se izraditi i specijalni proizvodi koji izdrže trajno djelovanje temperature od $-140 \text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+180 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Toplinska razgradnja materijala započne kod temperature oko $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Poliuretan je goriv materijal. Gorenjem poliuretana razvija se veća količina dima i oslobađaju se vrlo otrovni plinovi.

Toplinska vodljivost ploča od čvrste poliuretanske pjene je između $\lambda = 0,025 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ i $\lambda = 0,035 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Faktor otpora difuziji vodene pare je između $\mu = 30$ i $\mu = 100$.

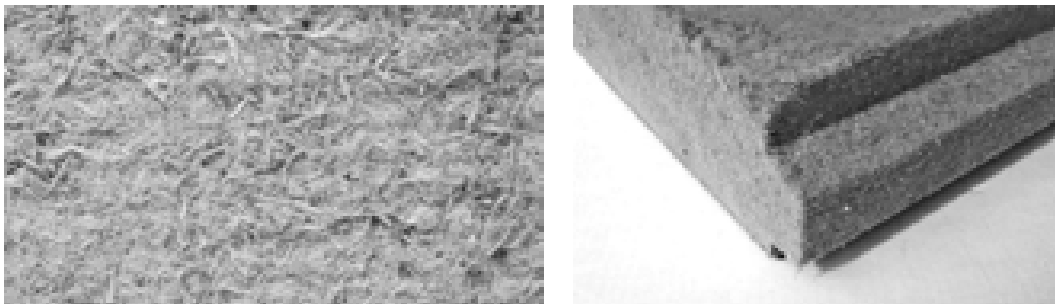
Ploče od poliuretanske čvrste pjene primjenjuju se za toplinsku izolaciju ravnih krovova i kosih krovova iznad rogova. Kod zidova se koriste najviše za unutarnju izolaciju i izolaciju u jezgri. Prikladne su i za toplinsku izolaciju podova, posebno podova s većim opterećenjem.

Ploče od poliuretana obrađuju se alatom za obradu drva. Na podlogu se lijepe ili pričvršćuju odgovarajućim pričvrstnim elementima (tiple i vijci s tanjurima / diskovima).

3.11.3 Drvena vlakna

Drvena vlakna (WF) se proizvode iz drvenih ostataka drvne industrije (obnovljiv prirodni resurs), a koriste se kao sirovina za proizvodnju toplinsko-izolacijskih ploča od drvenih vlakana, vlaknatica.

Za proizvodnju ploča od drvenih vlakana postoje dva osnovna postupka: mokri i suhi postupak. Kod oba postupka otpaci drva se pomoću odgovarajućih uređaja najprije usitne i raščupaju. Kod suhog postupka, raščupanom drvenom materijalu dodaje se odgovarajuće vezno sredstvo i prije nego što otvrdne pripremljena smjesa blago se preša u ploče. Kod mokrog postupka raščupani drveni materijal se pomiješa s vodom tako da nastane kaša kojoj se dodaju potrebni aditivi uključivo oni za zaštitu od štetočina i poboljšanje ponašanja u slučaju požara. Zatim se tako pripremljena kaša blago preša u ploče koje se suše nekoliko dana na vrućem zraku temperature 120 do $190 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Osušene ploče režu se na potrebne dimenzije.



Slika 3.12 Struktura ploča od drvenih vlakana [143], oblikovani rub ploče [144]

Obujamska masa toplinsko-izolacijskih ploča od drvenih vlakana iznosi između 130 i 250 kg/m³. Ploče se moraju suhe skladištiti i ugrađivati. Otporne su na gamad, trulež i gljivice. Granična temperatura primjene iznosi oko 110 °C. Kod gorenja, pored nastajanja štetnih emisija kao kod gorenja drva, mogu nastati i štetne emisije za zdravlje uslijed gorenja dodatnih materijala ugrađenih u proizvod.

Toplinska vodljivost ploča od drvenih vlakana je između $\lambda = 0.040 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ i $\lambda = 0.060 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Faktor otpora difuziji vodene pare je između $\mu = 5$ i $\mu = 10$.

3.11.4 Drvena vuna

Drvenu vunu (WW) čine mehanički proizvedena (pomoću blanjalice) vlakna pretežito od crnogoričnog, ali djelomično i bjelogoričnog drva najviše kvalitete, duga do 500 mm, elastična, bez umjetnih dodataka, gotovo bez prašine i bez iverja. S obzirom na namjenu drvene vune odabire se mješavina drva za proizvodnju vune i dimenzije pojedinih vlakana tj. njihova debljina, širina i duljina.

Drvena vuna se proizvodi pomoću posebnih strojeva (blanjalica, strugalica) iz okruglih trupaca stabala, kojima je oguljena kora i koji su sušeni na zraku u natkrivenom prostoru kroz više mjeseci. Debljina vlakna, ovisno o namjeni, obično iznosi između 0,12 mm i 0,25 mm, a širina vlakna od 1,3 mm do 8,0 mm. Vlažnost drvene vune mora biti <13 %. Udio kratkih vlakana duljine do 100 mm obično se ograničava na 1,2 % po kilogramu vune.

Drvena vuna povezana i konzervirana s veznim materijalom na mineralnoj osnovi, kao što je magnezit (magnezijev karbonat) ili cement (danas ga uglavnom koriste svi proizvođači), koristi se za proizvodnju ploča od drvene vune ili punim nazivom laganih građevnih ploča od drvene vune. S magnezijem vezane ploče prepoznaju se po žućkasto smeđoj boji (boja pijeska), a ploče kod kojih je kao vezivo korišten sivi cement su sive boje. Za ploče koje imaju i dekorativnu funkciju može se koristiti bijeli cement čime ploče zadrže prirodni ton drveta.

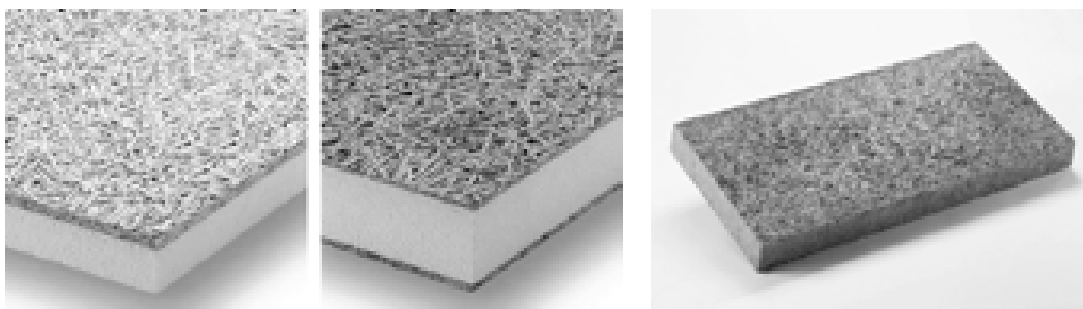
U svakodnevnom govoru ploče od drvene vune se često nazivaju Heraklith ploče prema imenu vodećeg proizvođača takvih ploča. Ploče od drvene vune ne treba miješati s toplinsko-izolacijskim pločama od drvenih vlakana koje se proizvode sasvim drugačijom tehnologijom (bez mineralnog veziva) i koje bolje toplinski izoliraju.

Kod proizvodnje ploča od drvene vune vlakna drvene vune miješaju se s mineralnim vezivom u odgovarajućoj miješalici i zatim usipaju u posebne kalupe prema formatu i debljini ploča uz potrebno prešanje. Unatoč prešanju obujam zraka u porama ploča iznosi oko 70 %. Nakon početnog sušenja i vezivanja (obično dva dana) ploče se vade iz kalupa i slažu na odgovarajući način radi daljnjeg sušenja i nastavka procesa otvrdnjavanja. Na kraju se ploče režu na potrebne dimenzije i pakiraju za isporuku (vidjeti sliku 3.13).



Slika 3.13 Struktura ploča od drvene vune [145], dvoslojne ploče od drvene vune [146], detalj ugradnje ploča od drvene vune [147]

Ploče od drvene vune imaju relativno visoku vrijednost toplinske vodljivosti ($\lambda \approx 0,090 \text{ W/(m} \times \text{K)}$) u odnosu na druge standardne toplinsko izolacijske materijale ($\lambda \approx 0,040 \text{ W/(m} \times \text{K)}$). Zato se danas proizvode i spregnute višeslojne lagane građevne ploče od drvene vune u koje je integriran sloj ekspaniranog polistirena ili kamene vune, čime se poboljšava ukupna toplinsko-izolacijska sposobnost ploča. Proizvode se dvoslojne i troslojne ploče (vidjeti sliku 3.14). Kod troslojnih ploča dodatni izolacijski sloj se umeće između dva tanka (obično debljine 5 mm ili 7,5 mm) pokrovnog sloja iz mineralno vezane drvene vune (vidjeti sliku 3.14).



Slika 3.14 Dvoslojna i troslojna ploča s EPS-om [148], troslojna ploča s MW [149]

Proizvodni koraci kod proizvodnje višeslojnih laganih građevnih ploča od drvene vune su načelno jednaki kao kod proizvodnje ploča od drvene vune. Višeslojne ploče s kamenom vunom obično se proizvode s lamelnim pločama radi dobivanja spregnutih ploča s boljim mehaničkim svojstvima.

Uobičajene proizvodne dimenzije laganih građevnih ploča su: širina 50 cm, a duljina 100 cm ili 200 cm. Debljine su obično između 1,5 cm i 15 cm.

Lagane građevne ploče od drvene vune su stabilnog oblika i vrlo čvrste. Zbog svojstva da upijaju vodenu paru iz zraka u vrijeme kad se povećava vlažnost zraka i zatim da je otpuštaju u zrak kod smanjenja njegove vlažnosti, koriste se za regulaciju vlažnosti u prostoru. Ploče od drvene vune imaju relativno dobru sposobnost akumulacije topline. Obujamska masa materijala iznosi između 360 kg/m^3 do 450 kg/m^3 . Mogu se proizvesti s preklopom na sve četiri strane. Jednostavno se pile i buše. Neožbukane dobro apsorbiraju zvuk, a ožbukane mogu biti dobar izolator zvuka uz određene uvjete izvođenja. Ploče od drvene vune su idealna podloga za žbuku i beton (izgubljena oplata). Obavijanjem vlakana drvene vune mineralnim vezivom postiže se njihova otpornost na bubrenje, truljenje, insekte i glodavce. Ploče od drvene vune su ekološki preporučljive jer ne sadrže umjetna veziva niti štetne materijale, a osnovna sirovina iz koje se proizvode je obnovljiva.

Drvena vuna u rahlom stanju se koristi kao materijal za ispunu i izolaciju šupljina u građevnim dijelovima zgrade.

Ploče od drvene vune prvenstveno se koriste kao nositelji žbuke i kao ploče za apsorpciju zvuka. Kod drvene gradnje, pored izolacijskih funkcija, koristi se i za građevinsku funkciju kao oplata nosive konstrukcije od drva.

Višeslojne ploče od drvene vune posebno su korisne kao toplinsko-izolacijski sloj kod zidova, stropova i kosih krovova (iznad ili ispod rogova), posebno za izolaciju potencijalnih toplinskih mostova (armirano betonski serklaži, nadvoji, stupovi). Nisu prikladan materijal za perimetarsku izolaciju.

3.11.5 Ekspandirana glina

Ekspandirana glina je mineralni zrnasti materijal crvenkaste boje. Zrna su približno okruglog oblika, promjera najčešće od 3 mm do 20 mm. Jezgra kuglice granulata je porozne strukture sa zatvorenim porama, a površina zrna je sinterirana (zagrijavanjem u procesu proizvodnje do temperature površinskog taljenja zrna).

Proizvodi se od određenih vrsta gline siromašnih vapnom s fino razdijeljenim organskim primjesama. Sirova glina se fino samelje, izmiješa s vodom i granulira u male kuglice. Granule gline putuju kroz sustav rotirajuće valjkaste peći. Temperatura u peći iznosi oko 1 000 °C do 1 200 °C. Tijekom procesa izгоре organske primjese u glini, granule povećavaju nekoliko puta svoj obujam, postaju porozne, a površina kugli se sinterira.

Iz 1 m³ sirove gline proizvede se do 5 m³ ekspandirane gline. Nalazišta sirovine za proizvodnju ekspandirane gline mogu se smatrati praktički neiscrpivim.

Ekspandirana glina je bez mirisa, ne trune, s vrlo niskom prirodnom radioaktivnosti, znatno ispod dopuštenih vrijednosti. Otporna je na kiseline i lužine. Ne gori (eurorazred A1 prema HRN EN 13501-1, [44]) i izdrži bez oštećenja temperature do oko 1 000 °C. U pravilu kapilarno ne upija vlagu i zato je otporna na mraz. Toplinska vodljivost nasipa od ekspandirane gline je između $\lambda = 0.060 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ i $\lambda = 0.070 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Faktor otpora difuziji vodene pare je $\mu = 1$.

Ekspandirana glina se koristi kao toplinsko-izolacijski materijal za nasipavanje šupljina u zidovima i stropovima, zatim kao nasip za izravnanje stropova te kao lagani agregat za proizvodnju toplinsko-izolacijske žbuke i betona (vidjeti sliku 3.15). Za proizvodnju laganih žbuka, mortova za zidanje i estriha upotrebljavaju se zrna s promjerom do 4 mm. Nasip ekspandirane gline upotrebljava se i kao drenažni sloj kod ozelenjenih krovova.



Slika 3.15 Granule ekspandirane gline [150], nasip granula ekspandirane gline [151], lagani beton s ekspandiranom glinom [152]

3.11.6 Ekspandirani perlit

Ekspandirani perlit je lagani, porozni, zrnasti materijal. Zrna su bijelo-žute boje, nepravilnog oblika. Veličina zrna u prosjeku iznosi od 0,1 mm do 6 mm. Pojedinačna zrna su porozne strukture ispunjena zrakom, zbog čega imaju svojstvo toplinske izolacije.

Ekspandirani perlit se proizvodi od vulkanske staklaste stijene perlita koja nastaje ohlađivanjem lave u dodiru s vodom (ispod mora ili ispod naslage leda). Zato stijena perlit u sebi sadrži vodu u porama u masenom udjelu 2 % do 4 %. Proces proizvodnje ekspandiranog perlita započinje mehaničkim usitnjavanjem (mljevenje) perlitne stijene. Usitnjena perlitna zrna zagrijavaju se u peći na temperaturi oko 1 000 °C do žitkog stanja. Voda zatvorena u porama perlita prelazi u vodenu paru i napuhava zrna perlita, tako da se njihov obujam povećava za 15 do 20 puta. Kad vodena para ispari ostaju zračne pore. Tako se stijena „perlit“ pretvara u toplinsko-izolacijski materijal „ekspandirani perlit“. Treba uočiti da postupak ekspandiranja nije kemijski proces već je fizikalni postupak.

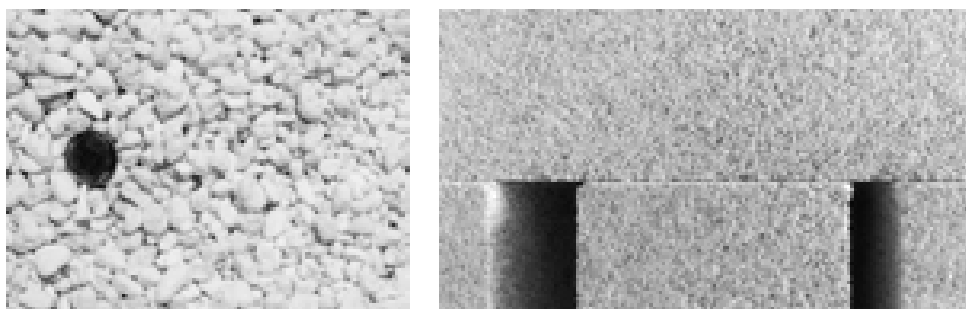
Ovisno o kvaliteti sirovine, tehničkim karakteristikama peći i plamenika, te vođenju procesa, nastali ekspandirani perlit može biti vrlo različite kvalitete. Odgovarajućim postupkom ekspandiranja može se struktura zrna ciljano prilagoditi namjeravanoj primjeni.

Ohlađena zrna ekspandiranog perlita prosijavaju se i razdvajaju po veličini zrna. Budući da je ekspandirani perlit jako osjetljiv na vlagu (u pravilu otvorene pore – upija vodu), zrna se mogu naknadno hidrofobirati silikonima (maseni udio silikona 0,01 %) ili obložiti umjetnim smolama ili bitumenom. Od ekspandiranog perlita mogu se proizvoditi i toplinsko-izolacijske ploče (EPB) s dodatkom organskih ili anorganskih vlakana i veznog sredstva.

Ekspandirani perlit je materijal bez mirisa. Otporan je na razne kemikalije, mikroorganizme, gamad, glodavce. Ne trune. Vijek trajanja mu je neograničen. To je negoriv materijal eurorazreda A1 prema HRN EN 13501-1, [44]. Obrađeni materijal s organskim dodacima (hidrofobiranje, vezivo,...) ima lošija svojstva reakcije na požar i treba ih utvrditi za svaki konkretni slučaj. Nasipi ekspandiranog perlita kratkotrajno su postojani na temperaturi između 900 °C i 1 000 °C, a dugotrajno na temperaturi između 600 °C i 750 °C. Ploče od ekspandiranog perlita kratkotrajno izdrže temperaturu do 250 °C, a dugotrajno su postojane na temperaturi između 110 °C i 130 °C. Toplinska vodljivost ploča od ekspandiranog perlita je između $\lambda = 0.050 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ i $\lambda = 0.060 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Faktor otpora difuziji vodene pare je $\mu = 5$.

Obujamska masa zrna ekspandiranog perlita može iznositi između 100 kg/m³ i 300 kg/m³, ovisno o kvaliteti proizvodnje. Gustoća u nasutom stanju je između 60 kg/m³ i 180 kg/m³.

Ekspandirani perlit se najviše koristi kao toplinsko-izolacijski materijal za nasipavanje. Nasip se nanosi ručno ili pneumatski između letvi ili greda, te kao ispuna šupljina u građevnim dijelovima zgrade. Kod stropova se koristi često kao nasip za izravnjanje. Kod izvedbe nasutog sloja ispod estriha treba uzeti u obzir slijeganje znatog materijala i izvesti ga s potrebnim nadvišenjem kako bi nakon izvedbe estriha nasuti sloj poprimio projektiranu visinu. U manjoj mjeri ekspandirani perlit se koristi u obliku toplinsko-izolacijskih ploča (vidjeti sliku 3.16). Ekspandirani perlit koristi se i kao lagani agregat u mortovima i betonima.



Slika 3.16 Granule ekspandiranog perlita [153], ploče od ekspandiranog perlita [154]

3.11.7 Ekspandirani polistiren

Polistiren (PS) je bezbojan termoplastični sintetički materijal koji se izrađuje od monomera stirena još od 1930. godine. U ekspandiranom obliku kao toplinsko-izolacijski materijal prva ga je počela proizvoditi 1954. godine njemačka tvrtka BASF pod trgovačkom imenom

Styropor. Danas naziv Styropor za toplinsko-izolacijske ploče od ekspandiranog polistiren smiju nositi samo proizvođači članica njemačkog udruženja IVH (Industrieverbandes Hartschaum), koji zadovoljavaju stroge smjernice kvalitete propisane od strane udruženja. Može se stoga reći da su sve Styropor ploče ploče od ekspandiranog polistirena, ali sve ploče od ekspandiranog polistirena nisu Styropor ploče.

Ekspandirani polistiren (EPS) je organski sintetički toplinsko-izolacijski materijal pjenaste porozne strukture i vrlo niske gustoće. Isporučuje se u obliku ploča dimenzija 50 cm x 100 cm, gotovih izolacijskih elemenata ili granula. Volumni udio polistirena u pločama iznosi svega 2 %, a ostatak je zrak. Zato su ploče od ekspandiranog polistirena vrlo lagane, obujamske mase približno između 15 i 30 kg/m³. U pravilu su bijele boje. Na tržištu se mogu naći i ploče sive boje koje se razlikuju od bijelih po tome što u sebi sadrže grafit koji dodatno poboljšava njihovo toplinsko-izolacijsko svojstvo.

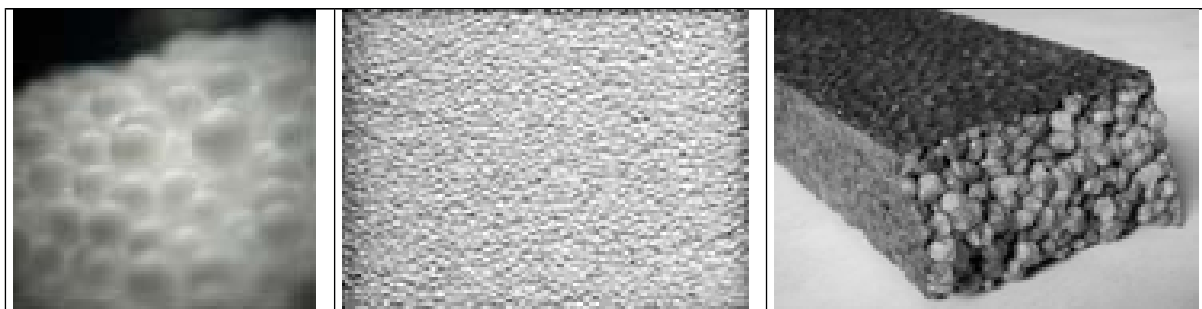
Osnovni materijal potreban za proizvodnju polistirena je stiren koji se dobiva kemijskom preradom nafte. Polimerizacijom stirena nastaju sitne čvrste granule polistirena u obliku perli, slične staklu. Nasipna gustoća ovih granula je oko 650 kg/m³. Proizvodnja ekspandiranog polistirena iz granula odvija se u tri faze: impregniranje, predeksandiranje i konačno ekspandiranje. U prvoj fazi granule polistirena impregniraju se lako hlapljivom tekućinom, primjerice pentanom ili ugljikovim dioksidom. U drugoj fazi, kratkotrajnim zagrijavanjem na temperaturi oko 90 °C dolazi do predeksandiranja impregniranog polistirena. Naime, na povišenoj temperaturi pentan u granulama započne isparavati, a omekšane granule pri tome ekspandiraju povećavajući svoj obujam 20 do 50 puta u odnosu na početno stanje. Nasipna gustoća predeksandiranih granula iznosi 15 do 30 kg/m³, ovisno o trajanju djelovanja topline. Ovako predeksandirani materijal može se skladištiti i do nekoliko tjedana. Konačno se ekspandiranje provodi u zatvorenim kalupima koji se zagrijavaju pregrijanom vodenom parom prema posebnom postupku. U tim uvjetima predeksandirane granule nastave i dalje ekspandirati, te se omekšana zrnca međusobno zalijepe i nastaju blokovi pjenastog materijala s pretežito zatvorenim porama. Nakon stabilizacije dimenzija blokova, pomoću vruće žice iz blokova se režu toplinsko-izolacijske ploče željene veličine (vidjeti sliku 3.17).

Ploče ekspandiranog polistirena imaju toplinsku vodljivost između $\lambda = 0.035 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ i $\lambda = 0.040 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Faktor otpora difuziji vodene pare je između $\mu = 20$ i $\mu = 100$ ovisno o gustoći polistirena. Stabilnog su oblika, otporne na gljivice i trulež. Zbog zatvorene porozne strukture ne upijaju vlagu, tako da ne mogu bubriti. Kod ispravne ugradnje mogu obavljati funkciju toplinske izolacije preko 50 godina. Ekspandirani polistiren kratkotrajno je otporan do temperature 100 °C, a dugotrajno bez oštećenja može biti izložen temperaturama između 75 °C i 85 °C, ovisno o njegovoj obujamskoj mase. U slučaju požara oslobađa gusti dim i štetne plinove.

Ekspandirani polistiren ne smije doći u dodir s ljepilima koja sadrže otapala te s motornim gorivima (benzin,...). Kod duže izloženosti UV zračenju, ekspandirani polistiren se razgrađuje.

Kod mehaničke obrade ekspandiranog polistirena ne nastaje prašina kao kod vlaknastih toplinsko-izolacijskih materijala. Udisanje para koje nastaju kod rezanja EPS-a vrućom žicom treba izbjegavati jer može uzrokovati mučninu.

Ekspandirani polistiren u obliku ploča ugrađuje se u vanjske zidove (ETICS sustav, u jezgri), ravne krovove, kose krovove (iznad, između ili ispod rogova), stropove prema negrijanim prostorima (podrum, garaža, tavan) te u plivajuće podove za izolaciju od udarnog zvuka (elastificirani ekspandirani polistiren).



Slika 3.17 Granule ekspaniranog polistirena [155], presjek ploče EPS-a [156], grafitni EPS [157]

3.11.8 Ekspanirani vermikulit

Ekspanirani vermikulit je anorganski materijal dobiven ekspanzijom vulkanske stijene vermikulit. Materijal je zrnaste strukture, sivo zelenkaste boje. Zrnca su oblikovana poput „ručne harmonike“ tj. sastoje se od mnogo zračnih slojeva – jastuka, što im daje svojstvo toplinske izolacije.

Vermikulit se sastoji uglavnom od željeznog, aluminijskog i magnezijeva silikata i pripada grupi minerala tinjca (liskuna) koje karakterizira slojevita struktura sa zarobljenom vodom u porama. Nakon otkapanja sirovina se usitni u odgovarajućim mlinovima i zatim u specijalnim pećima kratkotrajno zagrije na oko 1 100 °C. Pri tome voda koja se nalazi u porama vermikulita naglo prelazi u paru i kamen ekspanira povećavajući svoj obujam 15 do 20 puta u odnosu na početni, a površina se sinterira. Tako dobivena zrnca ekspaniranog vermikulita sadrže mnogo malih slojeva zraka zbog kojih ekspanirani vermikulit ima malu obujamsku masu i zato dobra toplinsko-izolacijska svojstva. Zrna se zatim prosijavaju, a ovisno o namjeravanoj primjeni i hidrofobiraju pomoću bitumenske emulzije ili umjetnih smola.

Ekspanirani vermikulit je materijal bez mirisa. Otporan je na razne kiseline, lužine, mikroorganizme, gamad, glodavce. Ne trune. Vijek trajanja mu je neograničen. Ako nije hidrofobiran upija veću količinu vode. To je negoriv materijal eurorazreda A1 prema HRN EN 13501-1, [44]. Obradeni materijal s organskim dodacima (hidrofobiranje, vezivo,...) ima lošija svojstva reakcije na požar i treba ih utvrditi za svaki konkretni slučaj. Granična temperatura primjene za proizvode bez gorivih dodatnih materijala iznosi oko 1 000 °C.

Obujamska masa zrna ekspaniranog vermikulita iznosi između 150 kg/m³ i 200 kg/m³. Gustoća u nasutom stanju je između 70 kg/m³ i 170 kg/m³, ovisno o veličini zrna. Toplinska vodljivost nasipa od ekspaniranog vermikulita je oko $\lambda = 0.070 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Faktor otpora difuziji vodene pare je između $\mu = 3$ i $\mu = 10$.

Ekspanirani vermikulit se koristi kao toplinsko-izolacijski materijal za nasipavanje. Nasip se nanosi ručno ili pneumatski između letvi ili greda, te kao ispuna šupljina u građevnim dijelovima zgrade. Kod stropova se koristi često kao nasip za izravnjanje. U manjoj mjeri ekspanirani vermikulit se koristi u obliku ploča za zaštitu od požara. Ekspanirani vermikulit koristi se i kao lagani agregat u mortovima i betonima (vidjeti sliku 3.18).



Slika 3.18 Mikroskopska slika strukture ekspandiranog vermikulita [158], granule ekspandiranog vermikulita [159], nasip granula ekspandiranog vermikulita [159]

3.11.9 Ekspandirano pluto

Pluto se dobiva iz kore hrasta plutnjaka koji raste uglavnom u području Sredozemlja (Portugal, Španjolska,...). Kora hrasta plutnjaka guli se prvi put kad je drvo staro 25 do 30 godina, a zatim se to može ponavljati svakih 7 do 10 godina, koliko je vremena potrebno da bi izrasla nova kvalitetna kora. Inače, životni vijek hrasta plutnjaka je između 120 i 150 godina.

Pluto je, dakle, prirodna, obnovljiva, biljna sirovina za proizvodnju toplinsko-izolacijskog materijala „ekspandiranog pluta“. Sastoji se od pora promjera oko 25 μm koje su ispunjene zrakom, tako da obujam pora u plutu iznosi oko 90 % ukupnog obujma. Stjenke pora pluta su od celuloze koja je obavijena subrinskom smolom i voskom.

Nakon što se skine s debla, kora hrasta plutnjaka se sortira po kvaliteti. Najkvalitetniji dijelovi kore rabe se za proizvodnju zahtjevnijih proizvoda kao primjerice čepova za boce. S dijelova kore od kojih će se proizvoditi ekspandirano pluto najprije se odstrani površinski dio koji će se kasnije koristiti kao gorivo u procesu proizvodnje. Zatim se pluto, uz eventualno dodatak recikliranog pluta, mehanički samelje tako da se dobiju granule pluta. Ove granule prirodnog pluta mogu se već koristiti kao zrnasti toplinsko-izolacijski materijal. Radi proizvodnje ekspandiranog pluta granule pluta se stavljaju u odgovarajuće kalupe i izlažu djelovanju pregrijane vodene pare temperature do 350 °C i povećanog tlaka prema propisanom postupku. Kod toga procesa, koji traje oko 30 minuta, granule pluta ekspandiraju dva do četiri puta i međusobno se spajaju pomoću subrinske smole koja se izlučuje iz samog pluta. Iz nastalog bloka ekspandiranog pluta, nakon njegova hlađenja, režu se ploče ekspandiranog pluta (ICB) dimenzija 50×100 cm ili 60×120 cm kao konačni toplinsko-izolacijski proizvod.

Ekspandirano pluto je materijal otporan na gljivice, plijesni, kukce i glodavce. Tlačna nosivost ploča je relativno visoka (tlačno naprezanje kod 10 %-tne deformacije iznosi 0,10 do 0,20 N/mm²). Otporan je na vlagu i relativno otvoren za difuziju vodene pare ($\mu = 5$ do 10). Ploče pluta su elastične. Pluto je otporno na kiseline, lužine, vrući bitumen, vapno,...

Toplinska vodljivost ekspandiranog pluta u nasutom stanju je $\lambda = 0.040 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, a ploča od ekspandiranog pluta između $\lambda = 0.045 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ i $\lambda = 0.055 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Faktor otpora difuziji vodene pare je između $\mu = 5$ i $\mu = 10$.

Ekspandirano pluto se isporučuje u pločama i kao granule promjera zrna između 3 mm i 12 mm. Postoje i ploče ekspandiranog pluta koje se proizvode dodavanjem posebnog veziva kao što su formadehidna smola ili bitumen (vidjeti sliku 3.19). Ploče ekspandiranog pluta upotrebljavaju se osim za toplinsku izolaciju zidova, stropova i krovova i za zvučnu izolaciju, naročito za izolaciju udarnog zvuka i smanjenje širenja vibracija. Ugrađuju se na ravnu i suhu podlogu. Ploče se pričvršćuju na podlogu lijepljenjem ili odgovarajućim pričvrsnim elementima (tiple i vijci s tanjurima / diskovima).



Slika 3.19 Struktura ploča od pluta [160], detalj ruba ploče od pluta [161], ploče od pluta [162]

3.11.10 Ekstrudirani polistiren

Polistiren ploče od tvrde pjene proizvode se i kao ploče od ekstrudiranog polistirena (XPS). Ekstrudirani polistiren kao toplinsko-izolacijski materijal, karakteristične svijetloplave boje, razvila je američka tvrtka Dow Chemical Company pod trgovačkim imenom „Styrofoam“. Danas postoji više proizvođača ploča ekstrudiranog polistirena od kojih svaki proizvodi ploče drugačije boje.

Za XPS ploče karakteristična je glatka kožica na površini ploča koja nastaje kao posljedica tehnološkog procesa proizvodnje. Ova kožica dodatno doprinosi povećanju otpornosti XPS ploča protiv djelovanja vode.

Proizvodnja ekstrudiranog polistirena temelji se na granulama polistirena u obliku perli kao i proizvodnja expandiranog polistirena. Granule polistirena najprije se u ekstruderu omekšavaju i impregniraju s ugljikovim dioksidom ili pentanom (ranije se koristio CFC, ali je početkom 90-tih godina prošlog stoljeća zabranjena njegova uporaba kao sredstva za pjenjenje XPS-a i PUR-a zbog štetnog djelovanja na ozonski sloj u zemljinoj atmosferi) te kontinuirano potiskuju kroz mlaznicu u obliku širokog prereza s podesivom debljinom između 2 cm i 20 cm. Tako nastane „beskonačni“ homogeni toplinsko-izolacijski materijal sa zatvorenim porama koji se nakon prolaza kroz hladnu zonu linije za ekstrudiranje reže u ploče. Ploče se zatim skladište dok ne postignu konstantnu masu.

XPS nije hranjiva podloga za razvoj mikroorganizama. Odbija vodu i otporan je na mraz. Zato se ploče od XPS-a ugrađuju kao perimetarska toplinska izolacija u dodiru s tlom. Granične temperature primjene toplinsko-izolacijskih ploča od XPS-a su između $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $+75\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na temperaturi iznad $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ materijal omekšava.

Toplinska vodljivost ploča od ekstrudiranog polistirena je između $\lambda = 0.030\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ i $\lambda = 0.040\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Faktor otpora difuziji vodene pare je između $\mu = 80$ i $\mu = 250$.

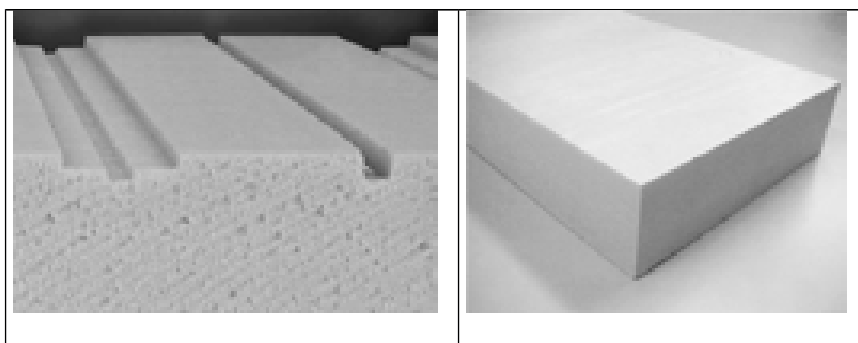
Ugrađeni toplinsko-izolacijski proizvodi od XPS-a, u normalnim okolnostima, neškodljivi su za ljude. Međutim tijekom proizvodnje, zatim rezanjem ploča pomoću uređaja s vrućom žicom i u slučaju požara, oslobađaju se tvari štetne za ljudsko zdravlje.

Kod duljeg izlaganja UV zračenju, XPS postaje krhak. Zato ploče od XPS-a treba uvijek zaštititi od sunčeva zračenja odgovarajućim oblogama, kaširanjem ili žbukanjem. U slučaju žbukanja ploča, glatku kožicu koja nastaje na površini ploča tijekom proizvodnje, treba mehanički odstraniti.

XPS ne smije doći u dodir s motornim gorivima, proizvodima od katrana ili ljepljivima koji sadrže otapala. Za lijepljenje ploča treba koristiti posebna odgovarajuća ljepljiva.

Ekstrudirani polistiren se isporučuje u obliku ploča i može se kao toplinsko-izolacijski materijal upotrebljavati za ravne i obrnute krovove, za izolaciju iznad rogova kosih krovova,

zatim s unutarnje strane i u jezgri zidova, izolaciju podova na tlu, naročito u slučaju većih opterećenja (industrijski podovi, parkirališta iznad grijanih prostora), toplinsku izolaciju hladnjača i perimetarsku toplinsku izolaciju (vidjeti sliku 3.20).



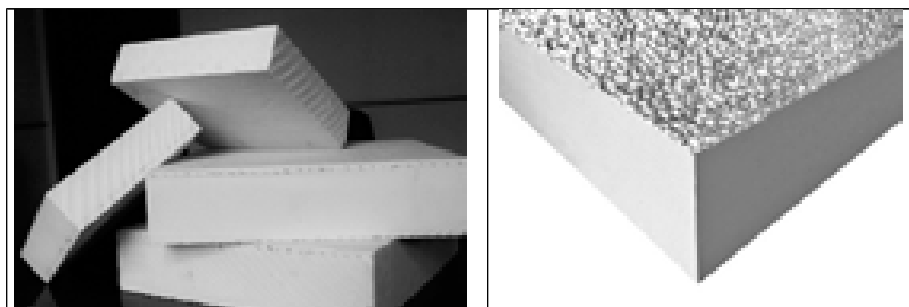
Slika 3.20 Struktura presjeka XPS-a [163], ploče XPS-a [164]

3.11.11 Fenolna pjena

Fenolna pjena (PF) je čvrsti toplinsko-izolacijski materijal iz sintetičke pjene na bazi polimera proizvedenog polikondenzacijom fenola. Pjenasti polimer željene gustoće dobije se dodatkom pjenila – tvari koja zagrijavanjem razvija kemijski neutralne plinove.

Fenolna pjena slabo provodi toplinu. Materijal se relativno povoljno ponaša u uvjetima požara tj. razvija manju količinu dima i ne dolazi do odvajanja zapaljenih otopljenih kapi materijala. Toplinska vodljivost ploča od fenolne pjene je između $\lambda = 0.030 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ i $\lambda = 0.045 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.

Ploče od fenolne pjene mogu biti kaširane s jedne ili obje strane staklenim pustom (voalom) ili aluminijskom folijom (vidjeti sliku 3.21). Na podlogu se lijepe ili pričvršćuju odgovarajućim pričvrstnim elementima (tiple i vijci s tanjurima / diskovima).



Slika 3.21 Ploče od fenolne pjene [165], ploča od fenolne pjene kaširana alu folijom [166]

3.11.12 Kalcijev silikat

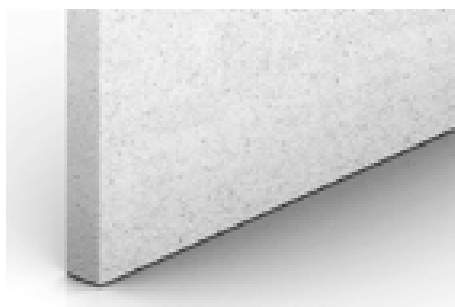
Toplinsko-izolacijski materijal kalcijev silikat pripada grupi toplinsko-izolacijskih materijala iz mineralnih sirovina. Isporučuje se u pločama bijelo – sive boje. Lako se obrađuje alatima za obradu drva. Obujam pora ispunjenih zrakom iznosi između 90 % i 93 % ukupnog obujma ploča. Radi se o materijalu s međusobno povezanim porama.

Ploče od kalcijeva silikata proizvode se od kalcijeva oksida, CaO , (vapna) i silicijeva dioksida, SiO_2 , (pijeska) te s 3 % do 6 % celuloznih vlakana. Ove sirovine se pomiješaju s vodom i nakon kratkog vremena reakcije dobije se kalcijev silikat – hidrat (hidrat označava da tvar sadrži molekule vode) kao prvi stupanj u proizvodnji kalcijeva silikata. U šuplinama u

materijalu koje će se kasnije ispuniti zrakom sada se još nalazi voda. Ovom smjesom ispune se kalupi i uvedu u specijalni kotao gdje se izlažu djelovanju vodene pare i povećanog tlaka pri čemu se kristali kalcijeva silikata međusobno spajaju i nastaju fine međusobno povezane pore. Tijekom sušenja ploča voda iz pora ispari i pore se ispune zrakom.

Kalcijev silikat ne smije doći u dodir s kiselinama jer ga one otapaju. Otporan je na plijesan (zbog svoje lužnatosti), insekte i glodavce. Ploče se suhe skladište. Polažu se na suhu podlogu. Vlažne ploče se u slučaju smrzavanja oštećuju. Toplinska razgradnja ugrađenih vlakana od celuloze započinje kod temperature 320 °C, a taljenje kalcijeva silikata na temperaturi oko 1150 °C. Obujamska masa materijala iznosi između $\rho = 200 \text{ kg/m}^3$ i $\rho = 290 \text{ kg/m}^3$, a toplinska vodljivost između $\lambda = 0,050 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ i $\lambda = 0,070 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Faktor otpora difuziji vodene pare je između $\mu = 2$ i $\mu = 6$. Kod ugradnje i korištenja kalcijev silikat ne djeluje štetno na zdravlje ljudi niti onečišćava okoliš. Jedino se treba zaštititi od prašine koja nastaje kod piljenja ploča.

Toplinsko-izolacijske ploče od kalcijevog silikata su obično dimenzija 50x125 cm ili 100x125 cm i debljine 2,5 cm do 10 cm (vidjeti sliku 3.22). Upotrebljavaju se najviše za toplinsku izolaciju zida i krova s unutarnje strane. Djeluju kao regulator vlažnosti prostora: prihvaćaju povećanu vlagu iz prostora, akumuliraju je i, kad se za to stvore uvjeti, ponovno odaju u prostor. Mnogo se koriste kod sanacija postojećih zgrada. Na podlogu se pričvršćuju ili ljepivim mortom na bazi cementa ili odgovarajućim pričvrstnim elementima (tiple i vijci s tanjurima / diskovima).



Slika 3.22 Ploče od kalcijevog silikata [167]

3.11.13 Kokos

Kokosova vlakna su sastavni dio vanjske kore kokosovog oraha, ploda kokosove palme. Kokosova palma je drvo tropskih morskih obala iz porodice palmi. Za proizvodnju jedne tone kokosovih vlakana potrebno je oko 13 000 kokosovih oraha, odnosno za jedan kubni metar toplinske izolacije od kokosovih vlakana, gustoće 80 kg/m^3 , potrebno je oko 1 000 oraha. Kokosova vlakna se već oko 100 godina koriste u građevinarstvu.

Za proizvodnju kokosovih vlakana kora kokosova oraha se potapa u velikim bazenima gdje dolazi do truljenja organskih dijelova koji se nalaze oko vlakana, dok sama kokosova vlakna ne trunu. Kokosova vlakna se zatim peru i suše na zraku. Još eventualno preostalo tkivo uz vlakna odstranjuje se mehaničkim putem (udaranje, valjanje). Ovako dobivena kokosova vlakna pakiraju se u velike bale i isporučuju proizvođaču toplinsko-izolacijskog materijala (vidjeti sliku 3.23).

Kokosova vlakna duljine su od 15 do 30 cm. Vlakna imaju blagi miris koji ne iritira. Izolacijski materijal ne emitira štetne tvari. Može ga se reciklirati. Proizvodi su savitljivi, stabilnog oblika, otvoreni za difuziju vodene pare. Nisu osjetljivi na vlagu i zato su alternativna izolacija tamo gdje dolazi u obzir ugradnja samo umjetno proizvedenih toplinsko-izolacijskih materijala. Kokosova vlakna razgrađuju se na temperaturi od 270 °C. Za poboljšanje ponašanja u slučaju izloženosti požaru može se koristiti borova sol ili slična sredstva. Toplinska vodljivost je između $\lambda = 0.045 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ i $\lambda = 0.050 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Faktor otpora difuziji vodene pare je između $\mu = 1$ i $\mu = 2$.

Toplinsko-izolacijski proizvodi od kokosovih vlakana isporučuju se u obliku blazina ili u rastresitom stanju u vrećama.



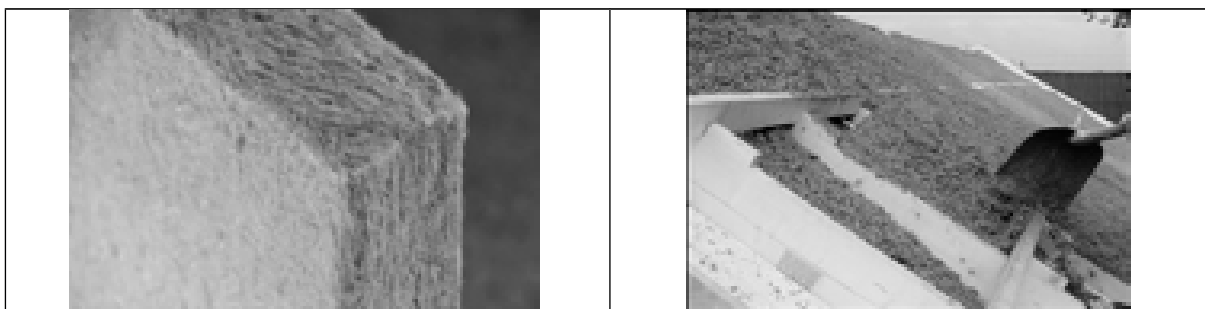
Slika 3.23 Kokosova vlakna [168], bale kokosovih vlakana [169], ploče od kokosovih vlakana [170]

3.11.14 Konoplja

Konoplja je jedna od najstarijih biljaka koju je čovjek upotrebljavao. Od konopljinih vlakana ljudi su izrađivali odjeću još od 9. stoljeća prije Krista. Zbog opojnog djelovanja, uzgoj više vrsta industrijske konoplje u mnogim državama je zabranjen.

Vlakna konoplje, dobivena iz stabljike konoplje, služe kao sirovina za proizvodnju tkanine i užadi te toplinsko-izolacijskih proizvoda. Od 10 tona konoplje može se dobiti oko 3 tone upotrebljivih vlakana za toplinsko-izolacijski materijal.

Konoplja se nalazi na tržištu u obliku blazina ili kao rastresita vuna u vrećama (vidjeti sliku 3.24). Da bi se mogla proizvesti blazina, filc od konoplje pojača se sa sintetskim poliesterskim vlaknima u masenom udjelu oko 15 %. Za deblje blazine mogu se koristiti prirodna vezna sredstva na bazi škroba. Toplinska vodljivost blazina od konoplje je između $\lambda = 0.040 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ i $\lambda = 0.050 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Faktor otpora difuziji vodene pare je između $\mu = 1$ i $\mu = 2$.



Slika 3.24 Ploče od industrijske konoplje [171], rastresita toplinska izolacija od konoplje [172]

3.11.15 Lan

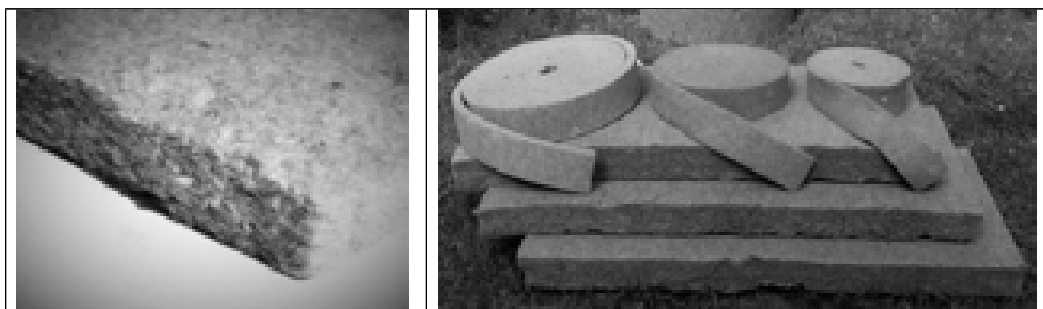
Lan je jednogodišnja zeljasta biljka s vlaknastim stablom i sjemenkama bogatim uljem. Zato se lan kao korisna biljka za proizvodnju ulja i vlakana za izradu tkanina za odjeću koristi već preko 4 000 godina. To je najstarija uzgajana tekstilna biljka. Tek u 19. stoljeću bila je potisnuta razvojem industrije pamuka. Razlikuje se predivi lan koji se uzgaja radi proizvodnje lanenih vlakana i uljani lan od kojeg se proizvodi laneno ulje.

Predivi lan ima stabljiku visine 60 do 120 cm. Vlakna se izdvajaju iz kore stabljike (lika), močenjem u vodi i zatim mehaničkom obradom. Od vlakana vrhunske kvalitete proizvodi se odjeća, posteljina, stolnjaci,..., a od vlakana slabije kvalitete proizvodi se tehnički tekstil (geotekstili, ojačala za kompozite,...). Vlakna lana najslabije kvalitete nazivaju se kučina i upotrebljavaju se za izradu toplinsko-izolacijskog materijala u obliku netkanog tekstila (filca, pusta).

Toplinsko-izolacijski proizvodi izrađuju se uglavnom iz izdvojenih kratkih lanenih vlakana. Radi poboljšanja ponašanja u uvjetima požara vlakna se impregniraju bornom soli ili sličnim sredstvom (maseni udio do 10 %). Za proizvodnju tanjih blazina, kao vezno sredstvo, gotovo isključivo se upotrebljavaju prirodna ljepila, kao npr. krumpirov škrob (maseni udio veznog sredstva oko 10 %). Deblje blazine moraju se stabilizirati sintetskim vlaknima. Površina blazine još se dodatno impregnira.

Lanena vlakna su izuzetno čvrsta, rastezljiva i trajna. Otporna su na vlagu i moljce te razne štetočine. Ne djeluju štetno niti na ljudsko zdravlje niti na okoliš. Toplinsko-izolacijski proizvodi od lanenih vlakana do temperature 100 °C ne mijenjaju svoj obujam. Na temperaturi preko 200 °C smanjuje se obujam za oko 4 %. Na temperaturama iznad 320 °C lanena izolacija pretvara se u ugljen.

Toplinsko-izolacijski proizvodi od lanenih vlakana na tržištu se nalaze u obliku blazina, runa ili kao nevezana vuna za punjenje šupljina (vidjeti sliku 3.25). Toplinska vodljivost blazine od lanenih vlakana je između $\lambda = 0.040 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ i $\lambda = 0.050 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Faktor otpora difuziji vodene pare je između $\mu = 1$ i $\mu = 2$.



Slika 3.25 Blazina od lana [173], proizvodi od lana [174]

3.11.16 Mineralna vuna

Vuna (runo) i dlake su vlakna životinjskog porijekla koja su građena od bjelančevine keratina. Čovjek ih je od davnine koristio zbog izražene toplinsko-izolacijske sposobnosti. U širem smislu naziv vuna se koristi za označavanje i drugih materijala, mineralnog porijekla ili proizvedenih kemijskim putem, koji su vunaste (runaste) strukture i sličnih karakteristika kao prirodna vuna, prvenstveno u pogledu sposobnosti toplinske izolacije.

Mineralna vuna (MW) je toplinsko izolacijski materijal vunaste strukture koji se sastoji od mineralnih vlakana. Kako to sam njen naziv sugerira, mineralna vuna je mineralnog porijekla. Mineralno vlakno je opći naziv za sva nemetalna anorganska vlakna. Mineralna vuna je zajednički naziv za kamenu vunu, staklenu vunu i mineralnu vunu dobivenu iz šljake visokih peći (vrsta peći koja služi u procesu dobivanja željeza).

Sirovine za proizvodnju mineralne vune mogu se smatrati praktički neiscrpnim. Mineralna vuna je vlaknasto porozni materijal od vrlo tankih umjetnih mineralnih vlakana, međusobno ispremiješanih, srednjeg promjera 3 μm do 5 μm . Duljina vlakana je, u prosjeku, nekoliko centimetara. Iz jednog kubnog metra sirovine može se proizvesti, ovisno o obujamskoj masi konačnog proizvoda, i do 100 m^3 mineralne vune.

Postoje različiti tehnološki postupci proizvodnje vune iz umjetnih vlakana, a zajedničko im je izrada runa i učvršćenje runa. Runo je rahla tvorevina od vlakana raspoređenih u više slojeva, više ili manje pravilno usmjerenih ili raspoređenih u svim pravcima (dakle slučajno), kojoj se kompaktnost uglavnom temelji na koheziji između vlakana. Čvrstoća runa s ovako povezanim vlaknima je relativno mala, pa se zato runa učvršćuju raznim postupcima: mehaničkim (zamršivanjem vlakana po presjeku runa), kemijskim (dodavanjem odgovarajućih veznih sredstava) ili termički (dodavanjem posebnih vlakana topljivih na nižoj temperaturi, pa kod zagrijavanja djeluju kao ljepilo). Ovako učvršćeno runo predstavlja gotov toplinsko-izolacijski materijal, za kojeg se često koristi naziv pust (filc), i od kojeg se dalje izrađuju konačni proizvodi za primjenu. Od 50-tih godina 20. stoljeća ovakva vrsta materijala dobila je naziv netkani tekstili. Općenito, netkani tekstil je plošna tvorevina od vlakana koja se ne izrađuje tkanjem ili pletenjem, već su vlakna međusobno povezana kohezijskim silama ili veznim sredstvom ili njihovom kombinacijom.

Vlakna mineralne vune su osnova za izradu svih toplinsko-izolacijskih proizvoda od mineralne vune. Proizvodi od mineralne vune isporučuju se u rastresitom stanju kao mekana, lagano prešana vuna u vrećama, zatim u vidu blazine (prostirke) od pusta (filca) i u obliku polutvrdih ili tvrdih ploča uz dodatak veziva na bazi fenol-formaldehidne smole te mineralnih ulja i drugih dodataka radi dodatnog hidrofobiranja i smanjenja prašenja. Ploče mineralne vune koje se koriste za toplinsku izolaciju u zgradarstvu sadrže obično maseni udio veziva najviše do 7 % i maseni udio ulja i dodataka do 1 %.

Kamena i staklena vuna međusobno se razlikuju po sirovini od koje se proizvode, po tehnološkom postupku proizvodnje i po nekim svojstvima materijala. Mineralna vuna od šljake danas se proizvodi vrlo rijetko.

Toplinska vodljivost mineralne vune je između $\lambda = 0.035 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ i $\lambda = 0.050 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Mineralna vuna je jako paropropusna (gotovo kao zrak). Negoriva je, pa se može koristiti u pasivnim sustavima za zaštitu od požara. Mineralna vuna je otporna na mikroorganizme (gljivice, plijesni), kukce i glodavce. Zbog vlaknasto porozne strukture i relativno velikog otpora strujanju zraka dobro apsorbira zvuk. Mineralna vuna nema mogućnost kapilarnog upijanja vode, ali je treba zaštititi od oborina tijekom izgradnje i u fazi korištenja zgrade.

Tijekom obrade mineralne vune stvara se prašina koja može nadražiti oči, nosnu sluznicu, grlo i dišne putove. Mineralna vuna koja se danas proizvodi biološki se razgrađuje u roku manjem od 40 dana (sa starom tehnologijom proizvodnje to je iznosilo nekoliko stotina dana). Prema rezultatima istraživanja IARC-a (Međunarodna organizacija za istraživanje raka), mineralna vuna se ne smatra kancerogenom za ljude.

Proizvodi od mineralne vune koriste se za toplinsku, zvučnu i protupožarnu zaštitu u građevinarstvu, industriji i brodogradnji.

Najnovija generacija proizvoda od mineralne vune upotrebljava ECOSE tehnologiju s novim vezivom koje je prirodno, na bazi obnovljivih sirovina (glukoznih šećera), dakle, bez fenolformaldehida. Proizvodi od mineralne vune dobiveni ovom tehnologijom prirodno su smeđe boje (bez dodavanja umjetnih boja), ugodniji su za rad, bez mirisa, manje iritantni, stvaraju manje prašine. Za njihovu proizvodnju se rabi manje energije. Uz to ovi proizvodi zadržavaju sva povoljna svojstva tradicionalnih proizvoda od mineralne vune (vidjeti sliku 3.26).

ECOSE tehnologija je razvijena za toplinsku izolaciju od staklene i kamene vune, ali se može koristiti i kod drugih proizvoda kod kojih bi zamjena veziva donijela određene prednosti.

Kamena vuna

Kamena vuna se proizvodi od vulkanskog kamena: diabaza, dolomita i bazalta. Kamen se tali u kupolnoj peći na temperaturi oko 1500 °C. Rastaljeni kamen u obliku lave teče iz kupolne peći preko brzo rotirajuće predilice. Jakom strujom zraka tekuća lava se pretvara u mnoštvo tankih kamenih vlakana i istovremeno se ohlađuje. Vlakna se slažu u slojevima i

dodaje im se vezivo i mineralna ulja. Nakon komprimiranja mineralna vuna dalje putuje pokretnom trakom do komore za stvrdnjavanje u kojoj, pri temperaturi zraka od 250 °C, vezno sredstvo polimerizira uslijed čega se vlakna na mjestima križanja međusobno povezuju i kamena vuna dobiva konačnu stabilnu strukturu i čvrstoću. Na kraju se materijal reže u željenim dimenzijama i pakira za isporuku. Cijeli tehnološki proces je automatiziran i nadziran.

Točka taljenja kamene vune je preko 1 000 °C. Eurorazred reakcije na požar je A1 prema HRN EN 13501-1, [44].

Toplinsko-izolacijski proizvodi iz kamene vune isporučuju se u pločama, lamelama, blazinama, kao nevezana vuna u vrećama (prikladna za toplinsku i zvučnu izolaciju šupljina u građevnim dijelovima zgrade), ali i kao oblikovani komadi, primjerice cijevaci za toplinsku izolaciju cjevovoda, ploče s gornjom površinom u nagibu za ravne krovove, itd. Ploče kamene vune mogu biti obložene (kaširane) staklenim runom (voalom). Industrijske blazine mogu biti s jednostrano ili obostrano našivenim žičanim pletivom. Ispod pletiva može biti aluminijska folija. Blazine mogu biti od lamela mineralne vune nalijepljenih jednostrano na aluminijsku foliju.

Staklena vuna

Osnovna sirovina za proizvodnju staklene vune jest kvarcni pijesak i stakleni otpad (sudjeluje s 30 % do 60 %). Tehnologija proizvodnje staklene vune slična je onoj kamene vune, a odvija se u dvije faze: dobivanje silikatno-staklene taljevine i zatim iz taljevine dobivanje tankih staklenih vlakana. Vlakna se slažu na pokretnoj traci i prskaju tekućim veznim sredstvom. Na pokretnoj traci oblikovani međuproizvod prolazi kroz peć za sušenje, a zatim se reže u gotove proizvode. U nekim slučajevima površina staklene vune kašira se tankim oblogama.

Vlakna staklene vune su elastičnija i nekoliko puta dulja od vlakana kamene vune. Povratna elastičnost vlakana omogućava sabijanje proizvoda na pet puta manji obujam i pakiranje u role (manji obujam u transportu i skladištenju). Točka taljenja staklene vune je niža nego kod kamene vune i iznosi oko 700 °C.



Slika 3.26 Proizvodi od kamene vune [175], ploče od kamene vune proizvedene ECOSE tehnologijom [176], blazina od staklene vune proizvedena ECOSE tehnologijom [176]

3.11.17 Pamuk

Pamuk su biljna vlakna koja okružuju sjeme grmolikog nasada pamuka (pamučike), biljke iz porodice sljezova. Na grmovima pamuka najprije se razviju pupoljci, zatim cvjetovi i onda plodovi, nazvani „tobolci“. Kad sazriju, tobolci se otvaraju i pojavljuje se mala bijela vlaknasta lopta, pamuk. Sadržaj celuloze u pamučnim vlaknima je preko 90 %. Od vlakana pamuka se prede konac, a od njega se tkanjem proizvodi pamučna tkanina. Od 19. stoljeća, napretkom industrije i poljoprivrede, pamuk postaje i ostaje do danas tekstilno vlakno najviše korišteno u svijetu, unatoč kasnijoj pojavi sintetskih vlakana.

Kao toplinsko-izolacijski materijal koristi se vuna od pamuka. Ona se proizvodi dijelom od prirodnog pamuka koji nije prikladan za korištenje u tekstilnoj industriji te od recikliranog

pamuka iz otpadaka tkanine kod krojenja i od stare pamučne odjeće. Zato pamuk pripada grupi ekoloških materijala.

Sirovina iz koje se proizvodi izolacijski pamuk se najprije pere, a zatim raščešljava posebnim strojevima. Budući da je pamuk goriv materijal, njegova reakcija na požar se poboljšava dodavanjem borove soli. O količini dodane borove soli ovisi razred reakcije na požar gotovog izolacijskog materijala. Nakon raščešljavanja vlakna se suše u vrućem zraku temperature 120 °C do 130 °C pri čemu prirodni voštani sloj na površini vlakna postaje propustan za borovu sol koja prodire do vlakna i trajno se vezuje na njega. Duljina vlakana je oko 20 do 30 mm, a promjer vlakna oko 0,1 mm.

Pamuk dobro apsorbira vodu (zato se od pamuka rade ručnici) i propustan je za vodenu paru, pa je zato dobar regulator vlage u prostoru. Pamuk dobro apsorbira zvuk. Lagan je i mekan. Ne izaziva alergiju. Trajno je otporan do temperature 100 °C. Toplinska vodljivost pamuka je $\lambda = 0.040 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Faktor otpora difuziji vodene pare je između $\mu = 1$ i $\mu = 2$.

Proizvodi od toplinsko-izolacijskog pamuka nalaze se na tržištu u obliku blazina, runa i rastresite vune u vrećama. Ugrađuju se između i ispod rogova, u strop prema tavanu, u lagane pregradne zidove, u zidove drvenih skeletnih konstrukcija, u plivajuće podove za izolaciju udarnog zvuka, za ispunu šupljina i reški te kao zvuko-apsorpcijski materijal.



Slika 3.27 Toplinska izolacija od pamuka [177], toplinska izolacija od recikliranog pamuka [177]

3.11.18 Pjenasto staklo

Toplinsko-izolacijski materijal pjenasto staklo (CG) razvila je tvrtka Pittsburgh Corning, tijekom 2. svjetskog rata, pod trgovačkim imenom „Foamglas“. Ono pripada grupi anorganskih mineralnih toplinsko-izolacijskih materijala. Pjenasto staklo je porozne strukture s vrlo tankim staklenim stjenkama pora. Isporučuje se uglavnom u obliku ploča i oblikovanih proizvoda (npr. cijevaci). Kod obrade ploča osjeti se neugodan miris sumpora koji potječe od sumporovodika, zaostalog u porama pjenastog stakla iz postupka proizvodnje. Pjenasto staklo je vrlo krhki materijal, karakteristične crno-sive boje.

Osnovne sirovine za proizvodnju pjenastog stakla su uglavnom jednake onima koje su potrebne za proizvodnju stakla (kvarcni pijesak s drugim mineralnim sirovinama). Pored novih sirovina koristi se i reciklirano staklo. Sirovine se najprije, na temperaturi oko 1 100 °C, rastale u sirovo staklo. Ohlađeno staklo se samelje i doda mu se mala količina ugljika u prahu. Dobivena smjesa se unese u čelične kalupe. Prolaskom kalupa kroz tzv. peć za pjenjenje koja je na temperaturi od oko 1 000 °C, ugljik oksidira tj. nastaju plinovi ugljikov monoksid i ugljikov dioksid uslijed kojih se staklo zapjeni. Nastali blokovi pjenastog stakla se kontrolirano ohlade i režu u toplinsko-izolacijske ploče određenih dimenzija (vidjeti sliku 3.28).

Pjenasto staklo kao toplinsko-izolacijski materijal posjeduje čitav niz dobrih svojstava. Ono je nepropusno za vodu i vodenu paru (faktor otpora difuziji vodene pare $\mu \approx \infty$). Ipak njegova pjenasta struktura se razara kod istovremenog djelovanja vode i mraza zbog krhkosti stakla. Izdrži veliko tlačno naprezanje. Otporan je na starenje, trulež i štetočine. To je negoriv

materijal. Granične temperature primjene su između $-260\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $+430\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kratkotrajno izdrži djelovanje temperature do oko $750\text{ }^{\circ}\text{C}$. Talište materijala je na oko $1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Pjenasto staklo nije otporno na lužine (npr. voda koja sadrži vapno).

Uobičajena dimenzija ploča od pjenastog stakla iznosi $45\times 60\text{ cm}$ ili $60\times 120\text{ cm}$, debljine od 4 cm do 15 cm . Po dogovoru mogu se isporučiti i ploče drugih dimenzija. Obujamska masa pjenastog stakla iznosi između 100 kg/m^3 i 165 kg/m^3 . Toplinska vodljivost pjenastog stakla je između $\lambda = 0.045\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ i $\lambda = 0.060\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.

Zbog krhkosti, ploče od pjenastog stakla treba polagati samo na ravne podloge. Ploče se polažu u odgovarajuće hladno ljepilo, vrući bitumen ili „na suho“.

Toplinsko-izolacijske ploče od pjenastog stakla upotrebljavaju se za toplinsku izolaciju zidova i ravnih krovova, te kao perimetarska izolacija zidova u dodiru s tlom i ispod nosive ploče poda na tlu. Naročito su prikladne za toplinsku izolaciju površina s većim opterećenjem na tlak (industrijski podovi, ravni krovovi korišteni kao parkirališta,...).



Slika 3.28 Ploča od pjenastog stakla [178], granule pjenastog stakla [179], proizvodi od pjenastog stakla [180]

3.11.19 Porasti beton ili porobeton

Beton je građevni proizvod dobiven miješanjem cementa (veziva, koje reagira s vodom i očvršćuje), agregata (granulirani materijal), dodataka za beton (aditiva – poboljšavaju svojstva svježeg i očvrsnulog betona) i vode (potrebna za hidrataciju cementa i obradivost svježeg betona). Vezivo i voda su aktivne komponente betona, a agregat služi samo kao inertna ispunja bez kemijskog sudjelovanja u očvršćivanju betona.

Ovisno o njihovoj gustoći, ρ , betoni se dijele na obične ($2\,000\text{ kg/m}^3 \leq \rho \leq 2\,600\text{ kg/m}^3$), lagane ($\rho < 2\,000\text{ kg/m}^3$) i teške betone ($\rho > 2\,600\text{ kg/m}^3$).

Obični beton proizvodi se s kamenim agregatom i upotrebljava se kao nosivi građevni materijal za sve betonske i armirano-betonske konstrukcije.

Teški beton se proizvodi s teškim agregatom, koji mu povećava gustoću. Uglavnom se upotrebljava kao zaštita od rendgenskog i radioaktivnog zračenja u istraživačkim i ispitnim laboratorijima i zdravstvenim ustanovama.

Lagani beton se proizvodi ili s laganim agregatom porozne strukture ili posebnim sastavom betona kojim se postiže šupljikavost cementnog kamena (jednozrni agregat s manjim sadržajem cementa).

Svojstva laganog betona mijenjaju se u ovisnosti o njegovoj gustoći. Sa smanjenjem gustoće, ρ , smanjuje se njegova čvrstoća ali i njegova toplinska vodljivost, λ . Lagani betoni većih i srednjih gustoća mogu istovremeno obavljati i zadaću nosivosti i, djelomično ili potpuno, zadaću toplinske izolacije. Kod niskih gustoća upotrebljavaju se isključivo kao toplinsko-izolacijski materijal. Donja granica gustoće laganog betona, koja je danas tehnički ostvariva, nalazi se na oko 350 kg/m^3 .

Lagani beton možemo, dakle, svrstati u:

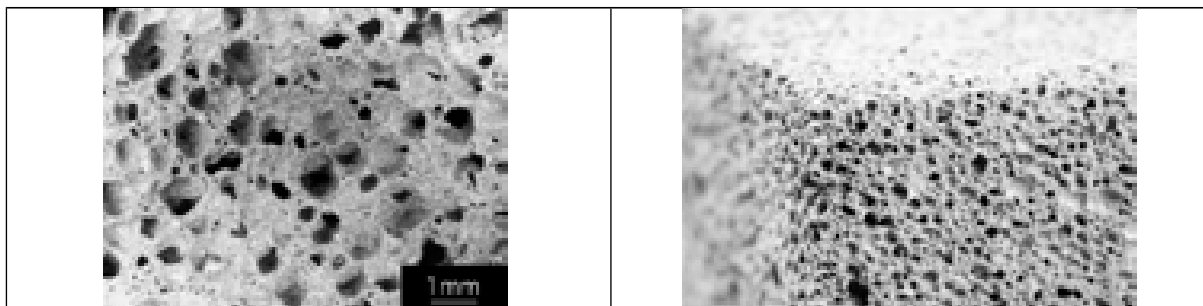
- beton od laganog agregata, kod kojeg je agregat porozan (ekspandirana glina, zgura visokih peći,...), a u cementnom kamenu nema šupljina
- jednozrni beton, koji može biti s laganim ili teškim agregatom sastavljenim od jedne ili dvije krupnije veličine zrna, s malo cementa, tako da su zrna obavijena vezivom i međusobno točkasto slijepljena bez ispunjenja praznog prostora između zrna (beton otvorene strukture).

Često se u lagane betone svrstavaju i **porozni** (čelijasti) **betoni** koji se proizvode tako da se svježem betonu dodaju određena sredstva pomoću kojih se dobije porozna struktura očvrnulog betona. U porozne betone se ubrajaju pjenobetoni i porobetoni (raniji naziv plinobetoni).

Pjenobeton je beton porozne strukture kod kojeg se pore ne stvaraju kemijskim reakcijama već dodatkom svježem betonu sredstva koje miješanjem stvara pjenu. Mogu se proizvoditi i na gradilištu. Zbog svoje porozne strukture pjenobeton ima manju čvrstoću od običnog betona, ali zato i manju toplinsku vodljivost. Ugrađen u građevni dio zgrade doprinosi u manjoj ili većoj mjeri ispunjenju zahtjeva koji se odnose na njegovu potrebnu toplinsku izolaciju. Pjenobeton se najviše upotrebljava za izvedbu estriha, betona za pad kod ravnih krovova, kao lagani materijal za ispunu i sl.

Porobeton ili porasti beton je lagani građevni materijal karakteristične porozne strukture, koji se izrađuje miješanjem cementa, vapna, finog kremenog pijeska (brašna) i vode, uz dodatak aluminijskog praha te raznih drugih dodatnih materijala čija je zadaća poboljšanje svojstava gotovog proizvoda. Finoća brašna dobivena mljevenjem kremenog pijeska znatno utječe na kvalitetu porobetona. Smjesa navedenih materijala pripremljena prema određenoj recepturi ulije se do polovice visine čeličnog kalupa. Tu aluminijski prah u alkalnoj suspenziji morta razvija plin vodik te nastaje mnogo malih mjehura plina koji postepeno zapjene smjesu i ona se podigne do vrha kalupa. Veliki blokovi porobetona u kalupima razdjele se na pojedine građevne elemente željenih dimenzija. Proces stvrdnjavanja porobetona se nastavlja u autoklavima, u vodenoj pari povišenog tlaka i povišene temperature, sve dok materijal ne zadobije svoja konačna svojstva. Nakon autoklaviranja pojedini građevni elementi se odvajaju, paletiraju, pakiraju i odvoze u skladišta.

Dobiveni materijal ima ravnomjerno raspodijeljene pore, male je obujamske mase i zato dobar toplinsko-izolacijski materijal (opisujemo ga kao materijal s ravnomjerno razdijeljenom toplinskom izolacijom). Uz to materijal posjeduje relativno veliku nosivost (u odnosu na svoju malu gustoću). Zato se od ovog materijala mogu proizvoditi i građevni elementi većih dimenzija (blokovi i ploče) (vidjeti sliku 3.29). Proces proizvodnje omogućava dobivanje armiranih građevnih elemenata. Prije umetanja u svježu smjesu armatura se, obično u obliku armaturnog koša, presvuče s odgovarajućim lakom kako bi se zaštitila od korozije. Ploče od armiranog porobetona upotrebljavaju se i kao nosivi elementi u statički manje zahtjevnim slučajevima.



Slika 3.29 Struktura porobetona [181], blok porobetona [182]

Naziv materijala „porobeton“ sugerira da se radi o jednoj vrsti laganog betona. Porobeton, međutim, ne može biti beton u smislu opće definicije pojma betona. Porobeton ne sadrži agregat, koji je, inače, bitna sastavna komponenta betona. Fino samljeveni kvarcni pijesak (brašno od kvarcnog pijeska) koji ulazi kao jedna od komponenti u sastav porobetona, velikim dijelom sudjeluje u kemijskoj pretvorbi. Osim toga, porobeton se ne može smatrati vrstom betona i iz razloga što je za njega obavezna obrada parom u autoklavu.

Građevni elementi od porobetona jednostavno se režu i obrađuju. Otporni su na utjecaje vremenskih uvjeta te na visoke temperature u slučaju požara. Porobeton je negoriv materijal. Vrlo je paropropustan. Ekološki je neškodljiv.

Zid od porobetona, zbog manje gustoće materijala, lošije izolira zvuk od drugih masivnijih građevnih materijala. Zbog poroznosti upija vlagu (kapilare u stjenkama pora) pa ga u vanjskim zidovima treba na odgovarajući način zaštititi od oborina.

Porobeton u obliku blokova upotrebljava se naročito često za izgradnju zidova obiteljskih kuća, a u obliku armiranih ploča za nosivu konstrukciju stropova i krova.

Prvi porobeton proizveden je u Švedskoj početkom 20. stoljeća pod trgovačkim imenom Siporex. Danas je vodeći proizvođač porobetona tvrtka Xella koja proizvodi više vrsta porobetona pod trgovačkim imenima: Ytong, Multipor, Hebel, Silka,...

3.11.20 Ovčja vuna

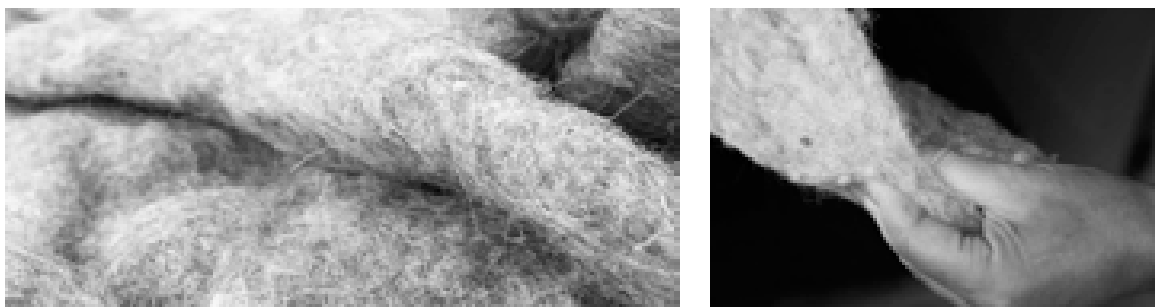
Nazivom vuna opisuju se guste, mekane, najčešće kovrčaste dlake koje rastu na koži nekih životinja, posebno ovaca (ovčja vuna). Vunom se naziva i predivo od te dlake. Ovčja vuna se dobiva šišanjem ovaca. Ovčja vuna je prirodno vlakno i pripada grupi obnovljivih sirovina. Vuna je jedan od prvih materijala s kojim se čovjek štitio od hladnoće. Prema kvaliteti vlakna određuju se tipovi vune (merino vuna,...). Za proizvodnju toplinsko-izolacijskog materijala koristi se vuna najniže kvalitete tzv. gruba vuna, koja se ne koristi u tekstilnoj industriji. Neki toplinsko-izolacijski proizvodi od ovčje vune sastoje se u potpunosti od reciklirane vune.

Ovčja vuna za proizvodnju toplinsko-izolacijskog materijala najprije se višekratno ispere, a zatim joj se dodaju dodaci za zaštitu protiv moljaca i gamadi. Od vune se izrađuje pust (filc) pomoću stroja za iglanje. Za poboljšanje reakcije na vatru dodaje se borna sol u masenom udjelu 2 % do 5 %. Kod proizvodnje toplinsko-izolacijskih blazina debljine preko 10 cm, dodaju se poliesterska vlakna u masenom udjelu do 15 %, koja pomažu da vuna zadrži svoj oblik.

Toplinsko-izolacijski proizvodi od ovčje vune moraju se suhi skladištiti i ugrađivati. Materijal je otporan na starenje, neutralnog je mirisa i otporan na truljenje i razvoj plijesni. Ovčja vuna je difuzno otvorena i može primiti kroz kraće vrijeme veće količine vlage i opet je otpustiti. Preporuča se ne prekoračiti najveću vlažnost od 22 %. Granična temperatura uporabe toplinsko-izolacijskog materijala od ovčje vune iznosi između 90 °C i 100 °C. Temperatura zapaljenja iznosi oko 600 °C. Kad se odstrani izvor vatre ovčja vuna se ugasi.

Toplinska vodljivost ovčje vune je između $\lambda = 0.040 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ i $\lambda = 0.045 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Faktor otpora difuziji vodene pare je između $\mu = 1$ i $\mu = 2$.

Blazine od ovčje vune proizvode se najčešće dimenzija 50×100 cm i 60×120 cm, debljine 2 do 18 cm. Blazine većih duljina pakiraju se u role. Upotrebljava se za toplinsku izolaciju vanjskih i pregradnih zidova i kosih krovova. U stropovima se koristi za izolaciju udarnog zvuka. Proizvodi od ovčje vune se mogu rezati ostrim nožem ili škarama. Vuna se isporučuje i u rastresitom stanju, u vrećama, a upotrebljava se za punjenje šupljina u građevnim dijelovima zgrade. Toplinska izolacija od ovčje vune nije prikladna u slučajevima kada se na površinu izolacije nanosi mokra žbuka.



Slika 3.30 Ovčja vuna [183], blazina od ovčje vune [184]

3.11.21 Slama

Slama je dio stabljike nekih žitarica (pšenice, ječma, zobi,...) koja se siječe tijekom žetve. Stabljika je na većem dijelu šuplja i otuda proizlazi toplinsko-izolacijsko svojstvo slame.

Žito se žanje mehanički posebnim strojem: vršilicom. Vršilica obavlja više radnji: siječe stabljike žitarica, udara klasove da bi se izvukla zrna i baca slamu u obliku otkosa u polje. Drugi stroj zatim skuplja slamu, preša je i pakira u bale, svežnjeve ili valjke.

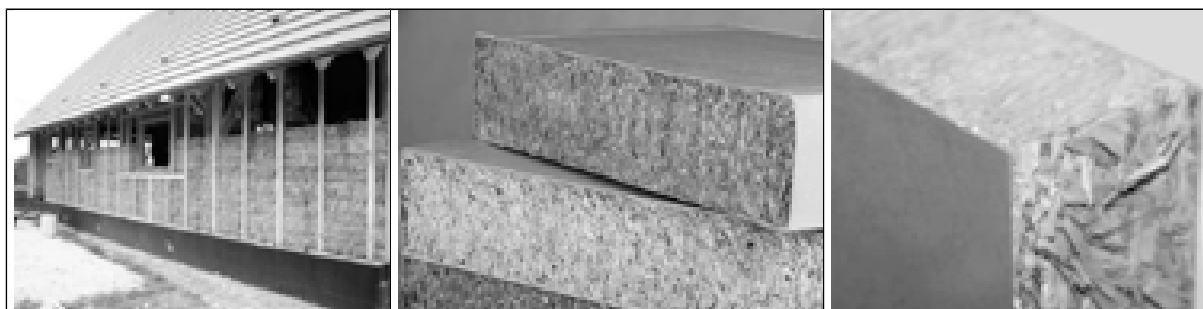
Slama u balama u obliku kvadra je stiješnjena i djeluje kao dobar toplinski izolator. Toplinska vodljivost je između $\lambda = 0.050 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ i $\lambda = 0.070 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Faktor otpora difuziji vodene pare je između $\mu = 1$ i $\mu = 2$. Balirana slama ne sadrži štetna veziva poput formaldehida koji se nalazi u mnogim toplinsko-izolacijskim materijalima.

Bale slame su dobra toplinska i zvučna izolacija, a imaju i relativno veliku statičku nosivost. Najčešće se koriste za izvedbu vanjskih zidova zgrade gdje obavljaju istovremeno i funkciju nosivosti i funkciju toplinske izolacije.

Osim u balama, slama se kao toplinsko-izolacijski materijal koristi i:

- u vrećama: za izradu izolacijskog betona (slama se miješa u svježi beton),
- u blokovima: za ispunu zidova i stropova skeletnih drvenih konstrukcija,
- kao jezgra kod predgotovljenih pregradnih zidova.

Neki primjeri uporabe proizvoda od slame prikazani su na slici 3.31.



Slika 3.31 Ispuna zidova balama slame [185], pregradni panel od slame [186], [187]

3.11.22 Trstika

Trstika (trska) je samonikla višegodišnja biljka iz porodice trava (najveća europska trava). Raste u močvarnim područjima i uz rub vodotoka i jezera. Ima šuplju tanku stabljiku koja sadrži mnogo silicija. Silicij daje stabljici trajnost, čvrstoću i sjaj. Brzo raste, gotovo 10 cm dnevno i naraste do visine oko 4 m, iznimno i više, čak do 10 m. Nakon što se trstika odsječe kroz godinu dana izraste nova pune visine i u istoj količini, tako da je gotovo nemoguće iscrpiti njene rezerve.

U graditeljstvu se kao toplinsko-izolacijski materijal upotrebljava stabljika trstike. Nakon branja, stabljike trstike se režu na potrebnu duljinu, suše i sortiraju. Zatim se stabljike slažu međusobno paralelno i u više redova te se prešaju u ploče (blazine) i međusobno povežu najčešće pocinčanom žicom, rjeđe plastikom. Pri tome se ne koriste nikakva dodatna kemijska vezna sredstva tako da su toplinsko-izolacijske ploče od trstike potpuno prirodan materijal (vidjeti sliku 3.32).

Toplinsko-izolacijski proizvodi od trstike su otporni na truljenje, insekte i glodavce. Vremenom ne mijenjaju svoja svojstva. Ne djeluju štetno na ljudsko zdravlje i ne zagađuju okoliš. Toplinska vodljivost iznosi između $\lambda = 0,045 \text{ W/(m}\times\text{K)}$ i $\lambda = 0,065 \text{ W/(m}\times\text{K)}$. Gustoća toplinsko-izolacijskih ploča od trstike je između $\rho = 190 \text{ kg/m}^3$ i $\rho = 220 \text{ kg/m}^3$. Faktor otpora difuziji vodene pare je $\mu = 2$.

Trstika u obliku ploča ili blazina upotrebljava se kao toplinsko-izolacijski materijal za zidove, stropove i kose krovove. Zbog svoje površinske strukture idealna je podloga za nanošenje žbuke. Ploče se obično na podlogu pričvršćuju odgovarajućim pričvrstnim elementima (tiple i vijci s tanjurima / diskovima).



Slika 3.32 Stabljike trstike međusobno povezane žicom [188], pregrada od trstike u obliku ploče [189]

3.11.23 Ostali toplinsko-izolacijski materijali, proizvodi i sustavi

3.11.23.1 Aerogel

U kemiji se **fazom** naziva homogeni dio nekog sustava koji je od ostalih dijelova sustava odijeljen fizičkom granicom. Faza može biti čvrsta, tekuća ili plinovita. Kod **disperznog sustava** su vrlo sitne čestice jedne tvari (dispergirana faza) fino raspršene u drugoj tvari (kontinuirana faza ili disperzno sredstvo). Moguća je i disperzija plina u čvrstoj tvari (čvrste pjene, npr. ekspanzirani polistiren,...). Ovisno o dimenziji čestica dispergirane faze, disperzija (raspršivanje) može biti gruba, koloidna ili molekularna.

Kod **koloidnih disperzija** dispergirana faza je u obliku koloidnih čestica. Koloidne čestice su veće od molekula, ali su manje od čestica u grubim disperzijama.

Gel je stanje koloidne disperzije u kojem dispergirana i kontinuirana faza tvore trodimenzionalnu mrežu kroz cijeli materijal i čine želatinoznu masu. Sitne čvrste čestice raspođijeljene su u disperznom sredstvu (najčešće vodi) te tvore mrežu međusobno slabo vezanih molekula. Gel je, dakle, koagulirani (zgrušani) oblik koloidne disperzije, obično želatinozne konzistencije.

Aerogel je materijal sličan gelu kojemu je tekuća faza zamijenjena plinom. Naziva se još i smrznuti plin, kruti dim ili plavi dim zbog svoje prozirnosti [62]. To je materijal s više izuzetnih svojstva radi kojih je čak 15 puta upisan u Guinnessovu knjigu rekorda.

Aerogel je umjetni čvrsti materijal s najnižom obujamskom masom (svega oko 3 kg/m^3), nižom od bilo kojeg drugog poznatog poroznog čvrstog materijala. U sebi sadrži do 99,8 %

zraka i zato je posebno dobar kao toplinsko-izolacijski materijal. Pore u gelu prosječne su veličine oko 10 nm. Veličina pora može se kontrolirati tijekom proizvodnje. Aerogel je gotovo potpuno proziran.

Prvi aerogel je izradio kemičar Steven Kistler još 1931. godine na temelju silicijeva dioksida. Kasnije su se aerogelovi počeli raditi na temelju oksida aluminija, kroma i kositra. Aerogelovi od ugljika razvijeni su početkom 1990. godine. 2012. godine sintetizirani su aerogelovi na bazi polimera. Mnogi znanstvenici nakon Kristlera radili su na daljnjem razvoju ovog materijala, posebno u smislu smanjenja njegove krhkosti. Taj problem je riješen ugradnjom vlakana u aerogel.

Procesi proizvodnje različitih vrsta aerogelova međusobno se razlikuju. Općenito aerogel nastaje iz tekućeg gela postupkom kojim se tekuća faza zamijeni zrakom. Tehnički je ovaj postupak vrlo složen jer struktura gela kod sušenja ima tendenciju da se raspadne u prah.

Aerogel je vrlo značajan toplinsko-izolacijski materijal jer bitno smanjuje ili gotovo potpuno zaustavlja prenošenje topline vođenjem, strujanjem i zračenjem. Zrak u porama nanometarskih dimenzija praktički se ne može gibati tako da je prijenos topline konvekcijom gotovo u potpunosti spriječen. Silicij je vrlo loš vodič topline pa aerogel od silicija (silika aerogel) bitno smanjuje izmjenu topline mehanizmom vođenja topline. Ugljik apsorbira infracrveno zračenje pa aerogel od ugljika dobro izolira izmjenu topline zračenjem. Zato se kao toplinsko-izolacijski materijal najviše koristi aerogel od silicija s dodatkom ugljika. Njegova ekvivalentna toplinska vodljivost iznosi oko $\lambda \approx 0,012 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, što je oko tri puta manja vrijednost od vrijednosti toplinske vodljivosti za mineralnu vunu. Toplinsko-izolacijsku sposobnost aerogelova moguće je još poboljšati smanjivanjem tlaka zraka u porama materijala.

Mehanička i toplinska svojstva aerogela ovise o osnovnom materijalu, vrsti vlakana i uključenih aditiva. Vlakna daju aerogelu mehaničku stabilnost i fleksibilnost. Materijal se deformira pod tlačnim naprezanjem, ali i poprima prijašnji oblik kad prestane djelovanje naprezanja.

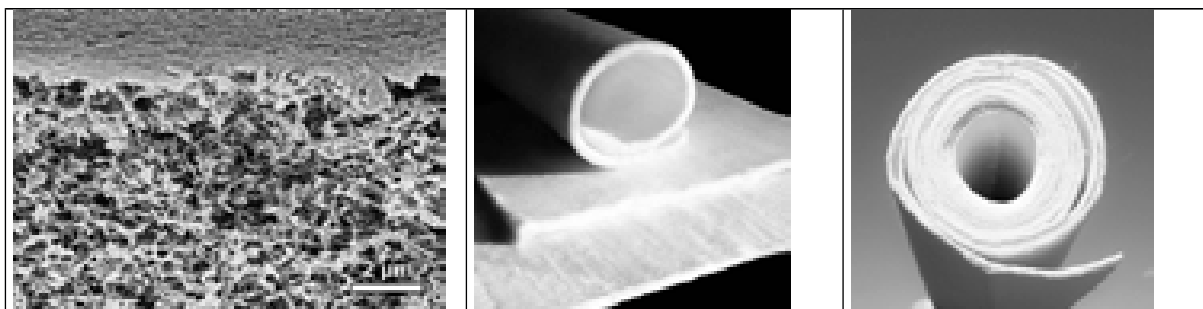
Aerogelovi su na bazi hidrofilnih (koji upija vodu / vlagu) materijala, ali kemijskom obradom njihove površine oni postaju hidrofobni (koji odbija vodu / vlagu). Procesom hidrofobiranja onemogućava se prodor vode u pore aerogela čak i u ekstremnim uvjetima, tako da hidrofobni aerogel u pravilu ne treba štititi od oborina.

Silika aerogel pokazuje dobru otpornost protiv širenja požara. U slučaju požara ne oslobađa otrovne plinove i dim.

Zbog male toplinske vodljivosti potrebna je znatno manja debljina sloja izolacije od aerogela u usporedbi s klasičnim toplinsko-izolacijskim materijalima. To, pak, znači povećanje unutarnjih dimenzija prostora zgrade za jednake vanjske dimenzije zgrade.

U građevinarstvu se aerogel upotrebljava za toplinsku izolaciju vanjskih i unutarnjih zidova, stropova i podova na tlu, krovova te toplinskih mostova. Upotrebljava se i kao industrijska izolacija za toplinsku izolaciju cijevi, spremnika, složenih područja instalacija,... Mogu se nabaviti i proizvodi s integriranom parnom branom.

Aerogel se isporučuje u obliku rola, s debljinom sloja 5 mm ili 10 mm (vidjeti sliku 3.33), te kao granule za nasipe ili za izradu laganih žbuka. Cijena proizvoda od aerogela je još uvijek vrlo visoka.



Slika 3.33 Mikrostruktura aerogela [190], role aerogela [191], [192]

3.11.23.2 Vakuumski izolacijski panel

Vakuum (zrakoprazni prostor) je prazan prostor, bez ikakve tvari. **Tehnički vakuum** je prostor s niskim tlakom zraka, para ili plinova. Razvrstava se na vakuum niskog tlaka (do 1 mbar), srednji vakuum (do 10^{-3} mbar), visoki vakuum (do 10^{-6} mbar) i ultravisoki vakuum (tlak niži od 10^{-6} mbar).

Vakuumski izolacijski panel (skraćenica VIP, od eng.: Vacuum Insulation Panel) sastavljen je od jezgre panela, koja je materijal nanometarske porozne strukture i s bitno smanjenim tlakom zraka u porama (vakuumiran) te od mekane tanke ovojnice panela, nepropusne za vodu i zrak, sa zavarenim spojevima [63]. Toplinska vodljivost panela je oko pet puta manja od toplinske vodljivosti klasičnih toplinsko-izolacijskih materijala kao što su mineralna vuna ili sintetičke pjene. Tako visoko izolacijsko svojstvo VIP-a posljedica je vakuumiranja jezgre panela i strukture materijala jezgre. Naime, ekvivalentna toplinska vodljivost materijal, λ_{eq} , jednaka je zbroju izmjena topline različitim mehanizmima:

$$\lambda_{eq} = \lambda_{L,G} + \lambda_{L,F} + \lambda_S + \lambda_K \quad (3.19)$$

gdje:

- $\lambda_{L,G}$ uzima u obzir izmjenu topline vođenjem topline unutar pora, u $W/(m \times K)$,
- $\lambda_{L,F}$ uzima u obzir izmjenu topline vođenjem topline u stjenkama pora, u $W/(m \times K)$,
- λ_S uzima u obzir izmjenu topline zračenjem između stjenki pora, u $W/(m \times K)$,
- λ_K uzima u obzir izmjenu topline konvekcijom unutar pora, u $W/(m \times K)$.

Udio pojedinih mehanizama izmjene topline kod klasičnog toplinsko-izolacijskog materijala od mineralnih vlakana iznosi otprilike:

$$\lambda_{L,G} : \lambda_S : \lambda_{L,F} = 25 : 13 : 2 \quad (3.20)$$

Kod vakuumskih izolacijskih panela taj udio iznosi:

$$\lambda_{L,G} : \lambda_S : \lambda_{L,F} = 0 : 1 : 3 \quad (3.21)$$

Pored kvalitete vakuuma i upotrijebljenog materijala jezgre, na ukupnu toplinsku vodljivost vakuumskog izolacijskog panela utječe i kvaliteta materijala ovojnice panela i zavarenih spojeva te učinak toplinskih mostova po rubovima panela. Utjecaj toplinskih mostova rubova panela na efektivnu toplinsku vodljivost, λ_{eff} , cijelog panela određuje se prema izrazu:

$$\lambda_{eff} = \lambda_{cop} + \psi \times d \times 2 \times \left(\frac{1}{l} + \frac{1}{b} \right) \quad (3.22)$$

ili:

$$\lambda_{eff} = \lambda_{cop} + \psi \times d \times \frac{P}{A} \quad (3.23)$$

gdje je:

- λ_{cop} (indeks cop, eng.: „centre of panel“) toplinska vodljivost središnjeg dijela panela, u $W/(m \times K)$,

ψ	linijski koeficijent prolaska topline ruba panela, u $W/(m \times K)$,
d	debljina panela u smjeru toplinskog toka, u m,
l	duljina panela, u m,
b	širina panela, u m,
A	ploština površine panela kroz koju prolazi toplinski tok, u m^2 ,
P	opseg površine panela, u m.

Efektivna tj. stvarna toplinska vodljivost panela ovisi, dakle, o dimenzijama panela, što znači da je treba odrediti za svaki panel različitih dimenzija. Što su paneli većih dimenzija manja je duljina toplinskih mostova, što znači da veći paneli imaju manju efektivnu vrijednost toplinske vodljivosti.

Materijal jezgre panela mora biti nanometarske porozne strukture s otvorenim porama radi bržeg vakuumiranja. Stijenke pora moraju biti dovoljno mehanički stabilne da izdrže tlačno opterećenje uslijed vakuumiranja panela. Nadalje, materijal jezgre mora biti što nepropusniji za infracrveno zračenje. Navedene uvjete najbolje zadovoljava pirogeni (dobiven iz plinovite faze) silicijev dioksid (pirogena kremena / silicijeva kiselina) (silika aerogel) s odgovarajućim dodatcima pa se on najviše i koristi za izradu jezgri VIP-a.

Materijal ovojnice vakuumske izolacijske panela mora biti vodonepropustan i zrakonepropustan s velikim otporom difuziji vodene pare i drugih plinova. Osim toga ovojnica mora biti dovoljno mehanički otporna uz istovremeno nisku toplinsku vodljivost te sposobnost zavarivanja. Uz te uvjete ostati će tlak zraka u panelu nizak, a to znači i niska toplinska vodljivost panela. U pravilu se ovojnica VIP-a sastoji od više slojeva, obično aluminijske folije debljine 5 μm do 25 μm , između polimernih folija (polietilen, poliester, polipropilen,...) ili od metalizirane polimerne folije. U zadnje vrijeme se koristi i tanka gumena obloga radi bolje zaštite panela od vanjskih utjecaja.

Toplinska vodljivost VIP-a bez uzimanja u obzir utjecaja starenja i toplinskih mostova uz rubove panela, dakle, u sredini panela, iznosi

$$\lambda_{cop} \approx 0,004 \frac{W}{(m \times K)} \text{ do } 0,005 \frac{W}{(m \times K)}$$

Tijekom godina nepropusnost ovojnice panela kojom se održava vakuum u panelu, uslijed starenja materijala, postupno slabi tako da se s vremenom povećava toplinska vodljivost panela. Ispitivanjem toplinske vodljivosti panela nakon umjetnog starenja (ispitivanja provedena u EMPA), dobivena je vrijednost toplinske vodljivosti

$$\lambda_{cop} \approx 0,006 \frac{W}{(m \times K)} \text{ do } 0,008 \frac{W}{(m \times K)}$$

To znači da toplinske proračune ne bi trebalo provoditi s vrijednosti manjom od $\lambda_{cop} = 0,008 W/(m \times K)$.

Vakuumske izolacijske paneli izrađuju se u tvornici prema nacrtima polaganja panela izrađenim za svaku konkretnu zgradu. Na uglovima zgrada i uz otvore dopuštena su odstupanja do najviše 20 mm koja se ispunjavaju PUR pjenom. Kod ugradnje paneli se tijesno priljubljuju jedan uz drugi. Za unutarnju toplinsku izolaciju spojnica panela treba izvesti tako da budu nepropusne za vodenu paru (prekrivanje paronepropusnom ljepivom trakom).

Vakuumske izolacijske paneli su, zbog tanke ovojnice, vrlo osjetljivi na mehanička oštećenja. Mogu se oštetiti već prilikom prijevoza, pa zato svaki panel prije ugradnje treba pregledati. Na gradilištu se ne smiju rezati ili bušiti. Polažu se na ravnu podlogu bez izbočina. Oštećeni paneli u koje je ušao zrak gube veliki dio svoje izolacijske sposobnosti (toplinska vodljivost poraste na oko 0,020 $W/(m \times K)$ što je još uvijek vrlo niska vrijednost). Oštećeni paneli se ne mogu ponovno vakuumirati već ih treba zamijeniti novima. Postoji mogućnost da se u svaki panel ugradi mali senzor koji mjeri tlak vakuuma i izmjerene vrijednost bežično emitira kroz omotač panela do kontrolnog prijemnika.

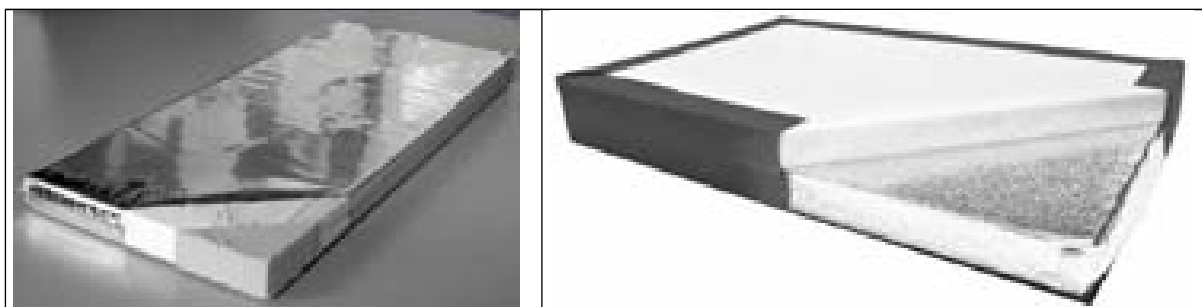
Vakuum izolacijski paneli, u neoštećenom stanju, ne dopuštaju difuziju vodene pare i molekula plinova. Zato unutar VIP-a ne može doći do skupljanja kondenzirane vodene pare, čak i ako proračun Glaserovom metodom pokaže nastajanje kondenzata unutar panela. To, međutim, ne vrijedi u slučaju mehaničkog oštećenja ovojnice panela.

Vodonepropusna ovojnica panela štiti jezgru panela i od vanjske vlage, koja je inače glavni „neprijatelj“ poroznih toplinsko-izolacijskim materijala.

Vakuumski izolacijski paneli prema reakciji na požar svrstavaju se u eurorazred B prema HRN EN 13501-1 [44]. Oni smiju biti kratkotrajno izloženi temperaturi do oko +80 °C. Dodatnim oblaganjem panela negorivim materijalom poboljšava se ponašanje panela u uvjetima požara.

Vakuum izolacijski paneli ugrađuju se na zidove, stropove i podove novih zgrada i kod rekonstrukcije postojećih zgrada (vidjeti sliku 3.34). Unutar zgrade pričvršćuju se na građevne dijelove s ljepljivim mortom, a s vanjske strane građevnih dijelova odgovarajućim metalnim profilima. Ponekad se polažu i dvoslojno s izmaknutim spojevima. Naročito su pogodni za izradu vanjskih vrata i kutija za rolete. Dobro su rješenje u slučajevima kada treba štedjeti prostor zgrade tj. kada su, iz bilo kojeg razloga, ograničene debljine toplinsko-izolacijskih slojeva. VIP štedi prostor uz postizanje dobre izoliranosti prostora.

Zbog relativno visoke cijene, vakuum izolacijski elementi još se rijetko upotrebljavaju u graditeljstvu. Do sada su se najviše primjenjivali kod hladnih komora.



Slika 3.34 VIP panel [193], VIP panel s gumenom zaštitom s donje strane i PIR pločom s gornje strane [194]

3.11.23.3 Transparentna (providna, prozirna) toplinska izolacija

Uvod

U fizici se za neko tijelo kaže da je **transparentno** ako dopušta prolaz elektromagnetskog zračenja bez značajnije njegove apsorpcije ili refleksije. Tijelo može biti transparentno za zračenje samo određenog pojasa valnih duljina, a za ostale valne duljine nepropusno.

Transparentne toplinske izolacije su materijali koji u sebi sjedinjuju nisku toplinsku vodljivost uz istovremenu visoku propusnost za Sunčevo zračenje. Zbog niske toplinske vodljivosti ovi materijali su upotrebljivi kao toplinsko-izolacijski materijali, a zbog visoke propusnosti za Sunčevo zračenje oni su prikladni istovremeno i za pasivno korištenje Sunčeve energije. Dok klasična netransparentna toplinska izolacija na vanjskim zidovima zgrade samo smanjuje toplinske gubitke, transparentnom toplinskom izolacijom ne samo da se ti gubitci mogu nadoknaditi iskorištavanjem topline Sunčeva zračenja već ti dobitci topline od Sunca mogu biti i veći od toplinskih gubitaka i koristiti se za grijanje prostora zgrade. Vanjski zid zgrade s transparentnom toplinskom izolacijom (osim za sjevernu orijentaciju), u pravilu ima pozitivnu godišnju energetska bilancu. Ovisno o kvaliteti transparentne toplinske

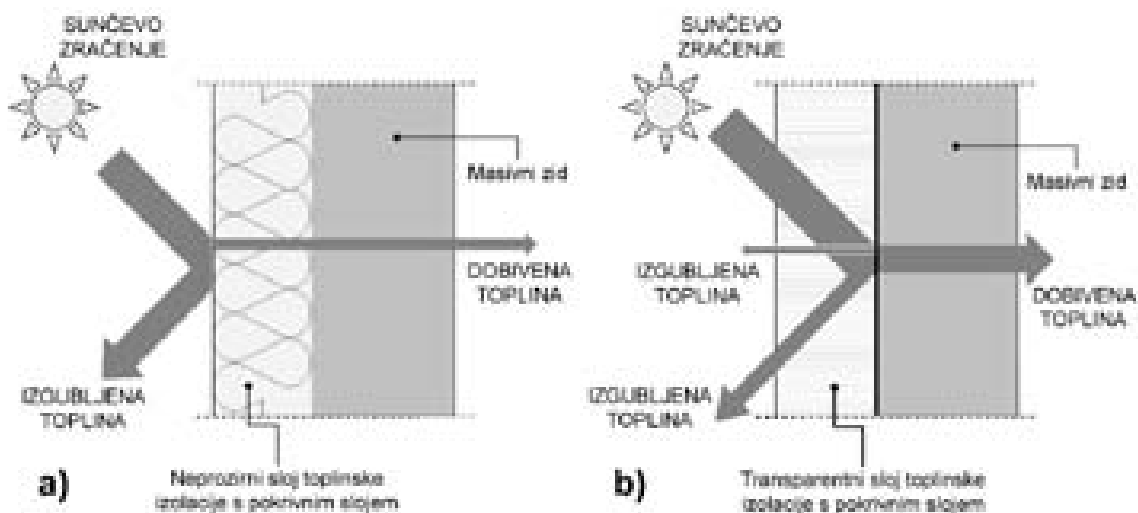
izolacije i rubnim uvjetima dobitci topline mogu iznositi $50 - 150 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \times a)$. Ovdje se m^2 odnosi na ploštinu transparentne toplinske izolacije, a „a“ je simbol za godinu. Transparentna toplinska izolacija je, dakle, više sunčani kolektor nego toplinsko-izolacijski materijal. Ona predstavlja relativno dobar pokušaj rješenja starog inženjerskog problema: kako izvesti ovojnicu zgrade koja će pružati veliki otpor toplinskom toku iz zgrade, a istovremeno dozvoliti i veliki prijenos dozračene Sunčeve energije u prostor zgrade. Primjer rješenja ovog problema je prozor s toplinskom izolacijom izraženom koeficijentom prolaska topline, U , i prolaskom energije izraženom sa stupnjem propuštanja ukupne Sunčeve energije kroz ostakljenje, g .

Kod ovojnice zgrade izolirane učinkovitom neprozirnom toplinskom izolacijom ograničeni su transmisijski toplinski gubitci iz zgrade, ali upadno sunčevo zračenje ostaje praktički neiskorišteno za grijanje prostora zgrade. Dobitci topline kroz tradicionalno izolirane građevne dijelove zgrade su zanemarivi. Tek uporabom transparentne toplinske izolacije omogućeno je i pasivno korištenje Sunčeve energije za grijanje prostora, slično kao kod prozora. Kod prozora je, međutim, dotok topline u zgradu istovremen sa Sunčevim zračenjem, što može imati za posljedicu pregrijavanje prostora zgrade. Kod masivnog građevnog dijela s transparentnom toplinskom izolacijom dotok topline u zgradu nastupa s vremenskim pomakom tj. tek nakon nekoliko sati, kad više nema Sunčeva zračenja.

Transparentna toplinska izolacija se u engleskom govornom području naziva Transparent Thermal Insulation, skraćenica TTI. U našoj stručnoj literaturi više se koristi skraćenica TWD koja potječe od njemačkog naziva: Transparente Wärmedämmung.

Princip djelovanja transparentne toplinske izolacije [64]

Na slici 3.35 a) prikazan je masivni vanjski zid od betona ili opeke toplinski izoliran slojem neprozirne toplinske izolacije, a na slici 3.35 b) isti taj zid izoliran transparentnom toplinskom izolacijom. Između masivnog zida i sloja transparentne toplinske izolacije umetnut je sloj tamne boje radi apsorpcije Sunčevog zračenja (npr. namaz crnom bojom). Na tamnoj površini zida Sunčevo zračenje se pretvara u toplinu i akumulira u masivnom sloju zida. Kako ovaj masivni sloj ima znatno manji toplinski otpor od sloja transparentne toplinske izolacije, to će se veći dio ove topline prenositi vođenjem kroz masivni sloj zida prema unutarjem prostoru zgrade. S određenim zakašnjenjem (pomak faze) ova toplina će se predati u prostor s kojim zid graniči. Gustoća toplinskog toka kroz zid ovisi o intenzitetu Sunčeva zračenja, toplinskom otporu masivnog sloja zida i razlici temperature na površini apsorpcijskog sloja i temperature zraka u prostoriji. U slučaju manjeg intenziteta Sunčeva zračenja, opisanim procesom smanjiti će se transmisijski toplinski gubitci iz prostora zgrade. Kada se poveća Sunčevo zračenje doći će, s određenim pomakom, do porasta temperature na unutarnjoj površini zida. Kad ta temperatura postane veća od temperature zraka u unutarjem prostoru, dolazi do prijenosa topline sa zida u prostoriju. Površina zida djeluje kao velikoplošno niskotemperaturno ogrjevno tijelo. Time se izravno smanjuje potrebna energija za grijanje prostora. Osim toga, za jednaku osjetnu temperaturu u prostoru (istu toplinsku ugodnost) može se smanjiti temperatura zraka u prostoru, što znači dodatnu uštedu u potrošnji energije za grijanje. Da bi se tijekom ljeta spriječilo pregrijavanje prostora zgrade potrebna je odgovarajuća zaštita od Sunčeva zračenja za što postoji više mogućnosti.



Slika 3.35 Djelovanje Sunčeva zračenja na masivni vanjski zid s toplinsko-izolacijskim slojem:
a) neprozirna toplinska izolacija, b) transparentna toplinska izolacija

Osnovni materijali za proizvodnju transparentne toplinske izolacije

Materijali za transparentnu toplinsku izolaciju moraju ispuniti dva osnovna svojstva: biti dobri toplinski izolatori i biti visoko transparentni u području spektra Sunčeva zračenja. Toplinska izolacija se karakterizira toplinskom vodljivošću materijala, λ , odnosno toplinskim otporom ploča, R , a transparentnost ploča stupnjem propuštanja ukupne energije, g , koji je jednak zbroju stupnja transmisije, τ , i sekundarnog toplinskog toka, q_i , topline koja potječe od apsorbiranog zračenja. Najbolju kombinaciju ovih svojstava imaju plastični materijali polimetilmetakrilat (PMMA, npr. Plexiglas,...) i polikarbonat (PC, npr. Makrolon,...), zatim staklo te silika-aerogel. Preporuča se ugradnja ploča (modula) od transparentne toplinske izolacije koje imaju toplinski otpor najmanje $R = 0,80 \text{ m}^2 \times \text{K/W}$, a stupanj propuštanja ukupne energije veći od $g = 0,4$.

PC ima veću mehaničku stabilnost i postojanost na višu stalnu uporabnu temperaturu (do oko 115°C) u odnosu na PMMA (postojanost do temperatura oko 80°C). PMMA ima, pak, relativno veliku UV postojanost. Obujamska masa transparentne toplinske izolacije od plastičnih materijala je oko 25 do 50 kg/m^3 . S debljinom ploče od 10 cm postiže se toplinski otpor do oko $1,25 \text{ m}^2 \times \text{K/W}$.

Staklo kao materijal za transparentnu toplinsku izolaciju ima prednost u odnosu na spomenute plastične mase zbog svoje vrlo dobre toplinske postojanosti na starenje, dobrog ponašanja u uvjetima požara i velike UV postojanosti. Nedostatak stakla je viša toplinska vodljivost materijala i gotovo dvostruko veća gustoća. S debljinom ploče od 10 cm postiže se toplinski otpor do oko $0,85 \text{ m}^2 \times \text{K/W}$.

Struktura transparentne toplinske izolacije od plastičnih materijala ili stakla je šupljikava (saće ili kapilare). Šupljine treba tako složiti da što više sunčeva zračenja bude reflektirano prema naprijed u pravcu apsorbirajuće površine. U tom smislu povoljnija je struktura okomita na apsorber. Kod takve unutarnje strukture, tijekom ljeta, kad je Sunce visoko na horizontu, mnogo se više Sunčeva zračenja reflektira prema van nego tijekom zime kad je Sunce nisko, tako da kod ovakvog rješenja često nije potrebna dodatna zaštita površine zida od Sunčeva zračenja tijekom ljeta.

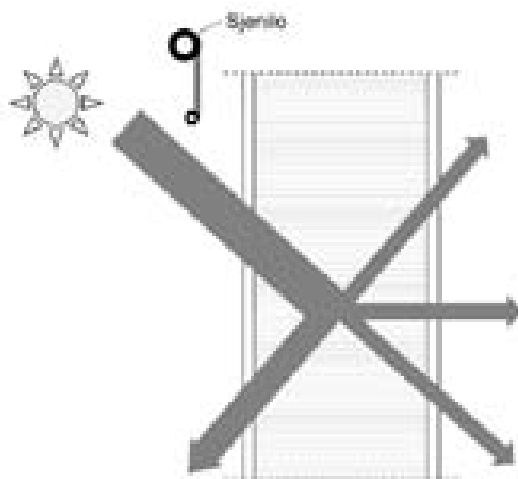
Kod silika-aerogela struktura je bitno različita od strukture plastičnih materijala ili stakla. Ovdje se radi o mikroporoznoj strukturi s veličinom pora od 20 do 50 nm i udjelom pora preko 90% . Silika-aerogel se dobiva sušenjem vlažnog gela pod visokim tlakom i visokom temperaturom. Dobiveni materijal je jako osjetljiv na vodu tako da se mora ugraditi između

dvije staklene ploče s vodonepropusnim rubovima. Zbog manjih proizvodnih troškova, danas se aerogel pretežno proizvodi kao granulat koji se nasipa između staklenih ploča.

Sustav transparentne toplinske izolacije sastoji se od više komponenata: apsorpcijskog sloja s komponentom za pohranu topline (masivni nosivi sloj), modula s transparentnom toplinskom izolacijom, komponenti uređaja za osjenjenje i konstrukcije za pričvršćenje na fasadu. Postoje različita funkcionalna rješenja sustava transparentne toplinske izolacije čiji principi će se prikazati u nastavku. Pored tehničkih zahtjeva koje ovakav sustav mora zadovoljiti potrebno je, dakako, postići i odgovarajuće arhitektonsko rješenje.

Sustav izravnog dobivanja topline

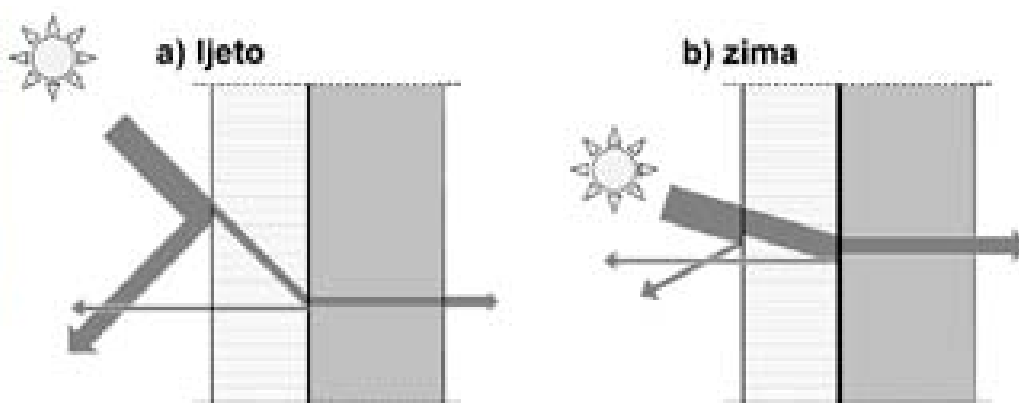
Ovo rješenje predstavlja jedan oblik ostakljenog elementa fasade, to znači da se modul s transparentnom toplinskom izolacijom ugrađuje izravno kao dio ovojnice zgrade bez sloja masivne konstrukcije (slika 3.36). Iako ovo rješenje doprinosi difuznom osvjetljenju prostora, ono nije zamjena za prozore. Transparentna izolacija, u pravilu, nije prozirna. Izuzetak su ploče aerogela između staklenih ploča. Da bi se spriječilo pregrijavanje prostora tijekom ljeta potreban je odgovarajući sustav sjenila s vanjske strane (npr. rolo).



Slika 3.36 Shematski prikaz sustava izravnog dobivanja topline

Sustav s masivnim zidom

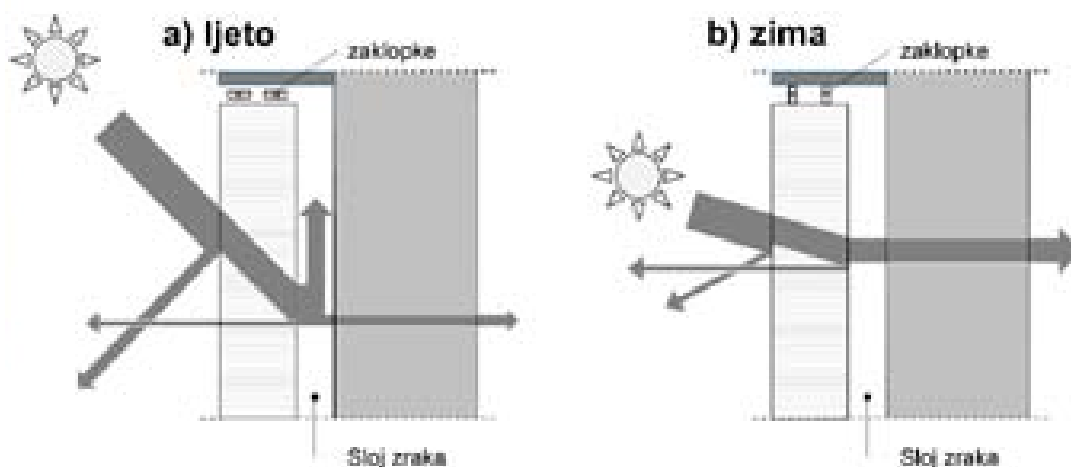
Ovaj se sustav sastoji od masivnog sloja zida koji djeluje kao spremnik topline i apsorpcijskog sloja s faktorom apsorpcije većim od 90 %, u pravilu u obliku premaza zida crnom bojom. Ispred apsorpcijskog sloja ugradi se sloj transparentne toplinske izolacije sa zaštitnim pokrovnim slojem (npr. staklena ploča, prozirni sloj žbuke,...) za zaštitu od izravnog atmosferskog utjecaja. Masivni sloj zida koji prihvaća toplinu Sunčeva zračenja prenosi je dalje, u unutarnji prostor, s vremenskim pomakom. Zbog toga su oscilacije temperature u prostoriji manje, a eventualni višak topline se može lagano odvesti ventilacijom prostora u hladnijim noćnim satima. (slika 3.37).



Slika 3.37 Shematski prikaz sustava s masivnim zidom za upadno Sunčevo zračenje a) ljeti i b) zimi

Sustav konvektivnog grijanja

Kod ovog sustava, sloj transparentne toplinske izolacije i apsorpcijski sloj su kao sklop, ovješeni ispred masivnog sloja zida (sloja za pohranu topline). Između ovješene sklopa i zida nalazi se sloj zraka, tako da do zagrijavanja akumulacijskog sloja dolazi samo zračenjem i konvekcijom (slika 3.38). Pomoću zaklopki na gornjoj i donjoj strani zračnog sloja, odnosno elementa transparentne toplinske izolacije, upravlja se kretanjem zraka u zračnom sloju. Kod otvorenih zaklopki toplina se strujom zraka u zračnom sloju odvodi u vanjski prostor čime se smanjuje temperatura sloja za apsorpciju i površine masivnog sloja zida. Time otpada potreba za dodatnim sjenilima s vanjske strane za zaštitu od ljetnog pregrijavanja. Zimi su zaklopke zatvorene tako da između sloja apsorpcije i sloja masivnog zida postoji zatvoreni sloj zraka odijeljen od vanjskog zraka.

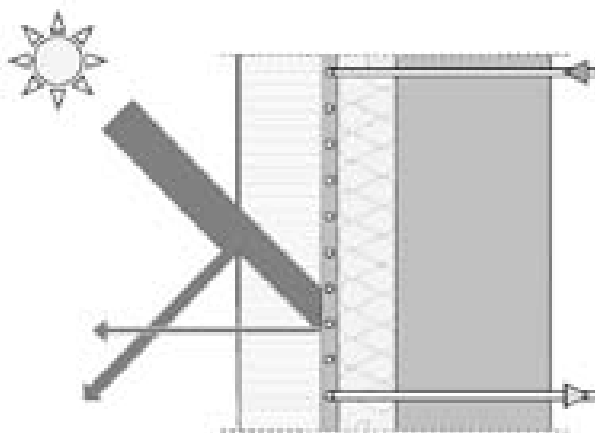


Slika 3.38 Shematski prikaz sustava konvektivnog grijanja s a) otvorenim zaklopkama ljeti i b) zatvorenim zaklopkama zimi

Hibridni sustav

U hibridnom sustavu dolazi do prijenosa energije preko sustava kanala u spremnik topline. Spremnik ovdje nije nužno sam vanjski zid, već to može biti sastavni dio tehničkog sustava zgrade. Kao nositelj topline može poslužiti voda ili zrak (slika 3.39). Transparentna toplinska izolacija se postavi ispred neprozirnog toplinsko-izolacijskog sloja. Kod sustava s vodom, za prihvaćanje topline sustav cijevi ugradi se u apsorpcijski sloj. Ova voda potpomaže grijanje prostora zimi i preuzima pripremu potrošne tople vode ljeti. Kod zraka kao nositelja topline,

između apsorpcijskog sloja i sloja neprozirne toplinske izolacije ostavi se sloj zraka kao kod sustava konvektivnog grijanja, s regulirajućim zaklopkama na krajevima. Kod ovog sustava manji su i noćni gubici topline zbog dodatnog neprozirnog toplinsko-izolacijskog sloja.

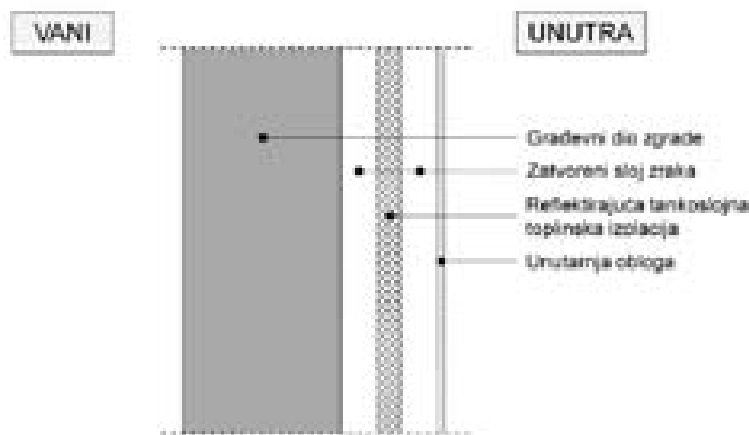


Slika 3.39 Shematski prikaz hibridnog sustava s vodom kao nositeljem energije

3.11.23.4 Reflektirajuća tankoslojna toplinska izolacija [65]

Reflektirajuća tankoslojna toplinska izolacija je toplinsko-izolacijski sendvič proizvod kojem se jezgra sastoji od jednog ili više slojeva materijala međusobno povezanih šivanjem, lijepljenjem ili zavarivanjem, a vanjske obloge su od aluminijske folije ili polimerne folije presvučene aluminijem debljine najmanje $8\text{ }\mu\text{m}$, koje daju proizvodu karakterističan sjajan izgled. Slojevi u jezgri mogu biti od različitih materijala: pusta biljnog ili životinjskog podrijetla, mineralne vune, mekane sintetske pijene ili polietilenske folije sa zatvorenim mjehurićima zraka. Ovi slojevi čine sklop debljine od nekoliko milimetara pa do 30 ili više milimetara, ovisno o broju i vrsti materijala slojeva. Proizvod se isporučuje u rolama širine najčešće jedan metar, duljine do dvadeset metara.

Toplinsko-izolacijsko svojstvo reflektirajuće tankoslojne toplinske izolacije, kao i kod svih drugih toplinsko-izolacijskih proizvoda, karakterizira se njenim toplinskim otporom, R . Budući da se radi o relativno tankom proizvodu, toplinski otpor samog proizvoda nije velik i kreće se, ovisno o debljini proizvoda tj. broju i vrsti slojeva, od $R \approx 0,1\text{ m}^2 \times \text{K/W}$ do $R \approx 1,0\text{ m}^2 \times \text{K/W}$. Sjajne aluminijske površine proizvoda imaju svojstvo da reflektiraju veći dio upadnog toplinskog zračenja što omogućuje da se značajno poboljša ukupni toplinski otpor građevnog dijela zgrade kad se reflektirajuća tankoslojna toplinska izolacija ugradi između dva neventilirana sloja zraka, debljine barem po 2 cm. Ukupni toplinski otpor reflektirajuće tankoslojne toplinske izolacije sa slojevima mirnog zraka, ovisno o kvaliteti izvedbe, iznosi između $R \approx 0,5\text{ m}^2 \times \text{K/W}$ do $R \approx 2,0\text{ m}^2 \times \text{K/W}$. Ovoliki toplinski otpor u pravilu je nedovoljan za zadovoljenje današnjih minimalnih zahtjeva iz važećih tehničkih propisa. Zato se reflektirajuća tankoslojna toplinska izolacija obično koristi kao dopunska toplinska izolacija građevnih dijelova zgrade izoliranih uobičajenim toplinsko-izolacijskim materijalima. Na slici 3.40 shematski je prikazan princip izvedbe reflektirajuće tankoslojne toplinske izolacije.



Slika 3.40 Shematski prikaz principa izvedbe reflektirajuće tankoslojne toplinske izolacije s obostranim slojem zraka

Da bi se, dakle, iskoristio reflektirajući efekt (niska emisivnost) površinskih slojeva reflektirajuće toplinske izolacije, ona se mora smjestiti u građevni dio zgrade tako da bude uz zatvoreni neventilirani sloj zraka. Time se ustvari povećava toplinski otpor sloja zraka. Kod toga konačna učinkovitost sklopa bitno ovisi i o kvaliteti izvedbe. Izvedba mora biti brižljiva i precizna kako bi se dobilo nepokretne, nepropusne, paralelne i kontinuirane slojeve zraka. Toplinska svojstva sustava mogu se pogoršati s vremenom uslijed djelovanja prašine, prljavštine ili vlage, što kod proračuna također treba uzeti u obzir.

Reflektirajuća tankoslojna toplinska izolacija u pravilu djeluje i kao parna i vjetrovna brana, o čemu također treba voditi računa kod odabira njenog položaja u sastavu građevnog dijela zgrade. Načelno ih treba smještati s unutarnje, tople strane građevnog dijela. Na tržištu se mogu naći proizvodi s mikroperforiranom aluminijskom folijom, koji su relativno propusni za vodenu paru.

Reflektirajuća toplinska izolacija je negoriv materijal, eurorazreda A2 prema HRN EN 13501-1, [44]. Proizvod ne sadrži štetnih sastojaka: formaldehida, azbesta, hlapljivih organskih komponenata. Otporan je na vlagu. Za proizvodnju reflektirajuće toplinske izolacije koristi se preko 40 % recikliranih sirovina, a sam proizvod se može u potpunosti reciklirati.

Ovisno o sastavu i debljini proizvoda, vrednovani indeks zvučne izolacije, R_w , reflektirajuće toplinske izolacije iznosi oko 16 do 20 dB.

Reflektirajuća tankoslojna toplinska izolacija primjenjuje se za dodatnu toplinsku izolaciju zidova, krovova i stropova, kod izgradnje novih i sanacije postojećih zgrada. Izvedba je relativno brza i jednostavna. Proizvod se može rezati nožem ili škarama. Ugrađeni proizvod zauzima relativno malo prostora.

3.11.23.5 Fazno promjenjivi materijali

Građevni materijali imaju svojstvo da u sebi pohranjuju (upijaju) toplinu ili iz sebe oslobađaju toplinu u obliku osjetne topline i latentne topline.

U masi materijala pohranjena (kod zagrijavanja materijala) ili oslobođena (kod ohlađivanja materijala) osjetna toplina, Q_s u džulima, dana je izrazom:

$$Q_s = c_p \times m \times \Delta T \quad (3.24)$$

gdje je:

- c_p specifični toplinski kapacitet materijala pri stalnom tlaku, u J/(kg·K),
- m masa materijala, u kg,
- ΔT promjena temperature materijala, u K ili °C.

U masi materijala pohranjena (kod taljenja ili isparavanja materijala) ili oslobođena (kod skrućivanja ili kondenzacije materijala) latentna toplina Q_L u džulima, na određenoj konstantnoj temperaturi (talištu odnosno vrelištu materijala), dana je izrazom:

$$Q_L = L_t \times m \quad (3.25)$$

odnosno

$$Q_L = L_i \times m \quad (3.26)$$

gdje je:

- L_t specifična latentna toplina taljenja, odnosno skrućivanja (u pravilu je toplina taljenja jednaka toplini skrućivanja), u J/(kg,
- L_i specifična latentna toplina isparavanja, odnosno kondenzacije (u pravilu je toplina isparavanja jednaka toplini kondenzacije), u J/(kg,
- m masa materijala, u kg,

Primjer 3.16

Odrediti i međusobno usporediti toplinsku energiju E_{40-70} , akumuliranu u 1 m³ natrijeva acetata trihidrata ($\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) i u 1 m³ vode (H_2O), kod njihova zagrijavanja od 40 °C na 70 °C.

Natrijev acetat trihidrat je hidrat octene kiseline s tri molekule kristalne vode. Karakteristike tog materijala su sljedeće:

Talište	55 °C – 58 °C
Specifična latentna toplina taljenja	$L_t = 242,85 \cdot 10^3 \text{ J/kg}$
Specifični toplinski kapacitet u čvrstom stanju, na 40 °C	$c_{p,\text{čvrsto}} = 3,31 \cdot 10^3 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$
Specifični toplinski kapacitet u tekućem stanju, na 70 °C	$c_{p,\text{tekuće}} = 3,06 \cdot 10^3 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$
Gustoća materijala u čvrstom stanju, na 40 °C	$\rho_{\text{čvrsto}} = 1\,392 \text{ kg/m}^3$
Gustoća materijala u tekućem stanju, na 70 °C	$\rho_{\text{tekuće}} = 1\,279 \text{ kg/m}^3$

Ukupna toplinska energija, osjetna i latentna, akumulirana po 1 m³ natrijeva acetata trihidrata, u području temperatura između 40 °C i 70 °C, iznosi:

$$\begin{aligned} E_{40-70} &= V \times \rho_{\text{čvrsto}} \times c_{p,\text{čvrsto}} \times \Delta T_{\text{čvrsto}} + V \times \rho_{\text{čvrsto}} \times L_t + V \times \rho_{\text{tekuće}} \times c_{p,\text{tekuće}} \times \Delta T_{\text{tekuće}} = \\ &= 1 \times 1\,392 \times 3,31 \times 10^3 \times (55 - 40) + 1 \times 1\,392 \times 242,85 \times 10^3 + 1 \times 1\,279 \times 3,06 \times 10^3 \times (70 - 58) = \\ &= 69\,112,8 \times 10^3 + 338\,047,2 \times 10^3 + 46\,964,88 \times 10^3 = 454\,124,88 \times 10^3 \text{ J} = 454,1 \text{ MJ} \end{aligned}$$

U istom intervalu temperatura, jednaki obujam vode (1 m³) akumulirati će osjetnu toplinu u iznosu: $\times$ hraniti $454,1 / 125,6 \approx 3,6$ puta više toplinske energije za jednaki obujam spremnika.

Iz primjera 3.16 proizlazi da je količina energije pohranjene ili oslobođene u procesima promjene agregatnog stanja materijala znatno veća od energije u slučaju samo osjetne topline, u ograničenom rasponu temperatura. To znači da se, zahvaljujući latentnoj toplini, može znatno povećati količina energije u nekom spremniku energije (povećanje gustoće spremljene energije), odnosno da se može znatno smanjiti obujam spremnika energije za jednaku količinu pohranjene energije. Da bi se ovo povoljno svojstvo latentne topline moglo praktički iskoristiti, potrebni su materijali koji mijenjaju fazu u području temperatura koje prevladavaju u našem svakodnevnom životu, kao što je temperatura zraka u zgradi i okolici zgrade, temperatura ljudskog tijela, temperatura potrošne tople vode,... U tom području temperatura pretežita promjena agregatnog stanja materijala je iz krutog u tekuće i obrnuto.

Tvari ili smjese tvari s relativno visokom specifičnom latentnom toplinom taljenja, koje mijenjaju svoje agregatno stanje u ograničenom rasponu temperatura smještenom između 10 °C i 80 °C, nazivamo **fazno promjenjivim materijalima** ili materijalima koji mijenjaju agregatno stanje (eng.: Phase Change Materials, kratica PCM).

Fazno promjenjivi materijali nisu toplinsko-izolacijski materijali. Oni ne povećavaju toplinski otpor građevnog dijela zgrade u koji su ugrađeni, ali povećavaju njegovu toplinsku inerciju (vidjeti točku 4.6.3), i time doprinose ujednačavanju temperature u prostoru zgrade. U

razdoblju prekomjernog zagrijavanja (npr. kod prodora Sunčeva zračenja u prostor zgrade) PCM se tali i u sebi pohranjuje toplinu koja bi prekomjerno zagrijala prostor. Kad se zgrada ohlađuje (npr. noću kod prekida grijanja) PCM se skrutnjava i u njemu pohranjena toplina se oslobađa i grije prostor zgrade. Na taj način regulira se temperatura prostora zgrade. Smanjenje najviše temperature odnosno povećanje najniže temperature ovim mehanizmom moguće je za oko 3 °C do 5 °C. Time se smanjuje, a često i sasvim isključuje, potreba za regulacijom temperature prostora odgovarajućim tehničkim sustavom, čime se indirektno štedi energija i čuva okoliš. Prema podacima u literaturi moguća ušteda toplinske energije na ovaj način je od 20 % do 40 %. Zato su fazno promjenjivi materijali uvršteni u ovo poglavlje o toplinsko-izolacijskim materijalima.

Fazno promjenjivi materijal može se uspješno koristiti i za pomak faze toplinskog djelovanja. Promjena toplinskog toka u prostoru koji se nalazi s jedne strane PCM-a ne će se osjetiti odmah u prostoru s druge strane PCM-a. Povećanje ili smanjenje toplinskog toka (promjena temperature) u okolici PCM-a izazvati će taljenje ili skrutnjavanje materijala na određenoj konstantnoj temperaturi. Efekt promjena temperature s jedne strane PCM-a osjetiti će se na drugoj strani tek nakon potpunog taljenja ili skrutnjavanja tog materijala.

Osim za „pasivnu klimatizaciju prostora“ i kao zamjena za grijanje u prijelaznim klimatskim razdobljima, fazno promjenjivi materijali koriste se u graditeljstvu i kao spremnici topline u solarnim toplinskim sustavima.

Sve fazno promjenjive materijale možemo svrstati u neku od slijedeće tri grupe materijala:

1 – hidrate anorganskih soli. Oni nastaju procesom vezanja molekula vode s ionima, molekulama ili koloidnim česticama (proces hidratacije) pri otapanju anorganskih soli u vodi. Primjeri hidrata anorganskih soli su: kalcijev klorid heksahidrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) i natrijev sulfat dekahidrat ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) poznat pod nazivom Glauberova sol.

2 – organske spojeve. Tu spadaju zasićene masne kiseline poput palmitinske kiseline ($\text{C}_{15}\text{H}_{31}\text{COOH}$) ili stearinske kiseline ($\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$) te alkani (zastarjeli naziv za alkane je parafini). Alkani su zasićeni ugljikovodici u kojima su ugljikovi atomi međusobno povezani samo jednostrukim vezama, opće formule $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ (npr. oktadekan $\text{C}_{18}\text{H}_{38}$). Alkani s 1 do 4 atoma ugljika su plinovi, s 5 do 15 atoma tekućine, a s više od 15 atoma ugljika su u čvrstom stanju, nalik vosku. O broju ugljikovih atoma ovisi njihova temperatura taljenja. U prirodi se alkani nalaze u nafti i prirodnom plinu. Alkani su povoljniji od hidrata soli za primjenu u graditeljstvu.

3 – euteklike ili eutekličke mješavine. To je kruta mješavina soli koja ima, za određenu vrijednost koncentracije, konstantnu temperatura taljenja, nižu od svake zasebne komponente. Nedostatak im je znatno viša cijena od anorganskih i organskih i PCM-a.

Za fazno promjenjive materijale je poželjno da imaju što višu vrijednost specifične latentne topline taljenja, da im temperatura taljenja bude u iskoristivom području temperatura te da im gustoća bude što veća, kako bi mogli u sebi pohraniti što više latentne topline. Osim toga, PCM bi morao biti kemijski stabilan, neotrovan, kompatibilan s većinom građevnih materijala, ne smije zagađivati okoliš, a cijena mu mora biti prihvatljiva.

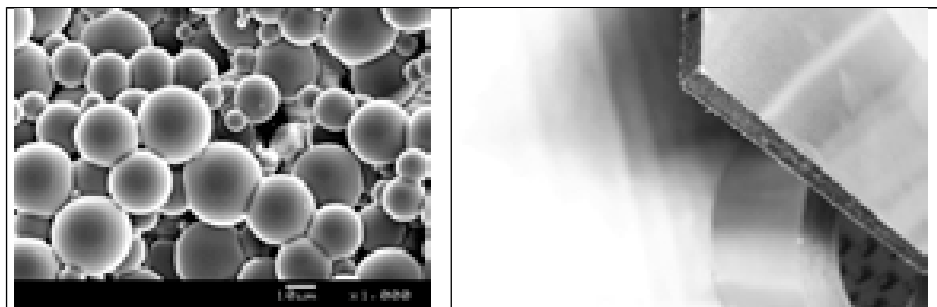
Fazno promjenjivi materijali za primjenu u graditeljstvu proizvode se u obliku vrlo sitnih kapsula (kuglica, granula) promjera 5 do 20 μm ili kao vodene disperzije. Tehnološki proces u kojem se PCM smješta u male kapsule nazivamo **inkapsuliranje** (učahurenje). Mikro inkapsuliranje je postupak kojim se vrlo sitne čestice PCM-a zatvaraju u čvrstu ovojnicu koja ih izolira i sprječava isušivanje i curenje materijala. Za spremnike PCM-a najviše se koristi polietilen i polipropilen.

Mikrokapsule s fazno promjenjivim materijalom miješaju se u klasične građevne materijale (mineralnu žbuku, gipsanu masu kod izrade ploča, pjenobeton,...) i povećavaju im svojstvo toplinske inercije (vidjeti sliku 3.41).

Građevne ploče s dodatkom PCM-a ugrađuju se u zidove, stropove, podove i to na jednaki način kao i ploče bez PCM-a. Ploče se mogu rezati i bušiti bez opasnosti od curenja PCM-a. Sloj žbuke debljine 3 cm koja sadrži maseni udio PCM-a 30 % ekvivalentan je otprilike, u pogledu toplinske inercije, sloju betona debljine 18 cm ili oko 23 cm debelom sloju opeke.

Vodene disperzije PCM-a koriste se za impregnaciju nosivih građevnih materijala.

Fazno promjenjivi materijali ne zahtijevaju posebno održavanje. Njihov životni vijek jednak je onom zgrade.



Slika 3.41 Mikrokapsule PCM-a [195], građevne ploče s PCM-om [196]

4 TOPLINSKA SVOJSTVA GRAĐEVNIH DIJELOVA ZGRADE

4.1 Uvod

Građevni dio zgrade je pojedinačni dio ili komponenta zgrade, određene geometrije i sastava. To je dio tijela zgrade kao primjerice zid, strop ili krov, ili, pak, njihov dio. Više međusobno spojenih građevnih dijelova čini tijelo zgrade. Tijelo zgrade sadrži vertikalne i horizontalne, vanjske i unutarnje građevne dijelove.

Građevni dijelovi zgrade koji tvore granicu između grijanog / hlađenog (kondicioniranog) prostora zgrade i vanjskog zraka, tla te nekondicioniranih prostora, čine **toplinsku ovojnicu zgrade**. Preko toplinske ovojnice kondicionirani prostor zgrade gubi ili dobiva toplinu. Toplinska ovojnica je, dakle, ovojnica zgrade koja izmjenjuje toplinu. Kad je iz konteksta jasno na što se odnosi, umjesto punog naziva „toplinska ovojnica“ koristi se skraćeni naziv „ovojnica“.

Građevni dijelovi zgrade koji čine toplinsku ovojnicu zgrade su:

- vanjski zidovi,
- zidovi prema nekondicioniranom prostoru zgrade,
- prozirni dijelovi u ovojnici zgrade: prozori, balkonska vrata, krovni prozori, ...,
- ovještene fasade,
- puna vanjska vrata,
- ravni i kosi krovovi,
- stropovi iznad vanjskog prostora,
- stropovi prema nekondicioniranim prostorima zgrade,
- zidovi i podovi prema tlu.

Kad su temperature zraka u prostoru zgrade i prostoru oko zgrade različite dolazi do prijenosa (izmjene) topline kroz građevne dijelove koji čine ovojnicu zgrade. To je prirodni proces do kojeg dolazi čim postoji razlika temperatura. Smjer prijenosa topline je iz prostora više temperature prema prostoru niže temperature (općenito, zimi iznutra prema van, a ljeti izvana prema unutra). Strogo matematički i fizikalno gledajući radi se o trodimenzionalnom toplinskom toku s vremenski promjenjivim rubnim uvjetima (promjenjiva unutarnja i vanjska temperatura), čije proračunavanje je moguće samo pomoću diferencijalnih jednadžbi.

Prijenos topline kroz građevne dijelove zgrade karakterizira se **koeficijentom prolaska topline**, koji daje toplinski tok kroz neku sredinu. Kod prijenosa topline kroz površinu nazivamo ga **plošni koeficijent prolaska topline**. Mjerna jedinica u SI sustavu je $W/(m^2 \times K)$. U slučaju prijenosa duž površine čija je jedna dimenzija znatno veća od druge, govori se o **duljinskom koeficijentu prolaska topline**. Mjerna jedinica u SI sustavu je $W/(m \times K)$. Kad se za prijenos topline može smatrati da toplina prolazi „jednom točkom“, nazivamo ga **točkasti koeficijent prolaska topline**. Njegova mjerna jedinica je W/K .

Recipročnu vrijednost koeficijenta prolaska topline nazivamo **toplinski otpor**.

4.2 Jednodimenzijski stacionarni prijenos topline kroz neprozirni građevni dio zgrade

4.2.1 Plošni koeficijent prolaska topline, U , neprozirnog građevnog dijela koji se sastoji od paralelnih homogenih slojeva

Da bi se za građevinsku praksu dobile jednostavne, ali još uvijek dovoljno točne metode proračuna prijenosa topline, potrebna su određena pojednostavnjenja.

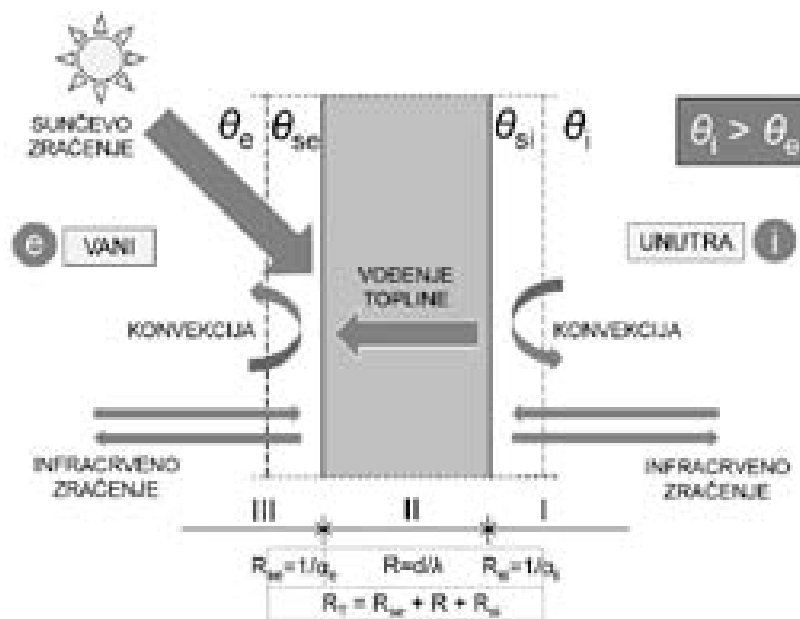
Građevni dijelovi zgrade: zidovi, krovovi, stropovi, ... u pravilu su pločasta tijela konstantne debljine, sastavljena od kvazihomogenih materijala. Stoga se na dovoljnoj udaljenosti od mjesta njihova spajanja s drugim građevnim dijelovima zgrade (područja toplinskih mostova) može pretpostaviti da se radi o jednodimenzijskom toplinskom toku okomitom na njihovu

površinu. Daljnje pojednostavnjenje je prihvaćanje stacionarnog stanja, to znači vremenski nepromjenjivih rubnih uvjeta (konstantne temperature unutarnjeg i vanjskog zraka).

Uz uvjet da je temperatura zraka u zgradi viša od temperature vanjskog zraka, te uz pretpostavke jednodimenzijskog toplinskog toka i stacionarnih rubnih uvjeta, analizirati će se postupno prijenos topline kroz neprozirni građevni dio iz toplinske ovojnice zgrade (npr. vanjski zid), načinjen od homogenog materijala. Toplinska ovojnica zgrade djeluje, zapravo, kao izmjenjivač topline.

Na slici 4.1 prijenos topline kroz vanjski zid iz ovojnice zgrade shematski je prikazan razdijeljen u tri odvojena procesa:

- dio I prijelaz topline iz zraka u prostoriji na unutarnju površinu građenog dijela,
- dio II prolazak topline kroz neprozirni građevni dio zgrade,
- dio III prijelaz topline s vanjske površine građenog dijela na vanjski zrak.



Slika 4.1 Shematski prikaz prijenosa topline kroz vanjski neprozirni homogeni građevni dio zgrade

U prostoriji toplina prelazi na površinu vanjskog građevnog dijela strujanjem (konvekcijom) između zraka u prostoriji i površine građevnog dijela, te zračenjem (radijacijom) između površine promatranog građevnog dijela i površina drugih građevnih dijelova koji zatvaraju promatranu prostoriju.

Neka je unutarnja površina promatranog vanjskog građevnog dijela zgrade temperature θ_{si} okružena unutarnjim zrakom temperature θ_i , pri čemu je $\theta_i > \theta_{si}$. Čestice zraka u dodiru s hladnijom površinom predaju dio svoje topline površini, postaju zato teže i struje prema dolje, a na njihovo mjesto dolaze toplije čestice zraka iz okolnog prostor. Na opisani način nastaje struja konvekcije i toplina sa zraka postupno prelazi na površinu građevnog dijela. Gustoća toplinskog toka, q_c , u W/m^2 , koja prelazi konvekcijom dana je izrazom:

$$q_c = h_c \times (\theta_i - \theta_{si}) \quad (4.1)$$

gdje je h_c **koeficijent konvektivnog prijelaza topline**, a znači gustoću toplinskog toka koju površina građevnog dijela zgrade primi (ili otpusti) konvekcijom, kad je između te površine i okolnog zraka jedinična razlika temperatura. U SI sustavu, jedinica koeficijenta konvektivnog prijelaza topline je $W/(m^2 \times K)$. Vrijednost ovog koeficijenta utvrđuje se eksperimentalno, a ovisi o brzini zraka uz promatranu površinu, orijentaciji površine i smjeru toplinskog toka.

Toplina se može prenositi s jednog tijela na drugo i zračenjem, dakle i kad oni nisu u izravnom međusobnom dodiru. Pretpostavlja se da su svi građevni dijelovi iz ovojnice prostorije, osim promatranog građevnog dijela, unutarnji građevni dijelovi zgrade jednake površinske temperature, za koju se prihvaća da je jednaka temperaturi zraka u prostoriji, θ_i . Uz navedenu pretpostavku, gustoća toplinskog toka, q_r , u W/m^2 , koja se prenosi zračenjem na unutarnju površinu vanjskog građevnog dijela, dana je izrazom:

$$q_r = h_r \times (\theta_i - \theta_{si}) \quad (4.2)$$

gdje je h_r **koeficijent prijelaza topline zračenjem**, a znači gustoću toplinskog toka koju površina građevnog dijela zgrade primi (ili otpusti) zračenjem, kad je između te površine i površina ostalih građevnih dijelova prostorije jedinična razlika temperatura. U SI sustavu jedinica, jedinica koeficijenta prijelaza topline zračenjem je $W/(m^2 \times K)$. Vrijednost ovog koeficijenta ovisna je o temperaturama i faktorima emisije ε_1 i ε_2 površina tijela 1 i 2 koja izmjenjuju toplinu zračenjem.

Ukupna gustoća toplinskog toka, q , u W/m^2 , koji prelazi na unutarnju površinu vanjskog građevnog dijela je:

$$q = (h_c + h_r) \times (\theta_i - \theta_{si}) \quad (4.3)$$

Zbroj koeficijenata prijelaza topline konvekcijom i zračenjem nazivamo **koeficijent unutarnjeg prijelaza topline** i označavamo simbolom h_i . S tom zamjenom izraz (4.3) dobiva konačan oblik:

$$q = h_i \times (\theta_i - \theta_{si}) \quad (4.4)$$

ili pisano u obliku razlomka:

$$q = \frac{(\theta_i - \theta_{si})}{(1/h_i)} \quad (4.5)$$

Recipročnu vrijednost koeficijenta h_i nazivamo **otpor unutarnjeg prijelaza topline** i označavamo s R_{si} :

$$R_{si} = \frac{1}{h_i} \quad (4.6)$$

Mjerna jedinica koeficijenta h_i je $W/(m^2 \times K)$, a toplinskog otpora R_{si} je $m^2 \times K/W$.

Koeficijent unutarnjeg prijelaza topline, h_i , u $W/(m^2 \times K)$, jednak je količini topline u J koja u jednoj sekundi prijeđe iz zraka u prostoriji na m^2 površine građevnog dijela pri razlici temperatura zraka i površine građevnog dijela 1 K, kad je postignuto stacionarno stanje.

Dalje se toplina prenosi vođenjem kroz materijal promatranog građevnog dijela zgrade.

Prema Fourier-ovom zakonu vođenja topline, može se pisati da je:

$$q = \frac{\lambda \times (\theta_{si} - \theta_{se})}{d} \quad (4.7)$$

odnosno:

$$q = \frac{(\theta_{si} - \theta_{se})}{(d/\lambda)} \quad (4.8)$$

Izraz d/λ nazivamo **toplinski otpor** građevnog dijela i označava oznakom R :

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (4.9)$$

gdje je

d debljina jednoslojnog homogenog građevnog dijela, u m,

λ projektna toplinska vodljivost materijala građevnog dijela, u $W/(m \times K)$. To je jedna od osnovnih toplinskih karakteristika materijala kroz koji se prenosi toplina. Jedinica veličine λ u SI sustavu je $W/(m \times K)$. Tipične projektne vrijednosti toplinske vodljivosti uobičajenih građevnih materijala dane su u Prilogu 3.1.

Mjerna jedinica toplinskog otpora je $m^2 \times K/W$.

Kod višeslojnih građevnih dijelova zgrade koji se sastoje od više homogenih slojeva okomitih na toplinski tok, ukupni toplinski otpor, R_t , u $m^2 \times K/W$, sklopa od više homogenih slojeva, dobije se zbrajanjem toplinskih otpora pojedinih slojeva:

$$R_t = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (4.10)$$

gdje je:

R_1 projektni toplinski otpor prvog sloja građevnog dijela zgrade, u $m^2 \times K/W$,

R_2 projektni toplinski otpor drugog sloja građevnog dijela zgrade, u $m^2 \times K/W$,

R_n projektni toplinski otpor n-tog sloja građevnog dijela zgrade, u $m^2 \times K/W$.

Toplinski otpor građevnog dijela zgrade, R_t , karakterizira svojstvo **toplinske izolacije** tog građevnog dijela, tj. njegovo svojstvo da u određenoj mjeri smanji prijenos topline kroz taj građevni dio. Što je veći toplinski otpor, R_t , to će taj građevni dio bolje toplinski izolirati što znači da će prijenos topline kroz njega biti manji.

Toplinski tok koji je prošao kroz promatrani građevni dio prenosi se dalje s vanjske površine tog građevnog dijela u vanjski prostor. Taj prijelaz se obavlja konvekcijom i zračenjem. Uz pretpostavku da je srednja temperatura tla, susjednih građevina i atmosfere jednaka temperaturi vanjskog zraka, θ_e , te zanemarujući djelovanje Sunčeva zračenja, prijelaz konvekcijom iznositi će:

$$q_c = h_c \times (\theta_{se} - \theta_e) \quad (4.11)$$

a gustoća toplinskog toka, q_r , u W/m^2 , koja se prenosi zračenjem iznositi će:

$$q_r = h_r \times (\theta_{se} - \theta_e) \quad (4.12)$$

Ukupna gustoća toplinskog toka, q , u W/m^2 , koji prelazi s vanjske površine građevnog dijela na vanjski zrak je:

$$q = (h_c + h_r) \times (\theta_{se} - \theta_e) \quad (4.13)$$

U ovom slučaju zbroj koeficijenata prijelaza topline konvekcijom i zračenjem nazivamo **koeficijent vanjskog prijelaza topline** i označavamo simbolom h_e . S tom zamjenom izraz (4.13) dobiva konačan oblik:

$$q = h_e \times (\theta_{se} - \theta_e) \quad (4.14)$$

ili pisano u obliku razlomka:

$$q = \frac{(\theta_{se} - \theta_e)}{(1/h_e)} \quad (4.15)$$

Recipročnu vrijednost koeficijenta h_e nazivamo **otpor vanjskog prijelaza topline** i označavamo s R_{se} :

$$R_{se} = \frac{1}{h_e} \quad (4.16)$$

Mjerna jedinica koeficijenta h_e je $W/(m^2 \times K)$, a toplinskog otpora R_{se} je $m^2 \times K/W$.

Koeficijent vanjskog prijelaza topline, h_e , u $W/(m^2 \times K)$, jednak je količini topline u J koja u jednoj sekundi prijeđe s $1m^2$ površine građevnog dijela na vanjski zrak pri razlici temperatura površine građevnog dijela i vanjskog zraka 1 K, kad je postignuto stacionarno stanje.

Gustoće toplinskog toka dane izrazima (4.5), (4.8) i (4.15) su jednake jer se radi o stacionarnim uvjetima prijenosa topline. Kako su jednaki razlomci jednaki jednom razlomku kojemu je brojnik zbroj njihovih brojnika, a nazivnik zbroj njihovih nazivnika, to se za gustoću toplinskog toka kroz građevni dio dobije izraz:

$$q = \frac{(\theta_i - \theta_e)}{(1/h_i + d/\lambda + 1/h_e)} \quad (4.17)$$

ili izraženo toplinskim otporima:

$$q = \frac{(\theta_i - \theta_e)}{(R_{si} + R + R_{se})} \quad (4.18)$$

Zbroj toplinskog otpora unutarnjeg i vanjskog prijelaza topline s toplinskim otporom građevnog dijela označavamo kraće i R_T :

$$R_T = R_{si} + R + R_{se} \quad (4.19)$$

i nazivamo **ukupni toplinski otpor** građevnog dijela zgrade.

Ukupni toplinski otpor, R_T , ravnog građevnog dijela zgrade koji se sastoji od toplinski homogenih slojeva okomitih na smjer toplinskog toka, dan je izrazom:

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se} = R_{si} + R_t + R_{se} \quad (4.20)$$

gdje je

R_{si} otpor unutarnjeg prijelaza topline, u $m^2 \times K/W$,

R_{se} otpor vanjskog prijelaza topline, u $m^2 \times K/W$,

$R_1, R_2, \dots, R_n$ su projektni toplinski otpori pojedinih slojeva građevnog dijela, u $m^2 \times K/W$.

Po definiciji nazivamo **plošni koeficijent prolaska topline** građevnog dijela zgrade i označavamo simbolom U , takvu veličinu koja zadovoljava izraz:

$$q = U \times (\theta_i - \theta_e) \quad (4.21)$$

Iz izraza (4.18) i (4.22) proizlazi da je:

$$U = \frac{1}{(1/h_i + d/\lambda + 1/h_e)} \quad (4.22)$$

odnosno, izraženo toplinskim otporima:

$$U = \frac{1}{(R_{si} + R + R_{se})} \quad (4.23)$$

ili kraće pisano:

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (4.24)$$

U SI sustavu mjernih jedinica, jedinica koeficijenta U je $W/(m^2 \times K)$, a ukupnog toplinskog otpora građevnog dijela zgrade, R_T , je $(m^2 \times K)/W$.

Na vrijednost veličina U i R_T ne utječe redoslijed slojeva u građevnom dijelu zgrade, kao ni redoslijed po kojem se proračunavaju i zbrajaju toplinski otpori pojedinih slojeva.

Iz izraza (4.21) i (4.24) slijedi da je:

$$q = \frac{(\theta_i - \theta_e)}{R_T} \quad (4.25)$$

Plošni koeficijent prolaska topline, U , u $W/(m^2 \times K)$, jednak je količini topline koja u jedinici vremena prođe okomito kroz površinu građevnog dijela jedinične ploštine pri jediničnoj razlici temperatura zraka s obje strane građevnog dijela, kad je postignuto stacionarno stanje. Ako

je iz konteksta jasno da se radi o plošnom koeficijentu prolaska topline, može se iz naziva izostaviti riječ „plošni“.

Što je veća vrijednost koeficijenta prolaska topline, U , građevnog dijela zgrade to će tijekom zime gubici topline kroz taj građevni dio biti veći.

Ako koeficijent prolaska topline, U , prikazujemo kao konačan rezultat proračuna, zaokružimo ga na dvije značajne znamenke.

Gore prikazani postupak proračuna koeficijenta prolaska topline, U , izveden je uz pretpostavku da između unutarnjeg i vanjskog zraka postoji konstantan pad temperature kroz duže vremensko razdoblje. To međutim, u stvarnosti, nikad nije slučaj jer je temperatura vanjskog zraka podvrgnuta stalnim oscilacijama, a i unutarnja temperatura je promjenjiva s vremenom. Vrijednost koeficijenta prolaska topline, U , izračunata s prosječnim temperaturama kroz duže vremensko razdoblje, prema gore prikazanom postupku, prikladna je za proračun srednjeg toplinskog toka u tom dužem vremenskom intervalu.

Metodologija proračuna koeficijenta prolaska topline, U , detaljno je obrađena u normi HRN EN ISO 6946 [66].

Primjer 4.1

Proračunati koeficijent prolaska topline, U , vanjskog zida od armiranog betona s toplinsko-izolacijskim slojem s vanjske strane. Sastav zida, debljina slojeva, d , i projektna toplinska vodljivost materijala slojeva, λ , vidljivi su iz tablice 4.1.

Tablica 4.1 Proračun koeficijenta prolaska topline, U

Materijal sloja	d m	λ W/(m×K)	R m ² ×K/W
R_{si}			0,130
Armirani beton	0,200	2,600	0,077
Toplinska izolacija	0,100	0,040	2,500
Zaštitna žbuka	0,004	0,700	0,006
R_{se}			0,040
Ukupni toplinski otpor, R_T			2,753

Koeficijent prolaska topline, U , iznosi:

$$U = \frac{1}{2,753} = 0,36 \frac{W}{(m^2 \times K)}$$

4.2.2 Otpori unutarnjeg i vanjskog prijelaza topline

Otpor prijelaza topline dan je jednadžbom:

$$R_s = \frac{1}{h_c + h_r} \quad (4.26)$$

gdje je:

h_c koeficijent prijelaza topline konvekcijom (strujanjem), u W/(m²×K),

h_r koeficijent prijelaza topline radijacijom (zračenja), u W/(m²×K).

Koeficijent prijelaza topline zračenjem je dan izrazom:

$$h_r = \epsilon \times h_{r0} \quad (4.27)$$

gdje je

$$h_{r0} = 4 \times \sigma \times T_m^3 \quad (4.28)$$

U gornjim izrazima je:

- ε emisivnost površine građevnog dijela zgrade u poluprostor, veličina bez dimenzije,
 h_{r0} koeficijent prijelaza topline zračenjem za površinu crnog tijela (prema tablici 4.2), u W/(m²×K),
 σ Stefan-Bolzmanaova konstanta ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ W/(m²×K⁴),
 T_m srednja termodinamička temperatura površine i njezine okolice, u K.

Uobičajena vrijednost emisivnosti za unutarnje i vanjske površine građevnih dijelova iznosi $\varepsilon = 0,9$.

Na unutarnjim površinama ili vanjskim površinama uz dobro ventilirani sloj zraka je

$$h_c = h_{ci} \quad (4.29)$$

gdje je:

- $h_{ci} = 5,0$ W/(m²×K) za toplinski tok prema gore,
 $h_{ci} = 2,5$ W/(m²×K) za horizontalni toplinski tok,
 $h_{ci} = 0,7$ W/(m²×K) za toplinski tok prema dolje.

Na vanjskim površinama je

$$h_c = h_{ce} \quad (4.30)$$

gdje je:

$$h_{ce} = 4 + 4 \times v \quad (4.31)$$

Ovdje je v brzina vjetra uz površinu građevnog dijela, u m/s.

Tablica 4.2 Vrijednosti koeficijenta prijelaza topline zračenjem, h_{r0} , crnog tijela (prema [66])

Srednja temperatura, °C	h_{r0} W/(m ² ×K)
-10	4,1
0	4,6
10	5,1
20	5,7
30	6,3

Otpori unutarnjeg i vanjskog prijelaza topline relativno malo utječu na vrijednost ukupnog otpora toplinski dobro izoliranog građevnog dijela zgrade. Zbog toga se za proračun prijenosa topline često koriste „prosječne“ dogovorno prihvaćene vrijednosti. Ako nema posebnih nacionalnih zahtjeva, za ravne površine u dodiru sa zrakom dogovorno se uzimaju kao projektne vrijednosti, vrijednosti otpora prijelaza topline iz tablice 4.3. Vrijednosti dane pod „horizontalno“ odnose se i za smjerove koji odstupaju od horizontalne ravnine za kut $\alpha = \pm 30^\circ$. To znači da je za kose krovove nagiba $\alpha \geq 60^\circ$, $R_{si} = 0,13$ m²×K/W, a za $\alpha < 60^\circ$, $R_{si} = 0,10$ m²×K/W.

Tablica 4.3 Dogovorni otpori unutarnjeg i vanjskog prijelaza topline (prema [66])

Otpor prijelaza topline, $m^2 \times K/W$	Smjer toplinskog toka		
	prema gore	horizontalno	prema dole
R_{si}	0,10	0,13	0,17
R_{se}	0,04	0,04	0,04

Vrijednosti iz tablice 4.3 za otpor unutarnjeg prijelaza topline, R_{si} , proračunate su za $\varepsilon = 0,9$ te uz h_{r0} ocijenjen za 20 °C. Vrijednosti iz tablice 4.3 za otpor vanjskog prijelaza topline, R_{se} , proračunate su za $\varepsilon = 0,9$ te uz h_{r0} ocijenjen za 10 °C i $v = 4$ m/s.

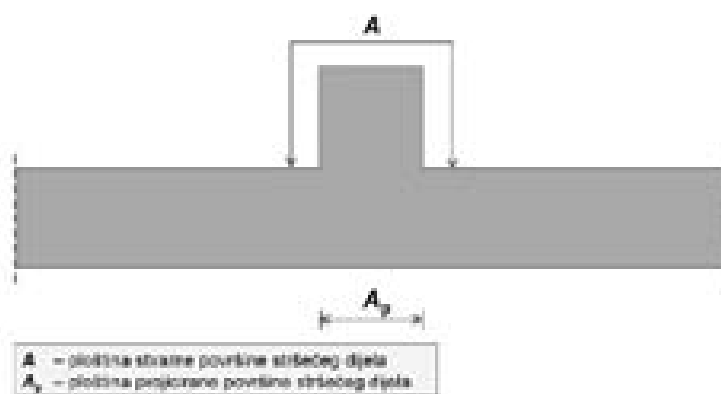
Unutarnji otpori prijelaza topline iz tablice 4.3 vrijede samo za proračun toplinskih gubitaka. Za ocjenjivanje temperature na površini građevnog dijela zgrade i ocjenjivanje opasnosti od površinske kondenzacije vodene pare, koriste se druge vrijednosti, prilagođene stvarnoj promatranoj situaciji (vidjeti tablicu 4.11).

Dijelovi koji strše iz inače ravnih površina, kao što su to primjerice stupovi, moraju se u proračunu ukupnog toplinskog otpora zanemariti ako su od materijala čija toplinska vodljivost nije veća od 2,5 W/(m×K). Ako je dio koji strši sastavljen od materijala čija je toplinska vodljivost veća od 2,5 W/(m×K) i ako on nije izoliran, proračun se mora provesti kao da stršećeg dijela nema, ali otpor prijelaza topline treba pomnožiti omjerom ploštine projicirane površine i ploštine stvarne površine stršećeg dijela (vidjeti sliku 4.2):

$$R_{sp} = R_s \times (A_p / A) \quad (4.32)$$

gdje je:

- R_{sp} otpor prijelaza topline za projiciranu površinu stršećeg dijela, u $m^2 \times K/W$,
- R_s otpor prijelaza topline ravnog građevnog dijela prema prethodnim izrazima ili iz tablice 4.3, u $m^2 \times K/W$,
- A_p ploština projicirane površine stršećeg dijela, u m^2 ,
- A ploština stvarne površine stršećeg dijela, u m^2 .



Slika 4.2 Ploštine stvarne i projicirane površine stršećeg dijela

Jednadžba (4.32) odnosi se na otpor unutarnjeg i vanjskog prijelaza topline.

4.2.3 Toplinski otpor zračnih slojeva

Sloj zraka

Slojem zraka u građevnom dijelu zgrade nazivamo zračni prostor koji:

- je ograničen s dvije površine slojeva građevnog dijela koje su paralelne, postavljene okomito na smjer toplinskog toka i imaju faktor emisije ne manji od 0,8 (ovaj uvjet zadovoljava većina građevnih materijala),
- ima debljinu (dimenzija u smjeru toplinskog toka) koja je manja od 0,1 puta svaka od ostalih dviju dimenzija i nije veća od 0,3 m,
- ne izmjenjuje zrak s unutarnjim okolišem.

Ako navedeni uvjeti nisu ispunjeni, koristi se postupak naveden u nastavku za „zračni prostor“ ili za „zračne šupljine“. Za građevne dijelove koji sadrže slojeve zraka deblje od 0,3 m ne proračunava se jedinstveni koeficijent prolaska topline, U , već se toplinski tokovi proračunaju iz toplinske bilance (vidjeti poglavlje 6.12.4).

U normi HRN EN ISO 6946 [66] razlikuje se neventilirani, slabo ventilirani i dobro ventilirani sloj zraka.

Neventilirani sloj zraka je onaj kroz kojeg nema izraženog toka zraka, tj. koji je zatvoren prema okolišu. U neventiliranom (zatvorenom) sloju zraka toplina se prenosi vođenjem, strujanjem i zračenjem. S povećanjem debljine sloja povećava se prijenos topline strujanjem. Projektne vrijednosti toplinskog otpora neventiliranih slojeva zraka debljine do 30 cm dane su u tablici 4.4. Vrijednosti pod „horizontalno“ odnose se i na smjerove toplinskog toka koji odstupaju od horizontalne ravnine do $\pm 30^\circ$.

Ako sloj zraka ima male otvore prema vanjskom prostoru, mora se također smatrati neventiliranim slojem zraka ako ti otvori nisu raspoređeni tako da dopuštaju protok zraka kroz sloj i ako ne premašuju:

- 500 mm^2 po dužnom metru (u horizontalnom smjeru), za vertikalne slojeve zraka,
- 500 mm^2 po kvadratnom metru ploštine površine, za horizontalne slojeve zraka.

Tablica 4.4 Toplinski otpor neventiliranih slojeva zraka (površine s velikim faktorom emisije), (prema [66])

Debljina sloja zraka, mm	Toplinski otpor R_g , u $\text{m}^2 \times \text{K/W}$, za smjer toplinskog toka		
	prema gore	horizontalno	prema dole
0	0,00	0,00	0,00
5	0,11	0,11	0,11
7	0,13	0,13	0,13
10	0,15	0,15	0,15
15	0,16	0,17	0,17
25	0,16	0,18	0,19
50	0,16	0,18	0,21
100	0,16	0,18	0,22
300	0,16	0,18	0,23

Napomena: Međuvrijednosti se određuju linearnom interpolacijom.

Slabo ventilirani sloj zraka je onaj kroz koji je ograničen protok zraka iz vanjskog okoliša kroz otvore ploštine A_v koja je unutar slijedećih raspona:

- $500 \text{ mm}^2 < A_v < 1\,500 \text{ mm}^2$ po dužnom metru (u horizontalnom smjeru), za vertikalne slojeve zraka,

- $500 \text{ mm}^2 < A_v < 1\,500 \text{ mm}^2$ po kvadratnom metru ploštine površine, za horizontalne slojeve zraka.

Približno se smije ukupni toplinski otpor građevnog dijela sa slabo ventiliranim slojem zraka, $R_{T,u}$, u $\text{m}^2 \times \text{K/W}$, proračunati iz izraza

$$R_{T,u} = \frac{R_{T,u} \times (1500 - A_v)}{1000} + \frac{R_{T,v} \times (A_v - 500)}{1000} \quad (4.33)$$

gdje je:

$R_{T,u}$ ukupni toplinski otpor građevnog dijela za neventilirani sloj zraka,

$R_{T,v}$ ukupni toplinski otpor građevnog dijela za dobro ventilirani sloj zraka.

Dobro ventilirani sloj zraka je onaj kod kojeg su otvori između sloja zraka i vanjskog okoliša jednaki ili premašuju:

- $1\,500 \text{ mm}^2$ po dužnom metru (u horizontalnom smjeru), za vertikalne slojeve zraka,
- $1\,500 \text{ mm}^2$ po kvadratnom metru ploštine površine, za horizontalne slojeve zraka.

Ukupni toplinski otpor građevnog dijela zgrade koji sadrži dobro ventilirani sloj zraka mora se odrediti zanemarujući toplinski otpor sloja zraka i svih drugih slojeva između sloja zraka i vanjskog okoliša, a uključujući vanjski otpor prijelaza topline koji odgovara mirnom zraku (jednak R_{si} iz tablice 4.3).

S unutarnje strane vanjskih zidova ponekad se izvodi sloj zraka koji je sa strane prostorije zatvoren pločastom oblogom nepropusnom za zrak, a služi za provođenje raznih instalacija. Ako takav zatvoreni sloj zraka nije ispunjen toplinsko-izolacijskim materijalom treba se promatrati kao neventilirani sloj zraka i njegov toplinski otpor, kod proračuna koeficijenta prolaska topline, U , vanjskog zida, treba pribrojiti ukupnom otporu prolaska topline. Sloj zraka s unutarnje strane zida, koji je povezan s unutarnjim prostorom (prema unutra ventilirani sloj zraka) treba izbjegavati iz higijenskih razloga.

Zračni prostor

Zračnim prostorom u neprozirnom građevnom dijelu zgrade nazivamo sloj zraka koji ne zadovoljava prethodno navedene uvjete za sloj zraka i čija je širina i duljina jednaka ili veća od deseterostruke debljine sloja u smjeru toplinskog toka. Ako je debljina sloja zraka promjenjiva, za proračun toplinskog otpora treba uzeti prosječnu vrijednost debljine sloja.

Toplinski otpor **neventiliranog zračnog prostora**, R_g , u $\text{m}^2 \times \text{K/W}$, dan je izrazom:

$$R_g = \frac{1}{h_a + h_r} \quad (4.34)$$

Ovdje je

h_a koeficijent vođenja topline / prijelaza topline strujanjem, u $\text{W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$,

h_r koeficijent prijelaza topline zračenjem, u $\text{W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$.

Za h_a uzima se veća vrijednost od vrijednosti $0,025/d$ i vrijednosti h_a danih u tablicama 4.5 i 4.6. d je debljina zračnog prostora u smjeru toplinskog toka, u metrima, a ΔT je razlika temperature kroz zračni prostor, u kelvinima.

Tablica 4.5 Koeficijent prijenosa topline strujanjem za razliku temperature $\Delta T \leq 5 \text{ K}$, (prema [66])

Smjer toplinskog toka	$h_a \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$
horizontalan	1,25
prema gore	1,95
prema dolje	$0,12 \times d^{0,44}$

Tablica 4.6 Koeficijent prijenosa topline strujanjem za razliku temperature $\Delta T > 5 \text{ K}$, (prema [66])

Smjer toplinskog toka	$h_a \text{ W/(m}^2 \times \text{K)}$
horizontalan	$0,73 \times (\Delta T)^{1/3}$
prema gore	$1,14 \times (\Delta T)^{1/3}$
prema dolje	$0,09 \times (\Delta T)^{0,187} \times d^{0,44}$

h_r je određen izrazom:

$$h_r = E \times h_{r0} \quad (4.35)$$

a E izrazom:

$$E = \frac{1}{\left[(1/\epsilon_1) + (1/\epsilon_2) - 1 \right]} \quad (4.36)$$

ϵ_1 i ϵ_2 su faktori emisije u poluprstor površina (jednakih ploština) koje ograničavaju zračni prostor, a h_{r0} je koeficijent prijelaza topline zračenjem površine crnog tijela prema podacima iz tablice 4.2.

Slabo ventilirani zračni prostor i **dobro ventilirani zračni prostor** definirani su kao kod sloja zraka i njihov toplinski otpor se proračunava na jednaki način kao i kod sloja zraka.

Neventilirane zračne šupljine (mali ili podijeljeni neventilirani zračni prostori)

Zračna šupljina u neprozirnom građevnom dijelu je zračni prostor čija je širina ili duljina usporediva s debljinom (slika 4.3). Toplinski otpor zračne šupljine dan je izrazom (4.34), gdje je:

$$h_r = \frac{1}{\left\{ \left(\frac{1}{\epsilon_1} \right) + \left(\frac{1}{\epsilon_2} \right) - 2 + \frac{2}{\left[1 + \left(1 + d^2/b^2 \right)^{0,5} - d/b \right]} \right\}} \quad (4.37)$$

Ovdje je

d debljina zračne šupljine, u m,

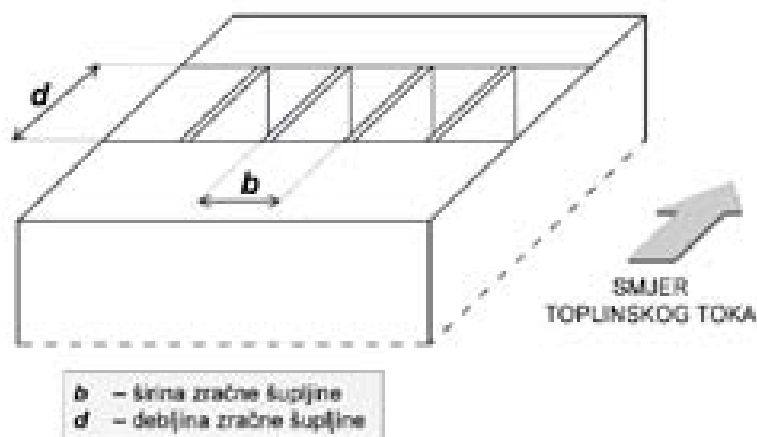
b širina zračne šupljine, u m,

ϵ_1 i ϵ_2 su faktori emisije u poluprstor površina na toploj i hladnoj strani zračne šupljine.

h_a se proračunava kao kod neventiliranog zračnog prostora.

Jednadžba (4.34) prikladna je za proračun toplinskog toka kroz građevne dijelove zgrade za bilo koje debljine zračne šupljine. Za proračun raspodjele temperatura u građevnom dijelu koji ima zračne šupljine, ona daje rezultate prihvatljive točnosti samo do debljine zračne šupljine $d \leq 50 \text{ mm}$.

Za zračnu šupljinu koja nije pravokutnog oblika, njen toplinski otpor jednak je toplinskom otporu pravokutne šupljine iste ploštine i omjera stranica kao kod stvarne šupljine.



Slika 4.3 Dimenzije zračne šupljine

4.2.4 Toplinski otpori negrijanih prostora

Prijenos topline kroz negrijane prostorije proračunava se prema postupku iz točke 6.12.4. Ako vanjska ovojnica negrijanog prostora nije toplinski izolirana, može se koristiti pojednostavnjeni postupak kojim se negrijani prostor zamjenjuje odgovarajućim toplinskim otporom.

Tavani

Kod gornjeg završetka zgrade s ravnim toplinski izoliranim stropom i dvostrešnim kosim krovom, tavan se može promatrati kao toplinski homogen sloj s toplinskim otporom, R_u , danim u tablici 4.7 u ovisnosti o ventilaciji tavana i stupnju emisije donje površine obloge krova.

Tablica 4.7 Toplinski otpori tavanskog prostora, (prema [66])

	Karakteristike krova	R_u $m^2 \times K/W$
1	Krov s crijepom, bez sloja rezervne hidroizolacije, oplatnih ploča ili slično	0,06
2	Krov sa šindrom ili s crijepom sa slojem rezervne hidroizolacije, oplatnih ploča ili slično	0,20
3	Kao pod 2 ali s aluminijskom oblogom ili drugom oblogom s malim stupnjem emisije površine s donje strane krova	0,30
4	Krov obložen s oplatnim pločama i slojem hidroizolacije	0,30

Napomena: Vrijednosti u ovoj tablici uključuju toplinski otpor prirodno ventiliranog prostora tavana i toplinski otpor krovšta s pokrovom. Vanjski otpor prijelaza topline, R_{se} , nije uključen.

Drugi negrijani prostori (npr. garaže, spremišta...)

Ako je uz grijanu zgradu prislonjen manji negrijani zatvoreni prostor, koeficijent prolaska topline između unutarnjeg i vanjskog prostora može se odrediti pojednostavnjenim postupkom tako da se negrijani prostor s njegovim vanjskim građevnim dijelovima promatra kao dodatni homogeni sloj s toplinskim otporom, R_u , koji je dan izrazom:

$$R_u = \frac{A_i}{\sum_k (A_{e,k} \times U_{e,k}) + 0,33 \times n \times V} \quad (4.38)$$

gdje je

- A_i ukupna ploština svih građevnih dijelova zgrade između unutarnjeg prostora i negrijanog prostora, u m^2 ,
 $A_{e,k}$ ploština građevnog dijela k između negrijane prostorije i vanjskog okoliša, u m^2 ,
 $U_{e,k}$ koeficijent prolaska topline građevnog dijela k između negrijane prostorije i vanjskog okoliša, u $W/(m^2 \times K)$,
 n broj izmjena zraka na sat za negrijani prostor, u h^{-1} ,
 V obujam zraka negrijanog prostora, u m^3 .

Zbrajanje iz izraza (4.38) provodi se za sve građevne dijelove između negrijanog prostora i vanjskog okoliša, osim za pod.

Ako se između unutarnjeg i negrijanog prostora nalazi više različitih građevnih dijelova, R_u se pribraja kod proračuna koeficijenta prolaska topline svakog od tih građevnih dijelova.

Ukoliko sastavi vanjskih građevnih dijelova negrijanog prostora nisu poznati, preporuča se koristiti vrijednost $U_{e,k} = 2 \text{ W}/(m^2 \times K)$, a za broj izmjena zraka $n = 3 \text{ h}^{-1}$.

4.2.5 Koeficijent prolaska topline, U , neprozirnog građevnog dijela koji se sastoje od homogenih i nehomogenih slojeva

Građevni dio zgrade prikazan na slici 4.4 sastoji se od toplinski nehomogenih slojeva paralelnih površinama građevnog dijela. Ukupni toplinski otpor, R_T , u $m^2 \times K/W$, ovakvog građevnog dijela može se procijeniti kao srednja aritmetička vrijednost gornje i donje granične vrijednosti toplinskog otpora:

$$R_T = \frac{(R_T' + R_T'')}{2} \quad (4.39)$$

gdje je

- R_T' gornja granica ukupnog toplinskog otpora promatranog nehomogenog građevnog dijela zgrade, u $m^2 \times K/W$,
 R_T'' donja granica ukupnog toplinskog otpora promatranog nehomogenog građevnog dijela zgrade, u $m^2 \times K/W$.

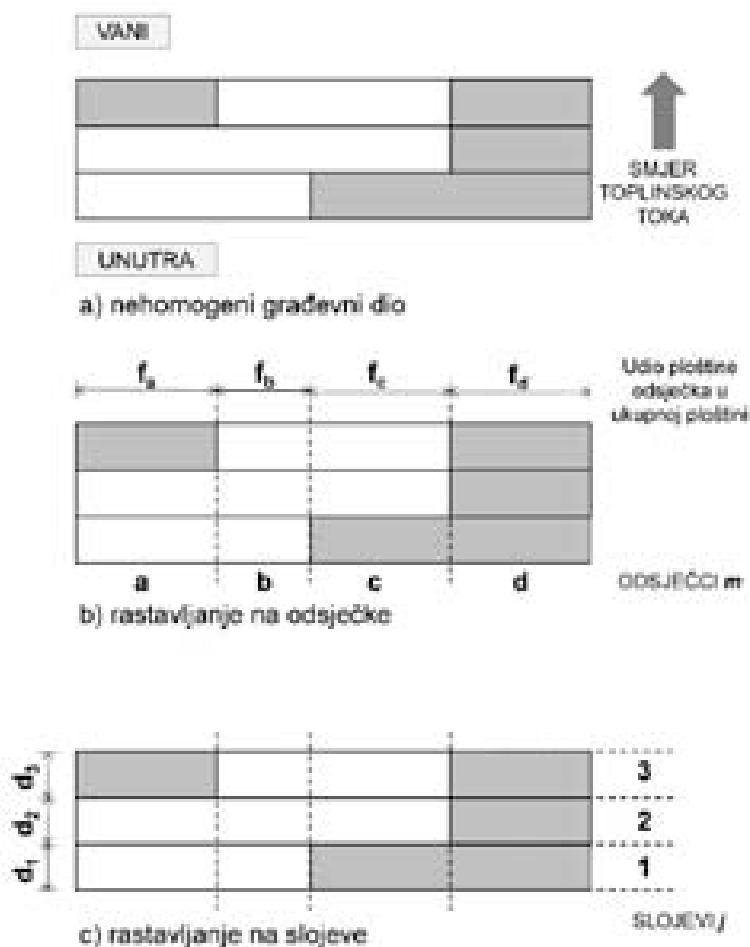
Odatle se dobije procjena koeficijenta prolaska topline, U , u $W/(m^2 \times K)$, promatranog nehomogenog građevnog dijela zgrade:

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (4.40)$$

Najveća moguća pogreška ove aproksimacije ovisi o odnosu gornje granične vrijednosti prema donjoj. Kad je taj omjer veći od 1,5 ova metoda proračuna nije prihvatljiva. Ova metoda proračuna nije prihvatljiva ni u slučajevima kad kroz sloj toplinske izolacije prolaze metalne spojnice (toplinski mostovi). U tom slučaju proračun se provede kao da nema metalnih spojnica, a dobiveni rezultat se ispravi za slučaj ugradnje metalnih spojnica.

U nastavku opisana metoda nije prikladna za proračun površinskih temperatura u svrhu ocjenjivanja rizika površinske kondenzacije vodene pare.

Točniji rezultat proračuna može se dobiti primjenom numeričke metode proračuna u skladu s točkom 4.4.



Slika 4.4 Odsjecci i slojevi građevnog dijela zgrade s toplinski nehomogenim slojevima

Proračun gornje i donje granične vrijednosti toplinskog otpora provodi se tako da se građevni dio zamisli rasječen na odsječke m ($m = a, b, c, \dots, q$) i slojeve j ($j = 1, 2, 3, \dots, n$) na način da se dobije građevni dio podijeljen na toplinski homogene dijelove mj . Svaki odsječak m okomit je na granične površine promatranog građevnog dijela zgrade, ploština njegove površine iznosi A_m , a udio te ploštine u ukupno ploštini građevnog dijela je:

$$f_m = \frac{A_m}{\Sigma A_m} \quad (4.41)$$

Slojevi j paralelni su s graničnim površinama građevnog dijela i debljine su d_j .

Svaki homogeni dio mj ima toplinsku vodljivost λ_{mj} , debljinu d_j (u smjeru toplinskog toka), toplinski otpor R_{mj} i udio u ukupnoj ploštini površine građevnog dijela f_m . Vrijedi da je:

$$f_a + f_b + f_c + \dots + f_q = 1 \quad (4.42)$$

Gornja granica ukupnog toplinskog otpora, R_T' , (najveća moguća vrijednost) određuje se uz pretpostavku jednodimenzionalnog toplinskog toka okomitog na površinu građevnog dijela iz srednje vrijednosti koeficijenta prolaska topline:

$$U_{sr} = \frac{(\Sigma_m U_m \times A_m)}{(\Sigma_m A_m)} = \frac{(U_a \times A_a + U_b \times A_b + \dots + U_q \times A_q)}{(A_a + A_b + \dots + A_q)}$$

Izraženo u toplinskim otporima ta jednadžba dobiva oblik:

$$\frac{1}{R_T'} = \frac{f_a}{R_{Ta}} + \frac{f_b}{R_{Tb}} + \dots + \frac{f_q}{R_{Tq}} \quad (4.43)$$

gdje su

$R_{Ta}, R_{Tb}, \dots, R_{Tq}$ ukupni toplinski otpori, uključivo otpore prijelaza topline, svakog pojedinog odsječka, u $m^2 \times K/W$, proračunati pomoću jednadžbe

$$R_{Tm} = R_{si} + R_{m1} + R_{m2} + \dots + R_{mn} + R_{se} \quad (4.44)$$

$f_a, f_b, \dots, f_q$ udjeli ploštine površine svakog odsječka u ukupnoj ploštini površine građevnog dijela.

Donja granica ukupnog toplinskog otpora, R_T'' , (najmanja moguća vrijednost) određuje se uz pretpostavku da su sve ravnine koje su paralelne s graničnim površinama građevnog dijela izotermne površine. Zato se za svaki toplinski nehomogeni sloj j proračuna ekvivalentni srednji toplinski otpor, R_j , prema izrazu:

$$\frac{1}{R_j} = \frac{f_a}{R_{aj}} + \frac{f_b}{R_{bj}} + \dots + \frac{f_q}{R_{qj}} \quad (4.45)$$

Donja granica toplinskog otpora, R_T'' , promatranog građevnog dijela zgrade tada je određena izrazom:

$$R_T'' = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se} \quad (4.46)$$

Druga mogućnost proračuna, koji daje jednaki rezultat, je pomoću ekvivalentne srednje toplinske vodljivosti sloja:

$$\lambda_j'' = \frac{(\sum_m \lambda_{mj} \times A_m)}{(\sum A_m)} = \frac{(\lambda_{aj} \times A_a + \lambda_{bj} \times A_b + \dots + \lambda_{qj} \times A_q)}{(A_a + A_b + \dots + A_q)}$$

odnosno:

$$\lambda_j'' = \lambda_{aj} \times f_a + \lambda_{bj} \times f_b + \dots + \lambda_{qj} \times f_q \quad (4.47)$$

Tada je:

$$R_j = \frac{d_j}{\lambda_j''} \quad (4.48)$$

gdje je

d_j debljina sloja j , u m,

λ_j'' ekvivalentna toplinska vodljivost materijala sloja j , u $W/(m \times K)$.

Eventualni sloj zraka kao dio nehomogenog sloja promatra se kao materijal ekvivalentne toplinske vodljivosti $\lambda_j'' = d_j / R_g$ gdje je R_g toplinski otpor sloja zraka određen prema točki 4.2.3, a d_j je debljina promatranog sloja.

Najveća relativna pogreška, e , ovog približnog proračuna iznosi u postocima:

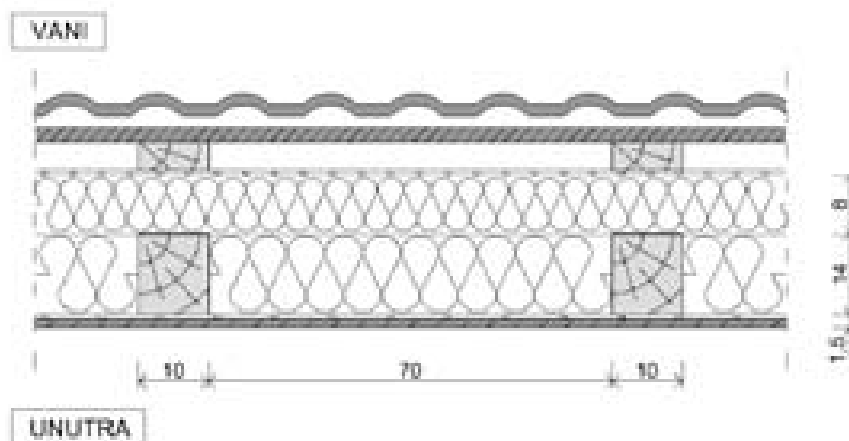
$$e = \frac{100 \times (R_T' - R_T'')}{(2 \times R_T'')} = 100 \times 0,5 \times (R_T' / R_T'' - 1) \quad (4.49)$$

Za $R_T' / R_T'' = 1,5$ najveća moguća pogreška je 25 % stvarne vrijednosti R_T . Ako je odnos veći od 1,5 to znači da su u građevnom dijelu prisutni značajniji toplinski mostovi. Toplinski most je u odsječku koji ima najmanju vrijednost toplinskog otpora R_{Tm} .

Ako se koeficijent prolaska topline, U , nehomogenog građevnog dijela prikazuje kao konačan rezultat mora se zaokružiti na dvije značajne znamenke.

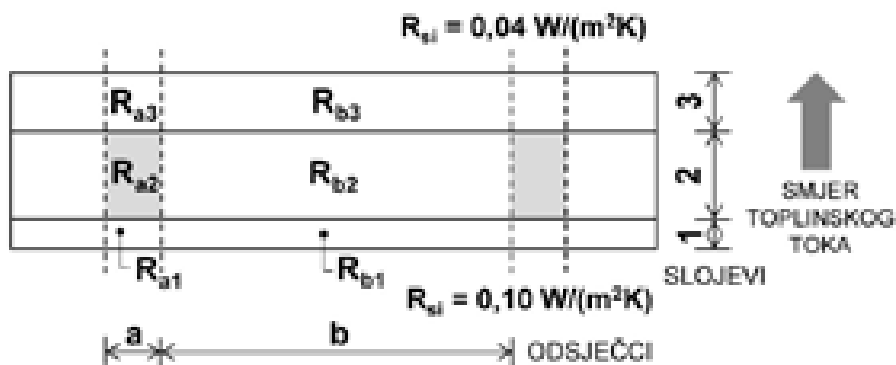
Primjer 4.2

Proračunati koeficijent prolaska topline, U , za kosi krov sastava i dimenzija prikazanih na slici 4.5 i u tablici 4.8.



Slika 4.5 Presjek kroz kosi krov

Parna brana, rezervna hidroizolacija i pokrov ne ulaze u proračun koeficijenta U . Sloj toplinske izolacije između drvenih rogova i rogovi čine nehomogeni sloj. Sloj toplinske izolacije iznad rogova i sloj gipskartonskih ploča ispod rogova su homogeni slojevi. Na slici 4.6 prikazan je proračunski model predmetnog kosog krova.



Slika 4.6 Proračunski model kosog krova na slici 4.5

Tablica 4.8 Sastav kosog krova i proračun toplinskog otpora slojeva

a) Presjek kroz drvene rogove (odsječak a)

Broj sloja	Materijal sloja	Debljina sloja, d m	Toplinska vodljivost, λ $W/(m \times K)$	Toplinski otpor, R $m^2 \times K/W$
1	Gipskartonska ploče	0,015	0,250	0,060
2	Drvo	0,140	0,150	0,933
3	Mineralna vuna	0,080	0,040	2,000

b) Presjek između rogova (odsječak b)

Broj sloja	Materijal sloja	Debljina sloja, d m	Toplinska vodljivost, λ $W/(m \times K)$	Toplinski otpor, R $m^2 \times K/W$
1	Gipskartonska ploče	0,015	0,250	0,060
2	Mineralna vuna	0,140	0,040	3,500
3	Mineralna vuna	0,080	0,040	2,000

Udio ploštine površina odsječaka u ukupnoj ploštini iznosi

$$f_a = 10/80 = 0,125$$

$$f_b = 70/80 = 0,875$$

Ukupni toplinski otpor odsječaka *a* je

$$R_{Ta} = 0,100 + 0,060 + 0,933 + 2,000 + 0,040 = 3,133 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Ukupni toplinski otpor odsječaka *b* je

$$R_{Tb} = 0,100 + 0,060 + 3,500 + 2,000 + 0,040 = 5,700 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Gornja granična vrijednost toplinskog otpora iznosi (jednadžba (4.43))

$$1/R_T' = 0,125/3,133 + 0,875/5,700 = 0,194 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

$$R_T' = 1/0,194 = 5,155 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Za nehomogeni sloj 2 prema jednadžbi (4.45) ekvivalentni toplinski otpor iznosi

$$1/R_2 = 0,125/0,933 + 0,875/3,500 = 0,367 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

$$R_2 = 1/0,367 = 2,728 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Donja granična vrijednost toplinskog otpora, prema jednadžbi (4.46) iznosi

$$R_T'' = 0,100 + 0,060 + 2,728 + 2,000 + 0,040 = 4,928 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Odnos gornje i donje granične vrijednosti je

$$5,155 / 4,928 = 1,05 < 1,5$$

Točnost procjene toplinskog otpora ovom približnom metodom je u prihvatljivim granicama.

Ukupni procijenjeni toplinski otpor kosog krova iznosi (jednadžba (4.39))

$$R_T = (5,155 + 4,928) / 2 = 5,042 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Procijenjeni koeficijent prolaska topline kosog krova je

$$U = 1 / 5,042 = 0,198 \text{ W/(m}^2\text{K)} = 0,20 \text{ W/(m}^2\text{K)}.$$

4.2.6 Ispravljanje plošnog koeficijenta prolaska topline *U*

Kad je to potrebno, koeficijent prolaska topline, *U*, određen prema prethodnim točkama mora se ispraviti kako bi se uzeli u obzir nepovoljni učinci

- zračnih šupljina u sloju toplinske izolacije,
- spojnih elemenata koji prodiru kroz sloj toplinske izolacije,
- oborina na obrnutim krovovima.

Ispravljeni koeficijent prolaska topline, *U_c*, u $\text{W/(m}^2\text{K)}$, određuje se tako da se koeficijentu *U* izračunatom prema prethodnim točkama, doda pribrojnik za ispravljanje ΔU :

$$U_c = U + \Delta U \quad (4.50)$$

ΔU je određen izrazom:

$$\Delta U = \Delta U_g + \Delta U_f + \Delta U_r \quad (4.51)$$

gdje je

ΔU_g ispravak za zračne šupljine, u $\text{W/(m}^2\text{K)}$,

ΔU_f ispravak za spojne elemente (ako je njihov $\lambda \geq 1 \text{ W/(mK)}$), u $\text{W/(m}^2\text{K)}$,

ΔU_r ispravak za obrnute krovove, u $\text{W/(m}^2\text{K)}$.

Ispravak za zračne šupljine

„Zračna šupljina“ je opći naziv za zračne prostore u sloju toplinske izolacije ili između tog sloja i susjednih slojeva građevnog dijela zgrade, koji stvarno postoje u izgrađenim zgradama, a u nacrtima se posebno ne prikazuju. Zračne šupljine mogu biti u smjeru toplinskog toka ili okomite na taj tok. Ovisno o njihovoj veličini, orijentaciji i položaju, one mogu povećati vrijednost koeficijenta prolaska topline povećanjem prijenosa topline zračenjem i strujanjem. S tim u vezi razlikuju se tri razine ispravka navedene u tablici 4.9.

Tablica 4.9 Ispravci za zračne šupljine, (prema [66])

Razina ispravka	Opis zračne šupljine	$\Delta U''$ W/(m ² ×K)
0	Bez zračnih šupljina ili samo manje zračne šupljine u sloju toplinske izolacije (npr. sloj toplinske izolacije bez prekida stupovima, rogovima ili gredama, ili spojevi izolacijskih ploča na preklop ili pero/utor, ili dva sloja toplinske izolacije s izmaknutim spojevima, ili slobodni razmak na spoju izolacijskih ploča manji od 5 mm. U svim gore navedenim slučajevima bez šupljina između izolacijskog sloja i njegove podloge)	0,00
1	Zračni prolazi (pukotine) premošćuju razmak između tople i hladne strane izolacijskog sloja, ali ne uzrokuju strujanje zraka (npr. sloj toplinske izolacije prekinut stupovima, rogovima ili gredama, ili slobodni razmak na spoju izolacijskih ploča veći od 5 mm. U oba gornja slučaja bez šupljina između izolacijskog sloja i njegove podloge).	0,01
2	Zračni prolazi (pukotine) premošćuju razmak između tople i hladne strane izolacijskog sloja, i u kombinaciji sa šupljinama između sloja toplinske izolacije i podloge s tople strane uzrokuju strujanje zraka između tople i hladne strane toplinske izolacije.	0,04

Ispravak za zračne šupljine određuje se pomoću jednadžbe:

$$\Delta U_g = \Delta U'' \times (R_1 / R_T)^2 \quad (4.52)$$

gdje je

R_1 toplinski otpor sloja koji sadrži zračne prolaze (pukotine), u m²×K/W, određen jednadžbom (4.10),

R_T ukupni toplinski otpor promatranog građevnog dijela zgrade zanemarujući sve toplinske mostove, u m²×K/W, određen jednadžbom (4.20)

Ispravak za spojne elemente

Ako kroz toplinsko-izolacijski sloj prodiru spojni elementi, ispravak koeficijenta prolaska topline dan je izrazom:

$$\Delta U_f = \alpha \times (\lambda_f \times A_f \times n_f) / d_0 \times (R_1 / R_T)^2 \quad (4.53)$$

gdje koeficijent α ima vrijednost

$\alpha = 0,8$ ako spojni element potpuno prodire kroz toplinsko-izolacijski sloj, odnosno

$\alpha = 0,8 \times d_1 / d_0$ ako je spojni element upušten (vidjeti sliku 4.7)

U izrazu (4.54) je

λ_f toplinska vodljivost materijala spojnog elementa, u W/(m×K),

A_f ploština poprečnog presjeka jednog spojnog elementa, u m²,

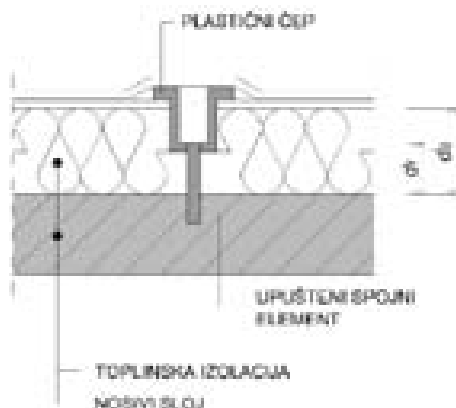
n_f broj spojnih elemenata po metru kvadratnom,

d_0 debljina toplinsko-izolacijskog sloja u kojem je spojni element, u m,

d_1 duljina spojnog elementa unutar toplinsko-izolacijskog sloja, u m, (d_1 može biti veći od d_0 ako spojni element prolazi kroz izolacijski sloj pod kutom),

R_1 toplinski otpor toplinsko-izolacijskog sloja kroz koji prodire spojni element, u m²×K/W, određen jednadžbom (4.10),

R_T ukupni toplinski otpor promatranog građevnog dijela zgrade zanemarujući sve toplinske mostove, u m²×K/W, određen jednadžbom (4.20)



Slika 4.7 Upušteni spojni element

Navedena približna procjena ispravka za spojne elemente ne vrijedi za metalne spojne elemente koji su na oba svoja kraja u izravnom toplinskom dodiru s metalnim pločama. U tom se slučaju može koristiti metoda proračuna toplinskih mostova iz HRN EN ISO 10211 [70] (vidjeti točku 4.4).

Ispravak za obrnute krovove

Obrnuti krov je krov kod kojeg je sloj toplinske izolacije iznad sloja hidroizolacije. Ovaj ispravak potreban je da bi se uzelo u obzir djelovanje kiše koja teče između toplinsko-izolacijskog sloja i sloja hidroizolacije i rashlađuje krov. Postupak opisan u nastavku vrijedi samo za toplinsko-izolacijski sloj od ekstrudiranog polistirena (XPS). Postupak se odnosi samo na grijane zgrade (za hladene zgrade ispravak se ne primjenjuje).

Ispravak za obrnuti krov, ΔU_r , kojim se uzima u obzir dodatni toplinski gubitak prouzročen kišom koja teče kroz spojeve u sloju toplinske izolacije i stiže do sloja hidroizolacije, proračunava se prema izrazu:

$$\Delta U_r = p \times f \times x \times (R_1 / R_T)^2 \quad (4.54)$$

gdje je

- p srednja vrijednost količine oborina tijekom sezone grijanja, temeljena na meteorološkim podacima koji se odnose na promatranu lokaciju zgrade, u mm/dan,
- f faktor otjecanja koji daje dio vrijednosti p koja stiže do hidroizolacijskog sloja,
- x faktor povećanja toplinskog gubitka prouzročenog tečenjem kiše po hidroizolacijskom sloju, u $(W \times \text{dan}) / (m^2 \times K \times \text{mm})$,
- R_1 toplinski otpor toplinsko-izolacijskog sloja iznad sloja hidroizolacije, u $m^2 \times K/W$, određen jednadžbom (4.10),
- R_T ukupni toplinski otpor promatranog krova zanemarujući sve toplinske mostove, izražen u $m^2 \times K/W$, određen jednadžbom (4.20).

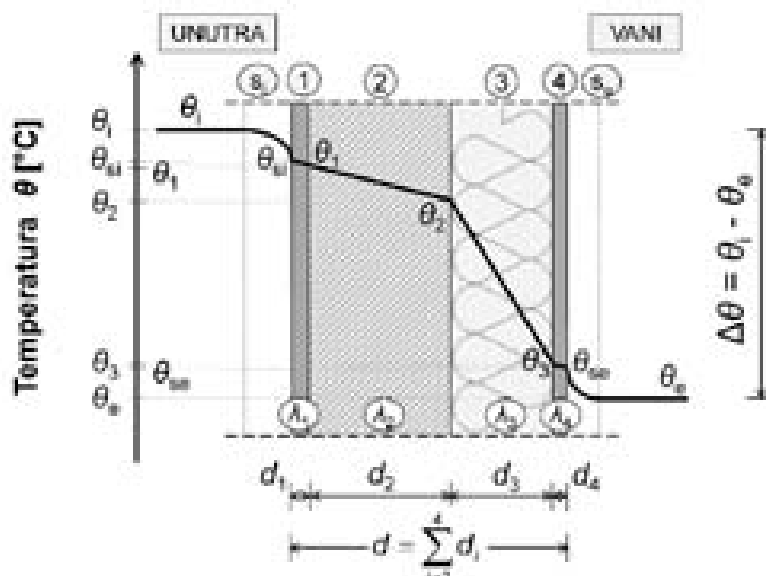
Kada se iznad hidroizolacije nalazi samo jedan sloj toplinsko-izolacijskog materijala, s toplinsko-izolacijskim pločama koje se sučeljavaju te s pokrovnim slojem od materijala koji je otvoren za oborine (kao npr. šljunak) uzima se da je $f \times x = 0,04$. Za opisani sklop ravnog krova smatra se da daje najveći ΔU . Manju vrijednost $f \times x$ imaju krovovi kod kojih manje oborina prodire kroz toplinsko-izolacijski sloj (npr. kad su izolacijske ploče spojene na pero i utor).

4.2.7 Temperaturna krivulja

Za ocjenu toplinskih svojstava građevnog dijela zgrade često je potrebno poznavati temperature graničnih površina i bilo koje ravnine unutar građevnog dijela, kada su poznate temperature zraka s obje njegove strane. Za ravni građevni dio sastavljen od paralelnih

slojeva od homogenog materijala dovoljno je odrediti temperature u ravninama spajanja pojedinih slojeva. Unutar sloja od homogenog materijala temperatura se mijenja linearno.

Temperaturna krivulja je krivulja koja u crtežu poprečnog presjeka građevnog dijela zgrade prikazuje temperaturu svake točke (ravnine) presjeka građevnog dijela za stacionarni toplinski tok (vidjeti sliku 4.8).



Slika 4.8 Presjek vanjskog višeslojnog zida s ucrtanom temperaturnom krivuljom, za stacionarne uvjete

Analitička metoda određivanja temperaturne krivulje

Temperaturna krivulja daje se relativno jednostavno računski odrediti pomoću gustoće toplinskog toka, q . U stacionarnim uvjetima gustoća toplinskog toka kroz građevni dio zgrade konstantna je bez obzira koji se njegov dio promatra. Može se, dakle, pisati u skladu s jednačinom (2.30):

$$q = \frac{(\theta_i - \theta_e)}{R_T} = \frac{(\theta_i - \theta_{si})}{R_{si}} = \frac{(\theta_{si} - \theta_1)}{R_1} = \dots = \frac{(\theta_{se} - \theta_e)}{R_{se}} \quad (4.55)$$

gdje je

q gustoća toplinskog toka kroz građevni dio zgrade, u W/m^2 ,

θ_i temperatura unutarnjeg zraka, u $^{\circ}C$,

θ_e temperatura vanjskog zraka, u $^{\circ}C$,

θ_{si} temperatura unutarnje površine građevnog dijela, u $^{\circ}C$,

θ_{se} temperatura vanjske površine građevnog dijela, u $^{\circ}C$,

θ_1 temperatura razdjelne ravnine nakon prvog sloja višeslojnog građevnog dijela, gledano u smjeru toplinskog toka (granična površina između prvog i drugog sloja), u $^{\circ}C$,

θ_2 temperatura razdjelne ravnine nakon drugog sloja višeslojnog građevnog dijela, gledano u smjeru toplinskog toka (granična površina između drugog i trećeg sloja), u $^{\circ}C$, itd.,

R_1 toplinski otpor prvog sloja, u $m^2 \times K/W$,

R_2 toplinski otpor drugog sloja, u $m^2 \times K/W$, itd.

R_T ukupni toplinski otpor građevnog dijela zgrade, u $m^2 \times K/W$.

Kombinirajući pojedine izraze iz jednačbe (4.55) mogu se temperature na površinama građevnog dijela i temperature razdjelnih površina između pojedinih slojeva odrediti iz sljedećih jednačbi:

$$\begin{aligned}\theta_{si} &= \theta_i - q \times R_{si} \\ \theta_1 &= \theta_{si} - q \times R_1 \\ \theta_2 &= \theta_1 - q \times R_2 \\ \theta_{se} &= \theta_{n-1} - q \times R_n\end{aligned}\quad (4.56)$$

gdje je

$$q = \frac{(\theta_i - \theta_e)}{R_T} \quad (4.57)$$

Iz izraza (4.56) slijedi da je pad temperature $\Delta\theta_j$ u j -tom sloju građevnog dijela dan izrazom:

$$\Delta\theta_j = q \times R_j \quad (4.58)$$

gdje je R_j toplinski otpor j -tog sloja.

Općenito je temperatura u dubini x , gledano od unutarnje površine građevnog dijela, dana jednačbom pravca:

$$\theta(x) = \theta_i - q \times R_x = \theta_i - q \times (R_{si} + \sum_{j=0}^x R_j) \quad (4.59)$$

Ako u crtežu poprečnog presjeka građevnog dijela u nekom mjerilu nanesimo proračunate temperature na granicama pojedinih slojeva i sukcesivno ih spojimo pravcima, dobiti ćemo temperaturnu krivulju (vidjeti sliku 4.8).

Primjer 4.3

Proračunati i nacrtati temperaturnu krivulju vanjskog zida od armiranog betona s toplinsko-izolacijskim slojem s vanjske strane. Sastav zida, debljina slojeva, d , i toplinska vodljivost materijala slojeva, λ , vidljivi su iz tablice 4.10. Temperatura unutarnjeg zraka je $\theta_i = 20^\circ\text{C}$, a vanjskog zraka $\theta_e = -10^\circ\text{C}$.

Tablica 4.10 Sastav vanjskog zida i proračun toplinskih otpora

Broj sloja	Materijal sloja	d m	λ W/(m×K)	R m ² ×K/W
	R_{si}			0,130
1	Armirani beton	0,200	2,600	0,077
2	Toplinska izolacija	0,100	0,040	2,500
3	Zaštitna žbuka	0,004	0,700	0,006
	R_{se}			0,040
	Ukupni toplinski otpor, R_T			2,753

Prema jednačbi (4.57) gustoća toplinskog toka iznosi:

$$q = \frac{(20 - (-10))}{2,753} = 10,897 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

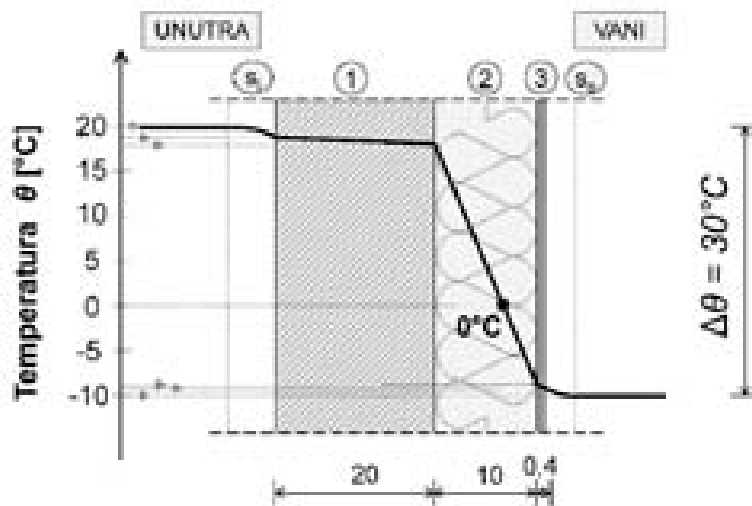
Tražene temperature su:

$$\theta_i = 20^\circ\text{C}$$

$$\theta_{si} = 20 - 10,897 \times 0,13 = 18,6^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned}\theta_1 &= 18,6 - 10,897 \times 0,077 = 17,8 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ \theta_2 &= 17,8 - 10,897 \times 2,500 = -9,4 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ \theta_{se} &= -9,4 - 10,897 \times 0,006 = -9,5 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ \theta_e &= -9,5 - 10,897 \times 0,040 = -10,0 \text{ }^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

Na slici 4.9 nacrtana je temperaturna krivulja za predmetni vanjski zid.



Slika 4.9 Presjek vanjskog zida s ucrtanom temperaturnom krivuljom

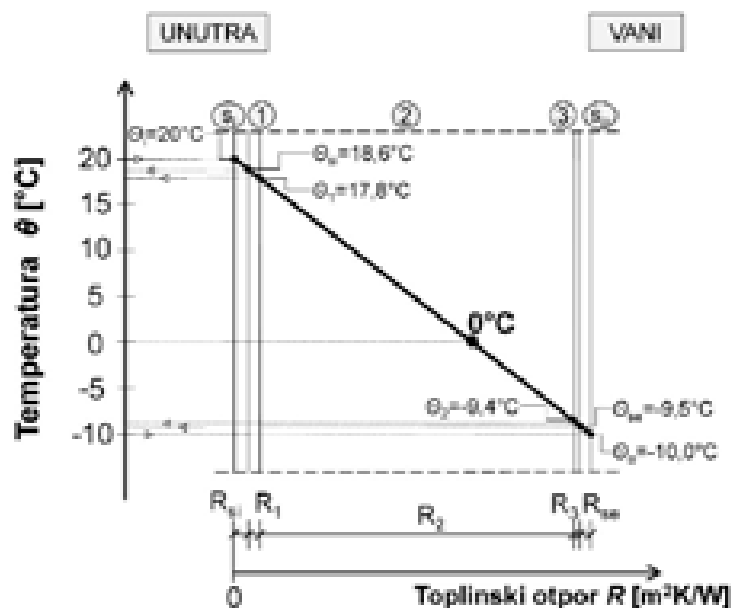
Grafička metoda određivanja temperaturne krivulje

Budući da je pad temperature proporcionalan toplinskom otporu, temperaturna krivulja može se jednostavno odrediti grafičkim putem. U tu se svrhu na apscisu pravokutnog koordinatnog sustava nanese toplinski otpori pojedinih slojeva uključivo i otpore prijelaza topline istim redoslijedom kojim slijede slojevi u promatranom građevnom dijelu. Kroz granične točke povuku se vertikalno pravci. Dobiveni crtež predstavlja presjek promatranog građevnog dijela nacrtan u mjerilu toplinskih otpora njegovih slojeva. Zatim se na ordinatu koordinatnog sustava nanese odsječak temperaturne skale između vrijednosti temperature unutarnjeg i vanjskog zraka te se iste vrijednosti prenesu u crtež poprečnog presjeka. Pravac koji spaja ovako dobivene granične točke predstavlja temperaturnu krivulju pomoću koje se sada može za svaku ravninu paralelnu graničnim površinama građevnog dijela očitati pripadna temperatura (vidjeti sliku 4.10)

Primjer 4.4

Za vanjski zid iz primjera 4.3 odrediti temperaturnu krivulju grafičkim putem.

Na horizontalnu os nanese redom toplinske otpore iz tablice 4.10 radi crtanja poprečnog presjeka zida u mjerilu toplinskog otpora. Unošenjem u presjek temperature unutarnjeg i vanjskog zraka dobije se temperaturna krivulja, prikazana na slici 4.10. Za granične ravnine između pojedinih slojeva očita se pripadna temperatura s temperaturne skale.



Slika 4.10 Grafičko određivanje temperaturne krivulje

4.3 Ponašanje građevnih dijelova zgrade u odnosu na vodu

4.3.1 Uvod

U svakodnevnom govoru, za vodu u različitom agregatnom stanju koriste se i različiti nazivi. Tako se voda u čvrstom stanju naziva led, u tekućem stanju voda, a u plinovitom stanju vodena para. Uvijek se, međutim, radi o istoj tvari, o vodi, koja je kemijski spoj dva atoma vodika i jednog atoma kisika (kemijska formula H_2O) i koja se kemijski ne mijenja s promjenom agregatnog stanja.

Uobičajeni naziv za vodu sadržanu u građevnom materijalu i u zraku je **vlaga** ili **vlažnost**. Neki autori naziv vlažnost koriste samo za količinu vodene pare u zraku, a količinu vode u krutim tvarima nazivaju **mokrina**.

Većina građevnih materijala nikada nije potpuno suha već uvijek u svojim porama sadrži veću ili manju količinu slobodne vode. U materijal građevnih dijelova zgrade voda može dospjeti na različite načine. Građevni dijelovi zgrade trajno su izloženi promjenjivim rubnim uvjetima u pogledu vlage, koja na njih djeluje kao tekućina, kao kondenzat ili vlažnost zraka. S vanjske strane zgrade djeluju:

- vodena para u vanjskom zraku,
- oborinska voda (kiša, snijeg,...),
- vlaga u tlu, procjedna voda, podzemna voda, nakupljena voda pod tlakom.

Iz prostora zgrade na građevne dijelove djeluju:

- vodena para u zraku koja je posljedica sušenja građevinske vlage kod novogradnji,
- vodena para u zraku koja je posljedica korištenja prostora zgrade (kuhanje, pranje, sušenje rublja,...),
- kondenzirana voda na površini ili unutar građevnog dijela kada se ispune fizikalni uvjeti za kondenzaciju vodene pare,
- voda koja se izliva u vlažnim prostorijama (kupaonica, kuhinja).

Različita djelovanja vlage na građevne dijelove zgrade u pravilu se superponiraju. Ukupna slobodna voda u građevnom materijalu može značajno utjecati na važna fizikalna svojstva materijala kao što su to toplinska i mehanička svojstva. Velika količina slobodne vode u materijalu građevnog dijela zgrade često ima za posljedicu nastajanje građevinske štete. O

vlažnosti zgrade bitno ovisi i ugodnost boravka u zgradi te zdravlje njenih korisnika. Poznavanje međusobnog djelovanja vode i zgrade je stoga od velikog značaja za bolju prevenciju svih rizika u vezi s vlagom. Potrebna je odgovarajuća zaštita zgrade protiv djelovanja vode, kako bi se osigurala trajnost tijela zgrade i higijenska klima u prostoru zgrade.

4.3.2 Svojstva vlažnog zraka

Zrak većinom nije suh već sadrži u sebi vodu u obliku nevidljive vodene pare. Smjesu suhog zraka i vodene pare nazivamo vlažan zrak. Zrak može primiti u sebe samo ograničenu količinu vodene pare tj. dok ne postane zasićen vodenom parom. Zrak zasićen vodenom parom sadrži najveću moguću količinu vodene pare. Eventualna dodatna količina vlage u zasićenom vlažnom zraku može se pojaviti samo u tekućem stanju.

Najveći mogući sadržaj vodene pare u zraku ovisi o temperaturi zraka. Što je temperatura zraka viša on može primiti veću količinu vlage. Svakoj temperaturi zraka odgovara, dakle, jedna najveća moguća količina vodene pare koju zrak te temperature može sadržavati.

Zrak najčešće sadrži manju količinu vlage od najveće moguće. U tom slučaju zrak nije zasićen tj. mogao bi primiti još vlage dok ne bi postao zasićen vodenom parom.

Primjer 4.5

Zrak temperature 20 °C sadrži 12 g vodene pare po m³ obujma. Koliko se još vodene pare može dovesti u svaki m³ tog zraka?

Svaki m³ zraka temperature 20 °C sadrži u zasićenom stanju 17,3 g vodene pare. To je najveća količina vodene pare koju zrak te temperature može sadržavati. Ako zrak temperature 20 °C ne sadrži 17,3 g već samo 12 g vodene pare po m³ zraka, tada on nije zasićen i mogao bi primiti još vodene pare 17,3 – 12,0 = 5,3 g/m³.

Sadržaj vodene pare u zraku određuje vlažnost zraka. Masu vodene pare sadržane u jedinici obujma zraka nazivamo **apsolutna vlažnost zraka** (obujamska vlažnost zraka), simbol v . Izražava se u kg/m³. Za **obujamsku vlažnost zraka kod zasićenja** koristi se simbol v_{sat} . **Obujamska vlažnost zraka** ima isto značenje kao parcijalna gustoća vodene pare u zraku, ρ_v . Za parcijalnu gustoću vodene pare kod zasićenja zraka koristi se simbol $\rho_{v,\text{sat}}$.

Sadržaj vodene pare u zraku može se izraziti i kao **masena vlažnost zraka**, simbol x . To je masa vodene pare podijeljena masom suhog zraka s kojim je para pomiješana u vlažan zrak. Izražava se u kg vodene pare po kg suhog zraka. Kad je zrak zasićen vodenom parom koristi se simbol x_{sat} .

Omjer apsolutne vlažnosti zraka, v , i najveće moguće količine vodene pare, v_{sat} , koju bi zrak pri istoj temperaturi sadržavao kad bi bio potpuno zasićen vodenom parom, nazivamo **relativna vlažnost zraka** i označavamo grčkim slovom φ :

$$\varphi = \frac{v}{v_{\text{sat}}} \quad (4.60)$$

Relativnu vlažnost zraka obično izražavamo u postocima pa je:

$$\varphi = \frac{100 \times v}{v_{\text{sat}}} \% \quad (4.61)$$

Primjer 4.6

Kolika je relativna vlažnost zraka iz primjera 4.5?

Zrak temperature 20 °C s apsolutnom vlažnosti 12 g/m³ ima relativnu vlažnost:

$$\varphi = \frac{12}{17,3} = 0,7 \text{ ili } 70 \%$$

To znači da taj zrak sadrži samo 70 % od najvećeg mogućeg sadržaja vlage.

Ako se nezasićeni zrak počne postepeno hladiti, njegova relativna vlažnost postajati će sve veća (apsolutna vlažnost ostati će ista) jer se za zrak nižih temperatura smanjuje vrijednost najvećeg mogućeg sadržaja vodene pare tj. smanjuje se nazivnik u izrazu (4.60). Zato se u procesu hlađenja zraka uvijek dolazi do temperature pri kojoj vlažan zrak postaje zasićen vodenom parom. Ako bi taj zrak još više ohladili, suvišak vodene pare morao bi prijeći u tekuće stanje tj. u sitne kapljice koje vidimo kao maglu ili oblak. Suvišak vodene pare u zraku se kondenzira. Graničnu temperaturu zraka kod koje relativna vlažnost zraka u procesu njegova hlađenja, postiže vrijednost $\varphi = 1$ odnosno $\varphi = 100\%$, nazivamo **temperatura rošnja** ili **rosište**, θ_{dp} . U gore promatranom primjeru zraka temperature $\theta_i = 20^\circ\text{C}$ s apsolutnom vlažnosti $v_i = 12\text{ g/m}^3$ rosište iznosi oko $\theta_{dp} = 14^\circ\text{C}$. U prilogu 4.1 dane su temperature rosišta za vodenu paru u zraku u ovisnosti o temperaturi i relativnoj vlažnosti zraka.

U građevinskoj fizici je uobičajeno količinu vodene pare u zraku navoditi kao njen parcijalni tlak. **Parcijalni tlak vodene pare**, p_v , je tlak (vrlo malen) kojim vodena para u zraku sudjeluje u ukupnom atmosferskom tlaku koji iznosi oko $100\,000\text{ Pa} = 100\text{ kN/m}^2$. Atmosferski tlak jednak je zbroju parcijalnog tlaka suhog zraka (to je zbroj parcijalnih tlakova plinova od kojih je zrak sastavljen) i parcijalnog tlaka vodene pare.

Za rješavanje praktičkih zadataka u području graditeljstva može se s dovoljnom točností prihvatiti da je zrak „idealni“ plin (plin koji se sastoji od potpuno elastičnih molekula među kojima ne djeluju privlačne sile). To znači da postoji proporcionalnost između parcijalnog tlaka vodene pare, p_v , i apsolutne vlažnosti zraka, v , poznata kao jednadžba stanja idealnog plina:

$$p_v = v \times \text{konst.} \quad (4.62)$$

Ovdje je $\text{konst} = R_v \times T$, gdje je $R_v = 461,5$ u $\text{J}/(\text{kg} \times \text{K})$ odnosno $\text{Pa} \times \text{m}^3/(\text{kg} \times \text{K})$ specifična plinska konstanta vode, a T je termodinamička temperatura zraka u kelvinima.

Svakoj apsolutnoj vlažnosti zraka, v , odgovara, dakle, jedan parcijalni tlak vodene pare, p_v . Za određenu temperaturu, najvećem mogućem sadržaju vodene pare u zraku, v_{sat} , (zrak zasićen vodenom parom) odgovara **tlak zasićene vodene pare**, $p_{v,sat}$. To je najveća vrijednost koju može postići parcijalni tlak vodene pare na toj temperaturi. Relativna vlažnost zraka, φ , može se izraziti i kao omjer parcijalnog tlaka vodene pare, p_v , u mješavini zraka i vodene pare i tlaka zasićene vodene pare pri istoj temperaturi:

$$\varphi = \frac{p_v}{p_{v,sat}} \quad (4.63)$$

ili izraženo u postocima:

$$\varphi = 100 \times \frac{p_v}{p_{v,sat}} \% \quad (4.64)$$

Indeks v iz simbola za tlak vodene pare može se izostaviti kad je iz konteksta jasno da se radi o vodenoj pari.

Ovisnost tlaka zasićene vodene pare, p_{sat} , o temperaturi zraka, θ , dana je slijedećim izrazima:

$$p_{sat} = 610,5 \times \exp \left[\frac{17\,269 \times \theta}{(2\,37,3 + \theta)} \right] \quad \text{za } \theta \geq 0^\circ\text{C} \quad (4.65)$$

$$p_{sat} = 610,5 \times \exp \left[\frac{21\,875 \times \theta}{(2\,65,5 + \theta)} \right] \quad \text{za } \theta < 0^\circ\text{C} \quad (4.66)$$

Ako se gornje jednadžbe riješe po temperaturi može se izračunati odgovarajuća temperatura za bilo koji tlak zasićene vodene pare:

$$\theta = \frac{\left[237,3 \times \ln \left(\frac{p_{sat}}{610,5} \right) \right]}{\left[17,269 - \ln \left(\frac{p_{sat}}{610,5} \right) \right]} \quad \text{za } p_{sat} \geq 610,5\text{ Pa} \quad (4.67)$$

$$\theta = \frac{\left[265,5 \times \ln \left(\frac{p_{\text{sat}}}{610,5} \right) \right]}{\left[21,875 - \ln \left(\frac{p_{\text{sat}}}{610,5} \right) \right]} \quad \text{za } p_{\text{sat}} < 610,5 \text{ Pa} \quad (4.68)$$

U gornjim jednadžbama tlak vodene pare je izražen u Pa, a temperatura u °C.

U prilogu 4.2 dane su odgovarajuće vrijednosti tlaka zasićene vodene pare i obujamske vlažnosti zraka kod zasićenja, za vrijednosti temperature zraka od -20 °C do +40 °C.

4.3.3 Izbjegavanje kritične vlažnosti na površini građevnog dijela zgrade

Kritična vlažnost na površini građevnog dijela zgrade je najmanja vrijednost relativne vlažnosti zraka na površini građevnog dijela od koje treba računati s oštećenjem te površine (npr. rast plijesni, korozija materijala,...). Za površinu sa strane prostorije kritična vlažnost zraka na površini označava se s $\varphi_{\text{si,cr}}$, i iznosi:

a) *za nastajanje kondenzata: $\varphi_{\text{si,cr}} = 1,0$.*

Kondenzacija je prijelaz tvari iz plinovitog u tekuće agregatno stanje. Tako nastalu tekućinu nazivamo **kondenzat**. Kondenzacija vodene pare na površini građevnog dijela može biti uzrok raznih oštećenja nedovoljno zaštićenih građevnih materijala osjetljivih na vlagu. Kondenzacija na površini može biti prihvatljiva samo privremeno i u manjoj količini na površinama koje ne upijaju vlagu (npr. prozori, keramičke pločice u kupaonici,...) ili kad su poduzete odgovarajuće tehničke mjere kojima se sprječava izravan dodir kondenzirane vode sa susjednim materijalima osjetljivim na vlagu.

b) *za rast plijesni: $\varphi_{\text{si,cr}} = 0,8$.*

Na unutarnjoj površini vanjskog građevnog dijela zgrade plijesan se razvija ako je ta površina dovoljno vlažna i ako postoji dovoljno hranjivih tvari (dovoljan je tanki sloj kućne prašine). Plijesan u prostoriji može uzrokovati zdravstvene probleme njenim korisnicima jer proizvodi alergene (tvari koje uzrokuju alergijske reakcije). Istraživanjima ove pojave je utvrđeno da za rast plijesni nije nužna voda u obliku kondenziranih kapljica, nego da se plijesan može razvijati već kad je relativna vlažnost zraka na površini građevnog dijela, kroz duže razdoblje (par tjedana), veća od 80 %.

c) *za koroziju građevnih materijala: $\varphi_{\text{si,cr}}$ ovisi o vrsti materijala.*

Primjerice za neke metale korozija počinje već kod $\varphi_{\text{si,cr}} = 0,6$.

Zgrade moraju biti tako projektirane i izgrađene da se uz uvjet njihova prikladnog korištenja izbjegne kritična vlažnosti zraka na površini toplinske ovojnice zgrade sa strane prostorije, čime se:

- osigurava zdrava i ugodna mikroklima za korisnike zgrade,
- čuvaju građevni dijelovi zgrade od prekomjernog navlaženja,
- izbjegavaju građevinske štete, npr. od korozije ili razvoja plijesni.

Vlažnost zraka na unutarnjoj površini građevnog dijela iz toplinske ovojnice zgrade ovisi o temperaturi i vlažnosti unutarnjeg i vanjskog zraka te o „toplinskoj kvaliteti“ svakog građevnog dijela ovojnice zgrade (toplinskom otporu R_T , odnosno koeficijentu U , otporu unutarnjeg prijelaza topline R_{si} te postojanju toplinskih mostova). Temperatura i vlažnost unutarnjeg zraka određeni su bitno namjenom zgrade, a temperatura i vlažnost vanjskog zraka lokacijom zgrade.

Da bi se spriječila kondenzacija vodene pare na unutarnjoj površini vanjskog građevnog dijela zgrade, njegovu toplinsku izolaciju treba tako dimenzionirati, da se pod danim uvjetima temperature i vlažnosti unutarnjeg i vanjskog zraka, temperatura unutarnje površine građevnog dijela ne spusti ispod temperature rođenja unutarnjeg zraka. Da bi se pak

spriječio rast plijesni na unutarnjoj površini vanjskog građevnog dijela zgrade, njegovu toplinsku izolaciju treba tako dimenzionirati, da se pod danim uvjetima temperature i vlažnosti unutarnjeg i vanjskog zraka, temperatura unutarnje površine građevnog dijela ne spusti ispod temperature kod koje unutarnji zrak postiže relativnu vlažnost $\varphi_{si,cr} = 0,8$ (za rizike drugih vrsta oštećenja, $\varphi_{si,cr}$ će imati neku drugu vrijednost).

Najmanja potrebna toplinska izolacija građevnog dijela zgrade kojom se izbjegava kritična vlažnost na površini građevnog dijela sa strane prostorije, proizlazi iz najniže dopuštene vrijednosti temperature površine toplinske ovojnice zgrade s unutarnje strane, $\theta_{si,min}$, koja se dobije iz rubnih uvjeta klime u prostoru zgrade, prema izrazu:

$$p_{sat}(\theta_{si,min}) = \frac{p_i}{\varphi_{si,cr}} = \left(\frac{\varphi_i}{\varphi_{si,cr}} \right) \times p_{sat}(\theta_i) \quad (4.69)$$

odakle se odredi $\theta_{si,min}$ pomoću jednadžbe (4.68).

Simboli u jednadžbi (4.69) znače:

- $\theta_{si,min}$ najniža dopuštena vrijednost temperature površine sa strane prostorije kojom se izbjegava oštećenje površine djelovanjem vlage, u °C,
- $p_{sat}(\theta_{si,min}) = p_{sat,si}$ tlak zasićene vodene pare za najnižu dopuštenu temperaturu površine sa strane prostorije, u Pa,
- $p_{sat}(\theta_i) = p_{sat,i}$ tlak zasićene vodene pare u zraku prostorije, u Pa,
- p_i parcijalni tlak vodene pare u zraku prostorije, u Pa,
- φ_i relativna vlažnost zraka u prostoriji, veličina bez dimenzija,
- $\varphi_{si,cr}$ kritična vlažnost na površini građevnog dijela sa strane prostorije, veličina bez dimenzija.

Temperatura unutarnje površine građevnog dijela zgrade ovisi o temperaturi s vanjske strane građevnog dijela, zatim o otporu unutarnjeg prijelaza topline i o ukupnom toplinskom otporu građevnog dijela. U tipičnom presjeku vanjskog građevnog dijela zgrade („neporemećeno“ područje), temperatura unutarnje površine vanjskog građevnog dijela, θ_{si} , dana je izrazom:

$$\theta_{si} = \theta_i - \frac{R_{si} \times (\theta_i - \theta_e)}{R_T} \quad (4.70)$$

odnosno:

$$\theta_{si} = \theta_i - R_{si} \times U \times (\theta_i - \theta_e) \quad (4.71)$$

Kod proračuna površinske temperature radi ocjene rizika kondenzacije vodene pare i rizika rasta plijesni treba koristiti otpore prijelaza topline iz tablice 4.11.

Tablica 4.11 Otpori prijelaza topline kod ocjene opasnosti kondenzacije i rasta plijesni, (prema [67])

Vrsta otpora prijelaza topline		Vrijednost otpora prijelaza topline m ² ×K/W
Otpor vanjskog prijelaza topline, R_{se}		0,04
Otpor unutarnjeg prijelaza topline, R_{si} :		
• na ostakljenju i okvirima prozora	prema gore	0,10
	horizontalno	0,13
	prema dole	0,17
• sve druge površine sa strane prostorije		0,25

Unutarnji otpor prijelaza topline u iznosu od $0,25 \text{ m}^2 \times \text{K/W}$ uzima se kao najnepovoljniji slučaj rizika od kondenzacije vodene pare koji se javlja u kutovima između pojedinih građevnih dijelova ovojnice zgrade, iza namještaja, zavjesa i sl.

Da bi se spriječila kritična vlažnost na površini građevnog dijela, površinska temperatura mora biti veća od odgovarajuće najniže dopuštene vrijednosti, $\theta_{si,min}$, tj. treba zadovoljiti uvjet:

$$\theta_{si} > \theta_{si,min} \quad (4.72)$$

što zahtjeva ukupni toplinski otpor građevnog dijela:

$$R_T > R_{si} \times \frac{(\theta_i - \theta_e)}{(\theta_i - \theta_{si,min})} \quad (4.73)$$

ili

$$U < \frac{(\theta_i - \theta_{si,min})}{R_{si} \times (\theta_i - \theta_e)} \quad (4.74)$$

U gornjim izrazima je

θ_i temperatura unutarnjeg zraka, u $^{\circ}\text{C}$,

θ_e temperatura vanjskog zraka, u $^{\circ}\text{C}$,

$\theta_{si,min}$ najniža dopuštena vrijednost temperature površine sa strane prostorije kojom se izbjegava oštećenje površine djelovanjem vlage, u $^{\circ}\text{C}$,

R_{si} otpor unutarnjeg prijelaza topline, u $\text{m}^2 \times \text{K/W}$,

R_T najmanji potrební ukupni toplinski otpor građevnog dijela zgrade, kojim se izbjegava kritična vlažnost na površini građevnog dijela sa strane prostorije, u $\text{m}^2 \times \text{K/W}$,

U najveća dopuštena vrijednost koeficijenta prolaska topline građevnog dijela zgrade, kojom se izbjegava kritična vlažnost na površini građevnog dijela sa strane prostorije, u $\text{W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$.

Ponekad nas interesira temperatura vanjskog zraka kod koje započinje kondenzacija vodene pare na unutarnjoj površini vanjskog građevnog dijela zgrade poznatog otpora prolasku topline, R_T . U tom slučaju se nejednadžba (4.74) riješi po nepoznatoj temperaturi vanjskog zraka, θ_e . Površinska kondenzacija započinje kada je temperatura vanjskog zraka:

$$\theta_e < \theta_i - \frac{R_T \times (\theta_i - \theta_{dp})}{R_{si}} \quad (4.75)$$

gdje je θ_{dp} temperatura rošnja unutarnjeg zraka, u $^{\circ}\text{C}$.

Primjer 4.7

Odrediti potrebni ukupni otpor prolasku topline vanjskog zida industrijske hale s temperaturom unutarnjeg zraka $\theta_i = 22^{\circ}\text{C}$ i relativnom vlažnosti zraka $\varphi = 80\%$, tako da kod temperature vanjskog zraka $\theta_e = -10^{\circ}\text{C}$ ne dođe do kondenzacije vodene pare na unutarnjoj površini zida. Otpor unutarnjeg prijelaza topline iznosi $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2 \times \text{K/W}$.

Za zadanu temperaturu i vlažnost unutarnjeg zraka temperatura rošnja iznosi $\theta_{dp} = 18,4^{\circ}\text{C}$ (vidjeti tablicu u prilogu 4.1). Prema izrazu (4.74) traženi toplinski otpor je:

$$R_T > 0,13 \times (22 - (-10)) / (22 - 18,4)$$

$$R_T > 1,11 \text{ m}^2 \times \text{K/W}$$

Današnjom razinom toplinske izolacije zgrade koja je uvjetovana razlozima štednje energije i zaštite okoliša, rizik pojave kondenzacije vodene pare i rizik razvoja plijesni na unutarnjim površinama građevnih dijelova iz toplinske ovojnice zgrade je relativno malen. Potencijalno kritična područja za nastajanje kondenzata ili razvoj plijesni su toplinski mostovi jer je na njima površinska temperatura niža nego u tipičnim neporemećenim područjima (vidjeti točku 4.4).

Faktor temperature za površinu građevnog dijela zgrade sa strane prostorije

Računsko određivanje temperature površine građevnog dijela sa strane prostorije pretpostavlja poznavanje rubnih uvjeta tj. vanjske i unutarnje temperature zraka (vidjeti izraz (4.70)). Tako izračunata površinska temperatura nije prenosiva na druge rubne uvjete. To znači da se za promijenjene rubne uvjete proračun površinske temperature pomoću izraza (4.70) treba ponoviti. Da bi se površinska temperatura sa strane prostorije mogla odrediti za bilo koje vrijednosti rubnih temperatura bez korištenja izraza (4.70) uveden je faktor temperature, f_{Rsi} , određen izrazom:

$$f_{Rsi} = \frac{(\theta_{si} - \theta_e)}{(\theta_i - \theta_e)} \quad (4.76)$$

Faktor temperature za površinu sa strane prostorije, f_{Rsi} , jednak je razlici temperature unutarnje površine, θ_{si} , izračunate uz unutarnji otpor prijelaza topline, R_{si} , i temperature vanjskog zraka, θ_e , podijeljenoj s razlikom temperatura unutarnjeg, θ_i , i vanjskog, θ_e , zraka. Vrijednost faktora temperature za površinu sa strane prostorije kreće se u granicama od nula do jedan. Vrijednost faktora nula znači da je temperatura površine sa strane prostorije jednaka temperaturi vanjskog zraka (teoretski moguće kad je toplinski otpor građevnog dijela jednak nuli). Vrijednost faktora jedan znači da je temperatura unutarnje površine jednaka temperaturi unutarnjeg zraka (teoretski moguće kad je toplinski otpor građevnog dijela beskonačan).

Kad je poznat faktor temperature za unutarnju površinu građevnog dijela može se za bilo koje vrijednosti rubnih uvjeta odrediti temperatura unutarnje površine tog vanjskog građevnog dijela zgrade pomoću izraza:

$$\theta_{si} = f_{Rsi} \times (\theta_i - \theta_e) + \theta_e \quad (4.77)$$

Za poznati sastav građevnog dijela zgrade, tj. za poznati ukupni toplinski otpor građevnog dijela, R_T , i otpor prijelaza topline R_{si} , prema slici 4.11, faktor temperature za površinu sa strane prostorije u tipičnom presjeku („neporemećeni“ dio) građevnog dijela određuje se izrazom:

$$\frac{(\theta_{si} - \theta_e)}{(\theta_i - \theta_e)} = f_{Rsi} = \frac{(R_T - R_{si})}{R_T} \quad (4.78)$$

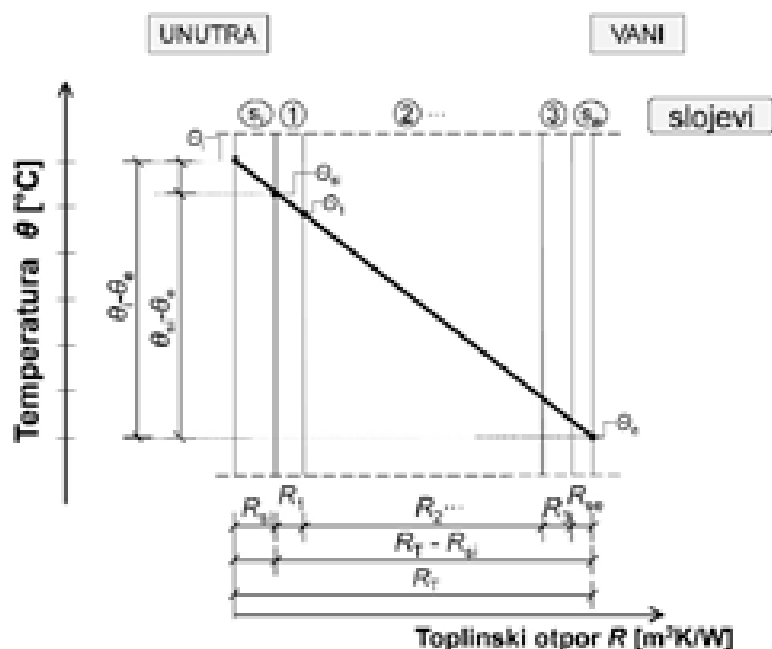
ili

$$f_{Rsi} = 1 - \frac{R_{si}}{R_T} \quad (4.79)$$

odnosno:

$$f_{Rsi} = 1 - R_{si} \times U \quad (4.80)$$

Faktor temperature za površinu sa strane prostorije, f_{Rsi} , izražen na takav način, potpuno je neovisan o graničnim temperaturama već ovisi samo o sastavu građevnog dijela. On, dakle, karakterizira građevni dio zgrade.



Slika 4.11 Određivanje faktora temperature za površinu građevnog dijela sa strane prostorije kad je poznat sastav građevnog dijela (proporcionalnost toplinskog otpora i temperatura)

Pomoću faktora temperature za površinu sa strane prostorije može se izraz (4.73) napisati u obliku:

$$R_T > \frac{R_{si}}{(1 - f_{Rsi, \min})} \quad (4.81)$$

Ovdje je $f_{Rsi, \min}$ najmanji potrebni faktor temperature za površinu građevnog dijela zgrade sa strane prostorije, kojim se izbjegava oštećenje površine djelovanjem vlage.

Najmanji potrebni faktor temperature za površinu sa strane prostorije nazivamo **projektni faktor temperature za površinu sa strane prostorije** i proračunavamo prema izrazu:

$$f_{Rsi, \min} = \frac{(\theta_{si, \min} - \theta_e)}{(\theta_i - \theta_e)} \quad (4.82)$$

gdje je $\theta_{si, \min}$ najniža dopuštena vrijednost temperature površine sa strane prostorije kojom se izbjegava oštećenje te površine djelovanjem vlage.

Promatrani građevni dio mora biti tako projektiran da je njegov:

$$f_{Rsi} > f_{Rsi, \min} \quad (4.83)$$

U slučaju dvodimenzionalnog ili trodimenzionalnog toplinskog toka (područja toplinskih mostova) faktor temperature za površinu sa strane prostorije određuje se rješavanjem diferencijalne jednačbe vođenja topline numeričkim metodama (vidjeti točku 4.4).

U svim gornjim izrazima, umjesto temperature unutarnjeg zraka fizikalno ispravno bi bilo govoriti o operativnoj temperaturi za koju se uzima da je jednaka aritmetičkoj srednjoj vrijednosti temperature zraka u prostoriji i srednje temperature zračenja svih površina koje obuhvaćaju unutarnji prostor (pretpostavlja se da su brojčane vrijednosti temperature zraka i operativne temperature jednake).

Projektiranje s ciljem izbjegavanja pojave plijesni

Kod projektiranja zgrade potrebno je za svaki građevni dio iz toplinske ovojnice zgrade dokazati da, kroz dulje vrijeme (više dana), relativna vlažnost zraka na površini građevnog dijela sa strane prostorije neće prekoračiti kritičnu vlažnost površine od 0,80. U tu svrhu, prema normi HRN EN ISO 13788 [67], za svaki mjesec u godini, treba odrediti slijedeće:

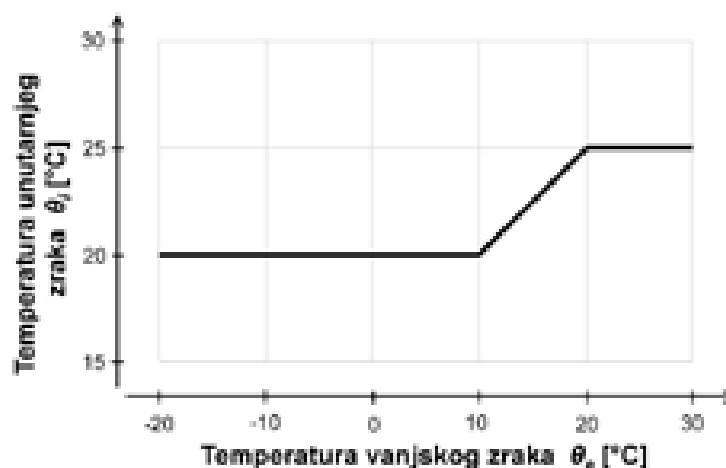
- temperaturu vanjskog zraka, θ_e , u °C. To je srednja mjesečna vrijednost θ_{mm} , u °C, na lokaciji zgrade. Za temperaturu tla uz podzemne građevne dijelove koristi se, za svaki mjesec, aritmetička srednja vrijednost između srednje mjesečne i srednje godišnje vrijednosti temperature vanjskog zraka.
- vlažnost vanjskog zraka. To je srednja mjesečna vrijednost obujamske vlažnosti vanjskog zraka, v_e , u kg/m³, ili parcijalnog tlaka pare, p_e , u Pa, na lokaciji zgrade. Za vlagu u tlu pretpostavlja se da je tlo zasićeno vlagom tj. da je $\varphi = 1$. Srednje mjesečne vrijednosti parcijalnog tlaka vodene pare, p_e , u Pa, ili obujamske vlažnosti zraka, v_e , u kg/m³, mogu se izračunati iz srednje temperature, θ_e , i srednje relativne vlažnosti, φ_e , vanjskog zraka pomoću izraza:

$$p_e = \varphi_e \times p_{\text{sat}}(\theta_e) \quad (4.84)$$

$$v_e = \varphi_e \times v_{\text{sat}}(\theta_e) \quad (4.85)$$

gdje je $p_{\text{sat}}(\theta_e)$ tlak zasićene vodene pare, a $v_{\text{sat}}(\theta_e)$ obujamska vlažnost zraka kod zasićenja, oboje za temperaturu θ_e .

- temperaturu unutarnjeg zraka, θ_i , u °C, u skladu s očekivanom namjenom zgrade. Ukoliko temperatura zraka u zgradi nije posebno regulirana, može se srednja temperatura zraka u prostoriji odrediti pojednostavnjeno iz temperature zraka s vanjske strane pomoću dijagrama na slici 4.12. Taj dijagram vrijedi za stambene i uredske zgrade.



Slika 4.12 Srednja dnevna temperatura zraka u stambenim i uredskim zgradama u ovisnosti o srednjoj dnevnoj temperaturi vanjskog zraka

- vlažnost unutarnjeg zraka pomoću jednog od slijedećih izraza:

$$p_i = p_e + \Delta p \quad (4.86)$$

$$v_i = v_e + \Delta v \quad (4.87)$$

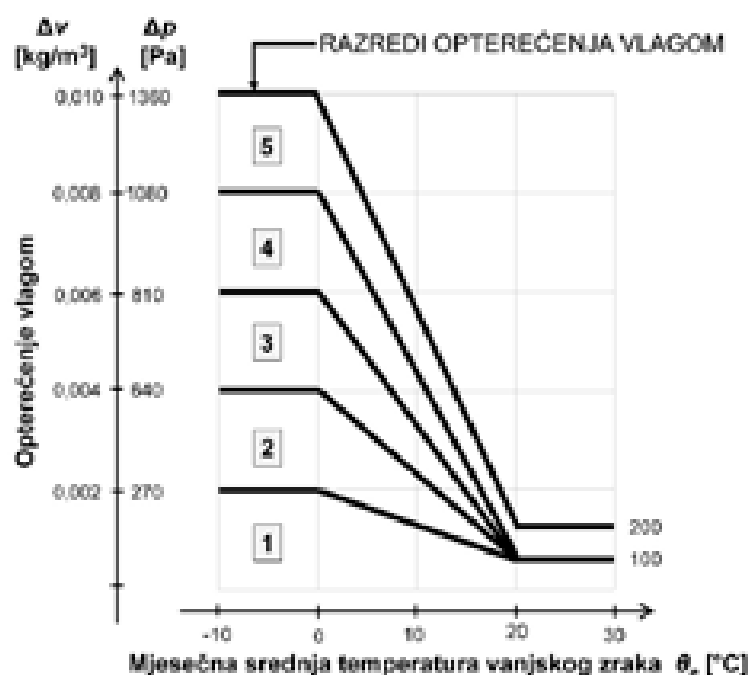
Vrijednost Δp , u Pa, koja znači višak parcijalnog tlaka vodene pare unutarnjeg zraka, i Δv , u kg/m^3 , koja znači višak sadržaja vodene pare unutarnjeg zraka, uzimaju se u skladu s očekivanom namjenom zgrade.

Ovisno o namjeni zgrade, opterećenje vlagom u prostoriji može se opisati pomoću pet razreda vlažnosti koji se odabiru prema podacima u tablici 4.12.

Tablica 4.12 Razredi vlažnosti zraka ovisno o namjeni zgrade

Razred vlažnosti zraka	Vrsta zgrade prema namjeni
1	Zgrade bez ljudi, skladišta suhe robe
2	Uredi, prodavaonice
3	Stambene zgrade s manjim intenzitetom korištenja
4	Stambene zgrade s većim intenzitetom korištenja, sportske hale, kuhinje, kantine
5	Posebne zgrade, npr. praonice, pivovare, kupališta

Granične vrijednosti Δp i Δv za svaki razred vlažnosti iz tablice 4.12 prikazane su na slici 4.13. Za proračune se preporuča koristiti gornje granične vrijednosti svakog razreda.



Slika 4.13 Razredi vlažnosti unutarnjeg zraka u ovisnosti o temperaturi vanjskog zraka.

U slučaju kad je relativna vlažnost unutarnjeg zraka poznata i održavana konstantnom, npr. pomoću klima uređaja, vlažnost unutarnjeg zraka navodi se kao konstanta ϕ .

Ako se ne koriste razredi vlažnosti iz tablice 4.12 ocjena proizvodnje vlage u prostoru zgrade provodi se ocjenjujući doprinos svakog unutarnjeg izvora vlage u proizvodnji ukupne vlažnosti. Proizvodnja vlage u zgradi je vrlo različita ovisno o namjeni zgrade. U tablici 4.13 dane su prosječne vrijednosti proizvodnje vodene pare od strane korisnika zgrade pri različitim aktivnostima (izvor ISO 7730 [68]).

Tablica 4.13 Prosječna proizvodnja vodene pare

Izvor vodene pare	Proizvodnja vodene pare
Osoba koja se odmara, sjedi ili s vrlo laganom aktivnosti	0,055 kg/h
Osoba koja stoji i s laganom aktivnosti	0,090 kg/h
Osoba koja stoji i sa srednjom aktivnosti (kućanski poslovi,...)	0,130 kg/h

Kućne zelene ukrasne biljke, ovisno o vrsti, mogu emitirati znatne količine vodene pare. Prosječno se može računati s vrijednosti 0,02 do 0,05 kg vode po biljci u jednom danu.

Da bi sadržaj vodene pare u zgradi ostao u prihvatljivim granicama potrebno je predvidjeti dovoljnu izmjenu zraka u prostoru zgrade.

Dovod vlage u unutarnji prostor, Δv , u kg/m^3 , jednak je proizvedenoj vlazi u prostoru zgrade, G , u kg/h , podijeljenoj s umnoškom broja izmjena zraka, n , u h^{-1} , i obujma prostora, V , u m^3 :

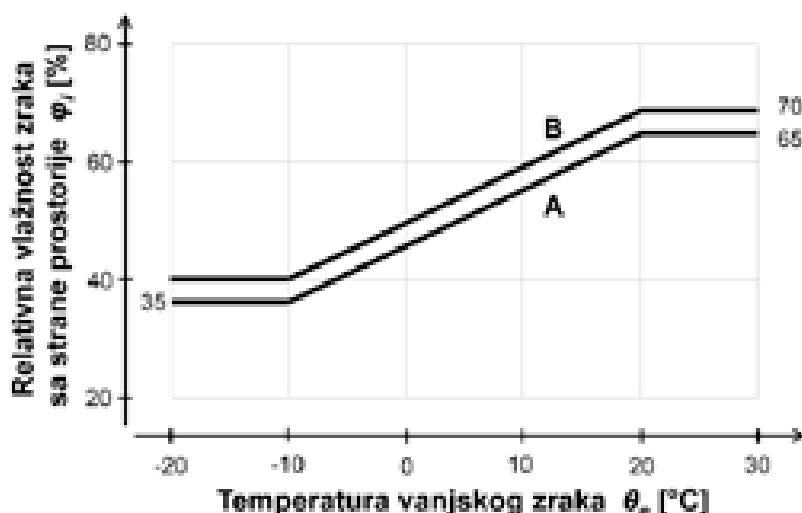
$$\Delta v = v_i - v_e = \frac{G}{(n \times V)} \quad (4.88)$$

Veza između razlike parcijalnih tlakova vodene pare unutarnjeg i vanjskog zraka, Δp , u Pa, i dovoda vlage, Δv , u kg/m^3 , dana je izrazom:

$$\Delta p = \Delta v \times R_v \times \frac{(T_i + T_e)}{2} \quad (4.89)$$

Ovdje je $R_v = 461,5 \text{ J/(kg} \times \text{K)}$ specifična plinska konstanta vode, a T_i i T_e su termodinamička temperatura unutarnjeg i vanjskog zraka u K.

Za stambene i uredske zgrade, ukoliko vlažnost zraka u zgradi nije posebno regulirana, može se srednja vlažnost zraka u prostoriji pojednostavnjeno odrediti iz temperature zraka s vanjske strane pomoću dijagrama na slici 4.14.



A – normalno opterećenje vlagom
B – jače opterećenje vlagom

Slika 4.14 Srednja dnevna vlažnost zraka u stambenim i uredskim zgradama u ovisnosti o srednjoj dnevnoj temperaturi vanjskog zraka

- e) s najvećom prihvatljivom relativnom vlažnosti zraka na površini, $\varphi_{si,cr} = 0,8$, izračunati najmanju dopuštenu obujamsku vlažnost zraka kod zasićenja, v_{sat} , u kg/m^3 , ili najmanji dopušteni tlak zasićene vodene pare, p_{sat} , u Pa, iz izraza:

$$v_{sat}(\theta_{si}) = \frac{v_i}{0,8} \quad (4.90)$$

$$p_{sat}(\theta_{si}) = \frac{p_i}{0,8} \quad (4.91)$$

Kriterij $\varphi_{si,cr} \leq 0,8$ odabran je s obzirom na rizik razvoja plijesni. Po potrebi se mogu primijeniti i drugi kriteriji, npr. $\varphi_{si,cr} \leq 0,6$ s ciljem izbjegavanja korozije ili $\varphi_{si,cr} \leq 1,0$ s ciljem izbjegavanja površinske kondenzacije vodene pare.

- f) najnižu dopuštenu temperaturu površine sa strane prostorije, $\theta_{si,min}$, proračunati pomoću najmanje dopuštene vlažnosti zraka kod zasićenja odnosno najmanjeg dopuštenog tlaka zasićene vodene pare koji su proračunati pod točkom e). Ova temperatura se može očitati iz tablice u *Prilogu 4.2* ili proračunati iz izraza (4.67) i (4.68). Najnižu temperaturu površine sa strane prostorije prije pojave plijesni nazivamo **najniža dopuštena temperatura površine sa strane prostorije**.
- g) iz najniže dopuštene temperature površine sa strane prostorije, $\theta_{si,min}$, poznate temperature unutarnjeg zraka, θ_i , te temperature vanjskog zraka, θ_e , izračuna se pomoću jednadžbe (4.82) najmanju vrijednost faktora temperature za površinu sa strane prostorije, $f_{Rsi,min}$. Mjesec u godini s najvećom potrebnom vrijednosti $f_{Rsi,min}$ je kritičan mjesec. Faktor temperature za površinu sa strane prostorije za taj mjesec označi se kao $f_{Rsi,max}$. Promatrani građevni dio zgrade mora biti tako projektiran da zadovoljava zahtjev

$$f_{Rsi} > f_{Rsi,max} \quad (4.92)$$

Primjer 4.8

Za građevne dijelove iz toplinske ovojnice stambene zgrade locirane u gradu Varaždinu treba izračunati najmanji faktor temperature za površinu sa strane prostorije, $f_{Rsi,min}$, kojim se izbjegava kritična vlažnost zraka na površini. Vlažnost zraka u zgradi odrediti prema razredima vlažnosti iz tablice 4.12.

Proračun je prikazan u tablici 4.14. U stupcu 1 dane su srednje mjesečne temperature vanjskog zraka, θ_e , a u stupcu 2 srednje mjesečne relativne vlažnosti vanjskog zraka, φ_e , za grad Varaždin, prema podacima Hidrometeorološkog zavoda RH [58].

Srednji mjesečni tlak zasićene vodene pare vanjskog zraka izračunat je za temperature vanjskog zraka iz stupca 1 pomoću izraza (4.65) i (4.66). Iz tih vrijednosti i relativne vlažnosti vanjskog zraka (stupac 2) izračunat je parcijalni tlak vodene pare vanjskog zraka, p_e , u stupcu 3 (jednadžba (4.84)).

Za odabrani razred vlažnosti 3 iz tablice 4.12, razlika parcijalnih tlakova vodene pare unutarnjeg i vanjskog zraka, Δp , u Pa, prema dijagramu na slici 4.13, iznosi:

$$\Delta p = 810 \text{ Pa} \quad \text{za } \theta_e \leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$$

odnosno

$$\Delta p = 810 - (710/20) \times \theta_e \quad \text{za } 0 \text{ }^\circ\text{C} < \theta_e < 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

Za $\theta_e \geq 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta p = 100$.

Izračunate vrijednosti Δp sadrži stupac 4. U stupcu 5 izračunat je parcijalni tlak vodene pare unutarnjeg zraka, p_i , pomoću izraza

$$p_i = p_e + \Delta p$$

Najmanji dopušteni tlak zasićene vodene pare na unutarnjoj površini ovojnice zgrade, $p_{sat}(\theta_{si})$, iz stupca 6, izračuna se pomoću izraza (4.91). Pomoću izračunatih vrijednosti $p_{sat}(\theta_{si})$ iz stupca 6, jednadžbom (4.67) ili (4.68), proračuna se najniža dopuštena temperatura površine ovojnice sa strane prostorije, $\theta_{si,min}$ (stupac 7). U stupcu 8 su dane zadane temperature unutarnjeg zraka, θ_i .

Najmanji potrebni faktor temperature za površinu sa strane prostorije, kojim se izbjegava pojava plijesni, izračunat je pomoću izraza (4.82) i rezultati su uvršteni u stupac 9. Iz dobivenih vrijednosti u stupcu 9 vidljivo je da je prosinac kritičan mjesec, pa je

$$f_{Rsi,max} = 0,724$$

Građevne dijelove iz toplinske ovojnice predmetne zgrade treba tako projektirati da im faktor temperature na površini sa strane prostorije bude veći od gornje vrijednosti.

Tablica 4.14 Proračun $f_{Rsi,max}$ za određeni razred vlažnosti u prostoriji

Mjesec	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	θ_e °C	φ_e -	p_e Pa	Δp Pa	p_i Pa	$p_{sat}(\theta_{si})$ Pa	$\theta_{si,min}$ °C	θ_i °C	f_{Rsi} -
Sij	0,4	0,83	522	796	1318	1648	14,5	20	0,719
Velj	2,2	0,75	537	732	1269	1586	13,9	20	0,657
Ožu	6,4	0,71	682	583	1265	1581	13,8	20	0,544
Tra	11,2	0,69	917	412	1329	1661	14,6	20	0,386
Svi	16,2	0,68	1252	235	1487	1859	16,4	20	0,053
Lip	19,2	0,69	1573	128	1701	2126	18,5	20	0
Srp	21,2	0,70	1761	100	1861	2326	19,9	20	0
Kol	20,5	0,73	1759	100	1859	2324	19,9	20	0
Ruj	15,5	0,79	1390	260	1650	2063	18,0	20	0,556
Lis	10,7	0,81	1042	430	1472	1840	16,2	20	0,591
Stu	6,0	0,84	785	597	1382	1728	15,2	20	0,657
Pro	0,8	0,86	556	782	1338	1673	14,7	20	0,724

Primjer 4.9

Za toplinsku ovojnicu klimatizirane uredske zgrade locirane u gradu Varaždinu izračunati najmanji faktor temperature za površinu sa strane prostorije, $f_{Rsi,min}$, kojim se izbjegava kritična vlažnost zraka na površini. Postavne vrijednosti temperature unutarnjeg zraka i relativne vlažnosti unutarnjeg zraka su $\theta_i = 20$ °C i $\varphi_i = 0,55$.

Proračun je prikazan u tablici 4.15. U stupcu 1 dane su srednje mjesečne temperature vanjskog zraka, θ_e , za grad Varaždin prema podacima Hidrometeorološkog zavoda RH [58].

Stupac 2 sadrži vrijednosti temperature unutarnjeg zraka, θ_i , a stupac 3 relativnu vlažnost unutarnjeg zraka, φ_i . U stupcu 4 je parcijalni tlak vodene pare unutarnjeg zraka

$$p_i = 0,55 \times p_{sat,i} = 0,55 \times 2337 = 1285 \text{ Pa}$$

Tlak zasićene pare u prostoru zgrade dobiven je pomoću izraza (4.65) za temperaturu $\theta_i = 20$ °C (može se očitati i iz tablice u prilogu 4.2).

Najniži dopušteni tlak zasićene pare na površini toplinske ovojnice sa strane prostorije, $p_{sat}(\theta_{si})$, iz stupca 5, izračuna se pomoću izraza (4.91). Najniža dopuštena temperatura površine sa strane prostorije za građevni dio iz ovojnice zgrade, $\theta_{si,min}$, iz stupca 6, izračuna se pomoću izraza (4.67). Najmanji potrebni faktor temperature za površinu sa strane prostorije, kojim se izbjegava pojava plijesni, izračunat je pomoću izraza (4.82) i rezultati su uvršteni u stupac 7. Iz dobivenih vrijednosti f_{Rsi} je vidljivo da je siječanj kritičan mjesec, pa je

$$f_{Rsi,max} = 0,699$$

Građevne dijelove iz toplinske ovojnice zgrade treba projektirati tako da im faktor temperature za površinu sa strane prostorije bude veći od gornje vrijednosti.

Tablica 4.15 Proračun $f_{Rsi,max}$ za stalnu vlažnost zraka u prostoriji

Mjesec	1 θ_e °C	2 θ_i °C	3 φ_i -	4 p_i Pa	5 $p_{sat}(\theta_{si})$ Pa	6 $\theta_{si,min}$ °C	7 f_{Rsi} -
Sij	0,4	20,0	0,55	1285	1606	14,1	0,699
Velj	2,2	20,0	0,55	1285	1606	14,1	0,669
Ožu	6,4	20,0	0,55	1285	1606	14,1	0,566
Tra	11,2	20,0	0,55	1285	1606	14,1	0,330
Svi	16,2	20,0	0,55	1285	1606	14,1	0
Lip	19,6	20,0	0,55	1285	1606	14,1	0
Srp	21,2	20,0	0,55	1285	1606	14,1	0
Kol	20,5	20,0	0,55	1285	1606	14,1	0
Ruj	15,5	20,0	0,55	1285	1606	14,1	0
Lis	10,7	20,0	0,55	1285	1606	14,1	0,366
Stu	6,0	20,0	0,55	1285	1606	14,1	0,579
Pro	0,8	20,0	0,55	1285	1606	14,1	0,693

Primjer 4.10

Za toplinsku ovojnicu zgrade proizvodnog pogona, obujma $V = 250 \text{ m}^3$, koja se nalazi u gospodarskoj zoni grada Varaždina, treba izračunati projektni faktor temperature za površinu ovojnice sa strane prostorije, $f_{Rsi,min}$, kojim se izbjegava kritična vlažnost zraka na površini. Proizvodnja vlage u prostoru pogona je $0,4 \text{ kg/h}$, a broj izmjena zraka je $n = 0,6 \text{ h}^{-1}$.

Proračun je prikazan u tablici 4.16. U stupcu 1 dane su srednje mjesečne temperature vanjskog zraka, θ_e , a u stupcu 2 srednje mjesečne relativne vlažnosti vanjskog zraka, φ_e , za grad Varaždin, prema podacima Hidrometeorološkog zavoda RH [58].

Za poznate temperature vanjskog zraka iz stupca 1 izračunat je najveći tlak zasićene pare pomoću izraza (4.65). Množenjem odgovarajućeg tlaka zasićene pare s odgovarajućom relativnom vlažnosti vanjskog zraka iz stupca 2, dobiveni su u stupcu 3 prikazani parcijalni tlakovi vodene pare vanjskog zraka, p_e .

U stupcu 4 nalazi se zadani broj izmjena zraka, n . Iz poznatog broja izmjena zraka, n , u h^{-1} , proizvodnje vlage u prostoru, G , u kg/h , i obujma zgrade, V , u m^3 , pomoću jednadžbe (4.88) izračuna se dovod vlage u prostoriju, Δv , u kg/m^3

$$\Delta v = \frac{0,4}{(0,6 \times 250)} = 0,00267 \text{ kg/m}^3$$

Pomoću jednadžbe (4.90) proračuna se razlika između parcijalnih tlakova vodene pare unutarnjeg i vanjskog zraka, Δp , u Pa (stupac 5).

Parcijalni tlak vodene pare u unutarnjem zraku, p_i , u Pa, dan je u stupcu 6. Dobiven je iz izraza

$$p_i = p_e + \Delta p$$

Najmanji dopušteni tlak vodene pare na unutarnjoj površini toplinske ovojnice zgrade, $p_{sat}(\theta_{si})$, dan je u stupcu 7. Proračuna se pomoću jednadžbe (4.91). Najniža dopuštena površinska temperatura, $\theta_{si,min}$, u stupcu 8, izračuna se pomoću izraza (4.68). Najmanji potrebni faktor temperature za unutarnju površinu, kojim se izbjegava pojava plijesni, izračunat je pomoću izraza (4.82), a dobiveni rezultati su uvršteni u stupac 10. Iz dobivenih rezultata proizlazi da je rujan kritičan mjesec, pa je

$$f_{Rsi,max} = 0,756$$

Građevne dijelove iz toplinske ovojnice zgrade treba projektirati tako da im faktor temperature za površinu sa strane prostorije bude veći od gornje vrijednosti.

Tablica 4.16 Proračun $f_{Rsi,max}$ kod poznatog dovoda vlage u unutarnji prostor i poznatog broja izmjena unutarnjeg zraka

Mjesec	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	θ_e °C	φ_e °C	p_e Pa	n h ⁻¹	Δp Pa	p_i Pa	$p_{sat}(\theta_{si})$ Pa	$\theta_{si,min}$ °C	θ_i °C	f_{Rsi} -
Sij	0,4	0,83	522	0,6	349	871	1089	8,2	20	0,398
Velj	2,2	0,75	537	0,6	350	887	1109	8,5	20	0,354
Ožu	6,4	0,71	682	0,6	353	1035	1294	10,8	20	0,324
Tra	11,2	0,69	917	0,6	356	1273	1591	13,9	20	0,307
Svi	16,2	0,68	1252	0,6	359	1611	2014	17,6	20	0,368
Lip	19,6	0,69	1573	0,6	361	1934	2418	20,6	20	0
Srp	21,2	0,70	1761	0,6	362	2123	2654	22,1	20	0
Kol	20,5	0,73	1759	0,6	362	2121	2651	22,1	20	0
Ruj	15,5	0,79	1390	0,6	358	1748	2185	18,9	20	0,756
Lis	10,7	0,81	1042	0,6	355	1397	1746	15,4	20	0,505
Stu	6,0	0,84	785	0,6	353	1138	1428	12,3	20	0,450
Pro	0,8	0,86	556	0,6	349	905	1131	8,8	20	0,417

Projektiranje s ciljem ograničavanja površinske kondenzacije na građevnim dijelovima male toplinske tromosti

U slučaju laganih građevnih dijelova zgrade, dakle dijelova male toplinske tromosti (npr. okviri prozora, lagani toplinsko-izolacijski paneli,...), koji reagiraju na promjene temperature u puno kraćim vremenskim razdobljima od jednog dana, koristi se, prema HRN EN ISO 13788 [67], slijedeći postupak:

- odredi se temperatura vanjskog zraka, θ_e , u °C, kao srednja godišnja vrijednost najnižih srednjih dnevnih temperatura, $\theta_{min,ym}$ (višegodišnji prosjek najnižih godišnjih srednjih dnevnih temperatura),
- za relativnu vlažnost vanjskog zraka uzima se vrijednost 0,85 i izračuna se tlak vodene pare ili obujamska vlažnost vanjskog zraka pomoću izraza:

$$p_e = \varphi_e \times p_{sat}(\theta_e) \quad (4.93)$$

$$v_e = \varphi_e \times v_{sat}(\theta_e) \quad (4.94)$$

- odredi se temperatura unutarnjeg zraka u skladu s očekivanim korištenjem zgrade,
- izračuna se vlažnost unutarnjeg zraka pomoću izraza (4.86) ili (4.87), tablice 4.12 i slike 4.13,
- s najvećom prihvatljivom relativnom vlažnosti na površini, $\varphi_{si} = 1,0$, izračuna se najmanja dopuštena obujamska vlažnost zraka kod zasićenja, v_{sat} , u kg/m³, ili najmanji dopušteni tlak zasićene vodene pare, p_{sat} , u Pa, iz izraza:

$$v_{sat}(\theta_{si}) = v_i \quad (4.95)$$

$$p_{sat}(\theta_{si}) = p_i \quad (4.96)$$

- odredi se najniža dopuštena temperatura površine sa strane prostorije, $\theta_{si,min}$, u °C, iz najmanje dopuštene vlažnosti zraka kod zasićenja odnosno najmanjeg dopuštenog tlaka

zasićene vodene pare. Ova temperatura se može očitati iz tablice u *Prilogu 4.2* ili proračunati iz izraza (4.67) i (4.68).

- g) iz najniže dopuštene temperature površine sa strane prostorije, $\theta_{si,min}$, poznate temperature unutarnjeg zraka, θ_i , te temperature vanjskog zraka, θ_e , izračuna se pomoću jednadžbe (4.82) za ovojnicu zgrade najmanji potrebni faktor temperature za površinu sa strane prostorije, $f_{Rsi,min}$. Projektirani građevni dio zgrade mora zadovoljiti uvjet $f_{Rsi} > f_{Rsi,min}$.

4.3.4 Sadržaj vlage u građevnom materijalu

Većina građevnih materijala je porozna. Razlikuju se dva osnovna tipa pora u materijalu: zatvorene pore bez međusobne povezanosti i otvorene pore koje su međusobno povezane. Porozni materijali imaju svojstvo da upijaju vodu. U materijalu s otvorenim porama voda i vodena para se slobodnije kreću pa će upijanje vode biti veće.

Upijanje vode je svojstvo građevnog materijala da prihvati (upije, usiše) i u sebi zadrži slobodnu vodu. Utvrđuje se mjerenjem mase upijene vode vaganjem. Najprije se izmjeri masa uzorka materijala koji u sebi sadrži vodu. Zatim se taj uzorak potpuno osuši zagrijavanjem do stalne mase prema postupku utvrđenom u specifikacijskoj normi da promatrani materijal. Vaganjem se izmjeri masa suhog uzorka. Oduzimanjem mase suhog uzorka od mase vlažnog uzorka dobije se masa upijene slobodne vode.

Sadržaj vlage u građevnom materijalu izražava se

- kao masa sadržaja vlage po obujmu materijala, oznaka w , u kg/m^3 , ili
- kao obujam sadržaja vlage po obujmu materijala, oznaka ψ , u m^3/m^3 , ili
- kao masa sadržaja vlage po masi materijala, oznaka u , u kg/kg .

Masa sadržaja vlage po obujmu materijala, w , je masa upijene vode u ispitnom uzorku podijeljena s obujmom uzorka.

$$w = \frac{\text{masa upijene vode}}{\text{obujam građevnog materijala}}$$

Obujam sadržaja vlage po obujmu materijala, ψ , je obujam upijene vode u ispitnom uzorku podijeljen s obujmom uzorka.

$$\psi = \frac{\text{obujam upijene vode}}{\text{obujam građevnog materijala}}$$

Masa sadržaja vlage po masi materijala, u , je masa upijene vode u ispitnom uzorku podijeljena s masom uzorka.

$$u = \frac{\text{masa upijene vode}}{\text{masa građevnog materijala}}$$

Masa građevnog materijala se može odnositi na mokro ili suho stanje pa se to mora naznačiti kad se navodi sadržaj vlage. Obično se svodi na masu suhog materijala.

Obujam sadržaja vlage po obujmu materijala i masa sadržaja vlage po masi materijala su veličine bez dimenzija i često se navode u postocima. Između njih postoji sljedeći odnos

$$u = \psi \times \left(\frac{\rho_w}{\rho} \right) \quad (4.97)$$

gdje je

ρ_w gustoća (obujamska masa) vode, u kg/m^3 ($\rho_w \approx 1\,000\text{ kg/m}^3$),
 ρ gustoća promatranog građevnog materijala, u kg/m^3 .

Za svaki građevni materijal važno je utvrditi **najveću količinu vode**, $u_{\max}$, koju materijal može upiti. Kada se kod ispitivanja upijanja vode uzastopnim mjerenjima mase ispitivanog uzorka materijala utvrdi da se ona više ne mijenja, smatra se da je **materijal zasićen vodom**. Tada su sve šupljine u materijalu, koje su pristupačne za vodu, potpuno ispunjene vodom. Najveća količina vode koju neki materijal može upiti promjenjiva je ovisno o korištenoj metodi ispitivanja. Zato uvijek, uz podatak o najvećoj količini upijene vode, treba navesti koja se metoda ispitivanja koristila. Općenito, materijal će upiti najviše vode ako je ispitivanje upijanja provedeno postupkom upijanja pod tlakom. Omjer mase vode sadržane u poroznom materijalu i mase vode u stanju zasićenja tog materijala vodom nazivamo **stupanj zasićenja vlagom** i označavamo simbolom S .

Kad se govori o sadržaju vlage u građevnim dijelovima zgrade treba razlikovati građevinsku vlagu i trajnu vlagu. **Građevinska vlaga** je posljedica vlage koju sadrže građevni dijelovi kod građenja zgrade. Ona ovisi o ugrađenoj vodi u građevne dijelove tijekom procesa njihove proizvodnje te o upijenoj oborinskoj vlazi tijekom odvijanja tehnološkog procesa izgradnje zgrade. Nakon isušivanja građevinske vlage, što može potrajati i više od godine dana, u građevnim dijelovima zgrade uspostavi se s približno konstantnom srednjom vrijednosti tzv. **trajna vlaga** (ili praktički sadržaj vlage). Ona ovisi o klimatskim uvjetima izvan i unutar zgrade. Trajnom vlagom nekog građevnog materijala smatra se onaj sadržaj vlage u materijalu koji u praksi, to znači u ugrađenom stanju u zgradu koja se koristi, nije prekoračen s vjerojatnosti 90 %. Određuje se statističkom obradom velikog broja ispitanih uzoraka uzetih iz zgrada u upotrebi, nakon isušivanja građevinske vlage. Podaci o trajnoj vlazi građevnih materijala posebno su značajni za određivanje njihovih projektnih vrijednosti toplinske vodljivosti, λ .

Kod sušenja građevnog materijala zasićenog vlagom u okolišu određene temperature i relativne vlažnosti, mogu se razlikovati tri faze sušenja. Tijekom prve faze, koja općenito traje najkraće, voda s površine materijala isparava u okoliš. Ta faza traje sve dok kapilarne sile dovode do površine materijala slobodnu vodu koja se tu isparuje. Druga faza sušenja započne kad se lice vode počne pomicati prema unutrašnjosti materijala. Tada se naglo smanjuje brzina sušenja. Ta faza traje, za materijal koji se suši na obje svoje paralelne površine, sve dok lice vlage ne dospije do središnje ravnine materijala. Tada slijedi treća faza sušenja koja traje do postizanja ravnotežne vlage tj. do uspostave higroskopske ravnoteže materijala s relativnom vlagom u okolišu.

Najveći dio vlage koju upijaju materijali građevnih dijelova zgrade posljedica je tri osnovna fizikalna mehanizma prijenosa vlage:

- procesa fizikalne adsorpcije,
- kapilarnih procesa,
- kondenzacije vodene pare koja procesom difuzije ulazi u građevne dijelove.

4.3.5 Higroskopska vlažnost materijala

Većina građevnih materijala je porozna što znači da se sastoje od čvrstog dijela (matrice) i mreže pora ispunjenih zrakom. Porozni građevni materijali, ovisno o njihovim fizikalnim svojstvima, prihvaćaju vodenu paru iz zraka koji ih okružuje. Ako se pri konstantnoj temperaturi poveća relativna vlažnost zraka koji okružuje uzorak poroznog materijala, masa uzorka će porasti. To svojstvo građevnog materijala da iz vlažnog zraka prihvati mjerljivu količinu vodene pare nazivamo **higroskopsnost**. Najveći sadržaj vlage koji građevni materijal može prihvatiti ovim mehanizmom općenito je znatno manji od onog dobivenog upijanjem vode do zasićenja.

Građevni materijali su higroskopski ako imaju sposobnost da prihvate vodenu paru iz okolnog zraka kod porasta njegove vlažnosti. To prihvaćanje vodene pare iz okolnog vlažnog zraka

odvija se procesom **sorpcije** (od latinskog sorbere: srkati, gutati). Obrnuti proces koji se odnosi na otpuštanje vodene pare iz građevnog materijala kod smanjenja relativne vlažnosti okolnog zraka nazivamo **desorpcija**.

Proces sorpcije podijeljen je u tri različite pojave: kemijsku sorpciju, fizikalnu sorpciju i kapilarnu kondenzaciju. Kod kemijske sorpcije dolazi do kemijske reakcije između molekula vode i molekula građevnog materijala uz površinu pora. Proces nije reverzibilan. Kod fizikalne sorpcije nastaje slaba fizikalna veza između molekula vode i molekula na površini pora. Taj proces je reverzibilan jer njime ne dolazi do kemijskih veza. Kapilarna kondenzacija događa se u uskim porama promjera <100 nm. Taj proces je također reverzibilan ali uz određeno vremensko zaostajanje. U većini slučajeva udio kemijske sorpcije je zanemariv, tako da glavni udio sorpcije čine fizikalna sorpcija i kapilarna kondenzacija.

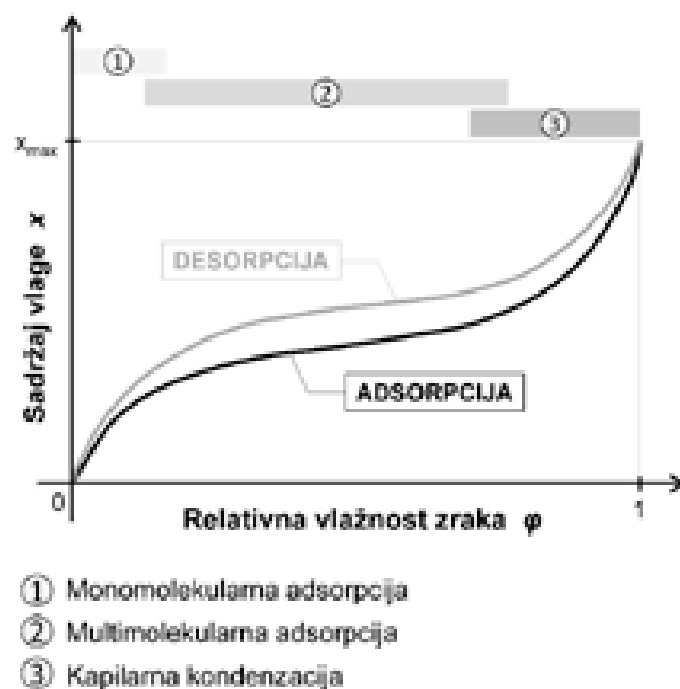
Proces fizikalne sorpcije nazivamo i fizikalna **adsorpcija**. Adsorpcije je, dakle, pojava da se na graničnoj površini između dvije tvari različitog agregatnog stanja (površine čvrstog tijela okružene tekućinom ili plinom) nakuplja neka tvar u koncentraciji većoj nego što vlada u unutrašnjosti susjednih tvari. Fizikalna adsorpcija vode je pojava površinskog vezanja vode kod koje molekule vode prijanjaju na površinu pora u čvrstom materijalu tako da na stjenkama pora nastaje fini sloj vode. Adsorpcija je, dakle, formiranje tekućeg sloja vode na površini pora čvrstog građevnog materijala. To je proces koji se odvija samo na površini. Ova pojava objašnjava se djelovanjem privlačnih međumolekularnih sila između molekula vodene pare i molekula čvrstog materijala s kojim su molekule vodene pare u dodiru (van der Waalsove sile).

Proces adsorpcije ne treba miješati s pojavom **apsorpcije** ili **upijanja**. Apsorpcija vode je upijanje vode čitavom masom građevnog materijala. Apsorpcija je pojava da voda prolazi kroz graničnu površinu građevnog materijala i jednoliko se raspodjeljuje po čitavom materijalu. Apsorbirane molekule vode ulaze unutar čvrstog dijela građevnog materijala. Apsorpcija je, dakle, zadržavanje jedne tvari, u ovom slučaju vode, unutar druge tvari, u ovom slučaju građevnog materijala.

Adsorpcija vode je prihvatanje vode u plinovitom stanju. Apsorpcija vode je upijanje vode u tekućem stanju.

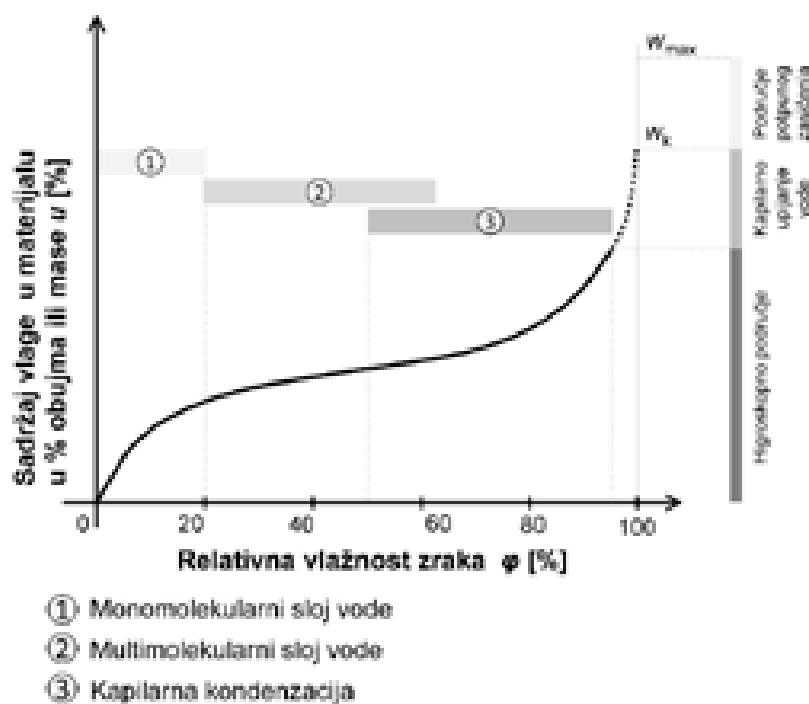
Higroskopna svojstva građevnih materijala opisujemo tzv. izotermama sorpcije. **Izoterma sorpcije** vode pruža obavijest o uspostavljenoj ravnotežnoj vlažnosti materijala u ovisnosti o relativnoj vlažnosti i temperaturi okolnog zraka. Naime, nakon određenog vremena ležanja poroznog građevnog materijala u zraku konstantne relativne vlažnosti i temperature, u materijalu se uspostavi određeni sadržaj vode, koji nazivamo **ravnotežna vlažnost** ili **higroskopna vlažnost** građevnog materijala. Izoterma sorpcije daje za svaki građevni materijal karakterističnu funkcionalnu vezu između njegova sadržaja higroskopne vode i relativne vlažnosti zraka u njegovu okolišu. Budući da je ta funkcionalna veza slabo ovisna o temperaturi, za potrebe u graditeljstvu ovisnost o temperaturi se može zanemariti.

Izoterma sorpcije dobije se mjerenjem promjene sadržaja vlage u građevnom materijalu ili kod postepenog porasta ili kod postepenog smanjivanja relativne vlažnosti okolnog zraka. Kod povećanja relativne vlažnosti zraka sorpcijska krivulja opisuje adsorpciju, a kod smanjivanja relativne vlažnosti zraka opisuje desorpciju. Adsorpcijska i desorpcijska izoterma se u pravilu ne podudaraju (vidjeti sliku 4.15).



Slika 4.15 Tipični izgled sorpcijske izoterme higroskopnog materijala

Analiza karakteristične izoterme sorpcije higroskopnog poroznog građevnog materijala prikazana je na slici 4.16. Kod sorpcijske krivulje razlikuju se tri različite faze upijanja vode. U prvoj fazi, u području relativne vlažnosti zraka od 0 do 20 %, odvija se adsorpcija na način da na stjenkama kapilara nastaje monomolekularni sloj vode. U drugoj fazi, u području relativne vlažnosti zraka od 20 % pa do oko 50 % do 70 % ovisno o promjeru kapilara, na površinama stjenki kapilara nastaje više slojeva molekula vode tj. multimolekularni sloj vode. U trećoj fazi, u području relativne vlažnosti zraka iznad oko 50 % do 70 % ovisno o promjeru kapilara, dijelovi kapilara se potpuno ispune vodom tj. odvija se kapilarna kondenzacija.



Slika 4.16 Karakteristična izoterma sorpcije higroskopnog poroznog građevnog materijala

S obzirom na sadržaj vlage u materijalu, kod sorpcijske krivulje na slici 4.16 razlikuju se tri različita područja. Prvo područje je područje sorpcije ili higroskopno područje. Ono se proteže od suhog materijala do vlage u materijalu kod relativne vlažnosti okolnog zraka oko 0.95. U tom slučaju vlaga u materijalu je posljedica procesa adsorpcije vlage i kapilarne kondenzacije do uspostavljenja ravnotežnog stanja.

Drugo područje sadržaja vlage u materijalu je područje kapilarnog upijanja vode koje se proteže od higroskopnog područja pa do sadržaja slobodne vode upijene kapilarnim procesom, u_k . Kapilarno aktivni materijal u dodiru s vodom upijati će vodu dok ne dosegne razinu sadržaja slobodne vode kod zasićenja.

Zbog zatvorenih zračnih šupljina u strukturi materijala, zasićenje uslijed kapilarnog procesa niže je od najvećeg sadržaja vode, $u_{\max}$, kod upijanja vode potpunim uranjanjem u vodu ili upijanja vode pod tlakom, kad se sve pore u materijalu ispune vodom. Ovo treće područje sadržaja vlage u materijalu je područje između u_k i $u_{\max}$.

Nakon što se u građevnom materijalu ugrađenom u tijelo zgrade uspostavi ravnotežno higroskopno stanje, sadržaj vode u materijalu može se dalje povećavati samo kapilarnim upijanjem tekuće faze vode ili difuzijom vodene pare i njenom kondenzacijom unutar građevnog materijala.

4.3.6 Prijenos vlage kapilarnim procesom

Građevni dijelovi zgrade koji su u izravnom dodiru s vodom, ovisno o svojim karakteristikama poroznosti, mogu upijati vlagu kapilarnim silama i brže ili sporije dalje je prenositi. **Kapilarno upijanje vode** je upijanje vode u tekućem stanju u kapilarno-porozni materijal kod površinskog dodira materijala s tekućom vodom, uzrokovano kapilarnim sisajućim silama u materijalu. O sposobnosti kapilarnog upijanja vode ovisi i količina oborinske vode koju će upiti vanjske površine građevnih dijelova zgrade i dalje je voditi u unutrašnjost građevnog dijela. S druge strane, kod za to povoljnih klimatskih uvjeta, voda iz unutrašnjosti građevnog dijela (od unutarnje kondenzacije ili ranije upijene kiše) kapilarama putuje do vanjske površine građevnog dijela i tu se isparava tj. građevni dio se isušuje.

Prema Künzel-u količina vode, m_k , u kg/m^2 , koja je upijena kapilarnim procesom može se predstaviti kao funkcija vremena, t , u satima, pomoću izraza:

$$m_k = A \times t^{0.5} \quad (4.98)$$

A je koeficijent upijanja vode. On je jednak masi kapilarno upijene vode sveden na drugi korijen iz vremena upijanja i na jedinicu ploštine površine koja upija vodu. Koeficijent upijanja vode karakterizira intenzitet kapilarnog upijanja, npr. žbuke ili nekog drugog sloja površinske zaštite fasade. To je svojstvo materijala, odnosno površine. Izražava se u $\text{kg}/(\text{m}^2 \times \text{h}^{0.5})$.

Kapilarnost igra odlučujuću ulogu uglavnom kod građevnih materijala s porama promjera između 0,1 μm i 1 mm.

4.3.7 Difuzija vodene pare kroz građevne dijelove zgrade

Proces prijenosa topline i proces prijenosa vodene pare u građevnim dijelovima zgrade odvijaju se istovremeno i međusobno su ovisni. **Difuzija vodene pare** je usmjereno kretanje molekula vodene pare uzrokovano njihovim toplinskim gibanjem. Kod prostorno različitih sadržaja vodene pare postoji, makroskopski gledano, usmjereni tok molekula vodene pare u pravcu iz dijela prostora s višim prema dijelu prostora s nižim sadržajem vodene pare. Postoji, naime, prirodna težnja ka izjednačavanju prostorne gustoće vodene pare tj. njenoj ravnomjernoj raspodjeli u prostoru. Difuzija vodene pare je, dakle, kretanje molekula vodene pare u zraku, odnosno u zraku u porama građevnog materijala, zbog razlike u vlažnosti odnosno razlike u parcijalnom tlaku vodene pare.

U graditeljstvu se analizira pojave difuzije vodene pare kroz građevne dijelove zgrade. Vodena para će difundirati kroz svaki građevni dio koji odjeljuje dva prostora s različitim sadržajem vodene pare. Kod toga se molekule vodene pare kreću iz prostora gdje ih ima više prema prostoru gdje je njihov sadržaj manji. Iz prostora gdje je veći sadržaj vodene pare u zraku, čestice vodene pare prodiru kroz graničnu površinu građevnog dijela u otvorene pore materijala i putuju kroz njegovu porastu strukturu. Kroz nasuprotnu graničnu površinu napuštaju građevni dio i ulaze u prostor s nižim sadržajem vodene pare. Ovaj proces trajati će tako dugo dok se sadržaj vodene pare u zraku s obje strane građevnog dijela ne izjednači. Difuzija vodene pare kroz građevni dio zgrade je vrlo polagani proces. Za orijentaciju se može prihvatiti, za uobičajene porozne građevne materijala, da srednja brzina kretanja molekula vodene pare difuzijom iznosi oko 10^{-5} m/s.

Svaki građevni materijal, ovisno o svojoj strukturi, pruža određeni otpor difuziji vodene pare. Kao mjera za taj otpor koristi se karakteristika materijala nazvana **faktor otpora difuziji vodene pare**, μ . To je veličina bez dimenzija. Njena brojčana vrijednost pokazuje koliko je puta veći otpor difuzijskom prolasku vodene pare kroz promatrani građevni materijal nego kroz sloj mirnog zraka jednake debljine i jednake temperature. Naime, u usporedbi s građevnim materijalima, zrak pruža najmanji otpor difuziji vodene pare. Zato je otpor difuziji vodene pare mirnog sloja zraka prihvaćen kao referentna točka i dodijeljena mu je vrijednost $\mu = 1$. To znači da moguće područje vrijednosti faktora otpora difuziji vodene pare za građevne materijale leži u rasponu od jedan do beskonačno. Faktor otpora difuziji vodene pare ovisi o veličnosti razmaka između molekula materijala. Ako je taj razmak manji od veličnosti molekule vodene pare tada ona ne može proći kroz materijal. Beskonačnu vrijednost faktora μ imaju samo metali zbog svoje guste strukture, a svi ostali građevni materijali su manje ili više propusni za difuziju vodene pare.

Da bi se karakterizirao otpor koji neki sloj građevnog dijela pruža difuziji vodene pare nije dovoljno navesti samo faktor μ materijala toga sloja, jer će za različite debljine sloja otpor difuziji biti različit. Zbog toga se u građevinskoj fizici, za karakteriziranje otpora što ga difuziji vodene pare pruža sloj materijala iz sastava građevnog dijela, koristi umnožak debljine promatranog sloja, d , u metrima, i faktora μ materijala tog sloja. Tu veličinu označavamo simbolom s_d i nazivamo **debljina sloja zraka ekvivalentna difuziji vodene pare**:

$$s_d = \mu \times d \quad (4.99)$$

Debljina sloja zraka ekvivalentna difuziji vodene pare, s_d , u metrima, pokazuje kolika je debljina mirnog sloja zraka koji pruža jednak otpor difuzijskom prolasku vodene pare kao sloj materijala debljine d iz promatranog građevnog dijela zgrade. s_d je, dakle, karakteristika sloja materijala, a μ je karakteristika materijala.

Primjer 4.11

Tko pruža veći otpor difuziji vodene pare: sloj armiranog betona debljine 25 cm ili polietilenska folija debljine 0,20 mm?

Faktor otpora difuziji vodene pare za armirani beton iznosi $\mu = 80$, a za polietilensku foliju $\mu = 100\,000$. Promatrajući samo vrijednosti faktora μ moglo bi se zaključiti da polietilenska folija pruža mnogo veći otpor difuziji vodene pare nego sloj armiranog betona. Međutim za usporedbu su mjerodavne samo vrijednosti s_d koje iznose:

- za armirani beton $s_{d1} = 0,25 \times 80 = 20 \text{ m}$
- za polietilensku foliju $s_{d2} = 0,0002 \times 100\,000 = 20 \text{ m}$

Vidimo da oba sloja pružaju približno jednaki otpor difuziji vodene pare.

Ukupna vrijednost veličine s_d za višeslojni građevni dio koji se sastoji od n ravni međusobno paralelnih slojeva jednaka je zbroju debljina slojeva zraka ekvivalentnih difuziji vodene pare za sve pojedinačne slojeve višeslojnog građevnog dijela

$$s_{d,T} = \mu_1 \times d_1 + \mu_2 \times d_2 + \dots + \mu_n \times d_n = s_{d,1} + s_{d,2} + \dots + s_{d,n} \quad (4.100)$$

Tanke slojeve od vrlo gustog materijala, koje karakterizira vrlo visoka vrijednost s_d i zanemariv toplinski otpor, nazivamo **parne brane**. Ne postoji opća razredba po kojoj bi se neki sloj, ovisno o njegovoj vrijednosti s_d , mogao smatrati parnom branom. S građevinsko-fizikalnog gledišta to ovisi o pojedinim konkretnim situacijama u pogledu sastava građevnih dijelova i klimatskih rubnih uvjeta. Parna brana se umeće u sastav građevnog dijela da bi se smanjio tok vodene pare, odnosno spriječila neželjena veća kondenzacija. Ona se postavlja s tople strane građevnog dijela prije očekivane zone kondenzacije.

Prvi Fickov zakon

1855. godine Adolf Fick je eksperimentalni putem utvrdio zakon difuzije, poznat kao prvi Fickov zakon, koji primijenjen na difuziju vodene pare u mirnom zraku glasi:

$$g = D_0 \times \frac{\Delta v}{\Delta x} \quad (4.101)$$

gdje je

g gustoća difuzijskog toka vodene pare, u $\text{kg}/(\text{m}^2 \times \text{s})$,

D_0 koeficijent difuzije vodene pare u zraku, u m^2/s ,

$\Delta v/\Delta x$ je pad sadržaja vodene pare u zraku, v , u smjeru x , u kg/m^4 .

Koeficijent difuzije vodene pare kroz zrak, D_0 , ovisi o atmosferskom tlaku i temperaturi zraka. Može se izračunati pomoću Schirmerove formule:

$$D_0 = 0,083 \times \left(\frac{101325}{p} \right) \times \left(\frac{T}{273} \right)^{1,81} \quad (4.102)$$

gdje je

p tlak zraka, u Pa,

T termodinamička temperatura zraka, u K.

Brojčana vrijednost koeficijenta difuzije vodene pare u zraku, D_0 , jednaka je gustoći difuzijskog toka vodene pare kroz zrak, g , kod pada sadržaja vlage $\Delta v/\Delta x = 1$.

Uz pretpostavku da je zrak „idealni“ plin, tj. da za njega vrijedi jednačina stanja idealnog plina:

$$p = v \times R_v \times T \quad (4.103)$$

može se kod proračuna gustoće difuzijskog toka vodene pare umjesto sadržaja vodene pare upotrijebiti parcijalni tlak vodene pare. S tom zamjenom u jednačini (4.101) dobije se

$$g = \frac{D_0}{(R_v \times T)} \times \frac{\Delta p}{\Delta x} \quad (4.104)$$

ili kraće pisano

$$g = \delta_0 \times \frac{\Delta p}{\Delta x} \quad (4.105)$$

Veličinu $\delta_0 = D_0 / (R_v \times T)$ nazivamo **koeficijent difuzijske vodljivosti** za difuziju vodene pare u zraku. On ima isto značenje kao i koeficijent difuzije vodene pare kroz zrak, D_0 , ali se primjenjuje onda kada se kao uzrok difuzije koristi pad parcijalnog tlaka vodene pare.

Promatra li se difuzija vodene pare kroz građevne materijale, gustoća difuzijskog toka vodene pare kroz materijal može se izvesti iz jednačine (4.105). U usporedbi s mirnim zrakom građevni materijali pružaju veći otpor difuzijskom kretanju vodene pare. To se uzima u obzir korištenjem faktora otpora difuziji vodene pare građevnog materijala, μ , kao faktora smanjenja gustoće difuzijskog toka kroz materijal. Time jednačina (4.105) prelazi u

$$g = \left(\frac{\delta_0}{\mu} \right) \times \frac{\Delta p}{\Delta x} \quad (4.106)$$

ili

$$g = \delta_0 \times \frac{\Delta p}{s_d} \quad (4.107)$$

Koeficijent difuzijske vodljivosti δ_0 ovisi o temperaturi i atmosferskom tlaku. Kod proračuna difuzije vodene pare kroz građevne dijelove zgrade, može se za područje temperatura koje se susreće u graditeljstvu računati sa srednjom vrijednosti $\delta_0 = 2 \times 10^{-10} \text{ kg/(m} \times \text{s} \times \text{Pa)}$ [67].

Kratak opis metode proračuna difuzije vodene pare i kriteriji za ocjenu građevnog dijela

Molekule vodene pare koje se kreću procesom difuzije unutar građevnog materijala mogu se kondenzirati tj. prijeći u tekuće agregatno stanje. Da li će se to dogoditi ovisi o količini čestica vodene pare i o njihovoj temperaturi. Vjerojatnost kondenzacije raste s porastom broja molekula vodene pare i sa smanjenjem njihove temperature. Stvaranje kondenzata u „manjoj“ količini unutar građevnog dijela zgrade ne mora biti štetno. Ako se, pak, radi o „većoj“ količini kondenzata, može biti ugrožena stabilnost građevnog dijela, a njegova funkcija toplinske zaštite bitno umanjena. Zato je za svaki građevni dio iz toplinske ovojnice zgrade potrebno proračunati difuziju vodene pare tj. utvrditi da li dolazi do kondenzacije vodene pare koja se procesom difuzije kreće kroz građevni dio. Ako se proračunom utvrdi da unutar građevnog dijela zgrade tijekom čitave godine ne dolazi do kondenzacije vodena pare, tada se ocjeni da građevni dio zadovoljava u pogledu difuzije vodene pare i daljnji proračun u vezi s difuzijom nije potreban. U slučaju kad se utvrdi da unutar građevnog dijela zgrade, u nekom razdoblju tijekom godine, dolazi do kondenzacije difundirane vodene pare, potrebno je proračunati količinu kondenzata i ocijeniti opasnost od njegovih negativnih posljedica. Smatra se da građevni dio u kojem dolazi do kondenzacije difundirane vodene pare ipak zadovoljava u pogledu difuzije vodene pare tj. da neće doći do oštećenja materijala ili smanjenja funkcionalnosti, ako su kumulativno ispunjeni slijedeći uvjeti (i drugi propisani uvjeti nacionalnim propisima, ako postoje):

- kondenzirana vodena pare ne smije uzrokovati građevinsku štetu, npr. korozijom, truljenjem,...
- za vrijeme razdoblja sušenja (ljeti) mora se iz građevnog dijela zgrade ispariti sva vlaga kondenzirana tijekom razdoblja kondenzacije (zimi),
- ukupna količina vode unutar građevnog dijela zgrade koja se kondenzirala za vrijeme razdoblja kondenzacije (zimi) ne smije prekoračiti 1 kg/m^2 ploštine građevnog dijela,
- na dodirnim površinama sa slojem koji ne upija vodu (npr. sloj hidroizolacije, parna brana, sloj zraka,...), najveća dozvoljena količina kondenzata iznosi $0,5 \text{ kg/m}^2$ ploštine građevnog dijela,
- sadržaj vlage kod drva smije se povećati za najviše 5 masenih postotaka, a kod materijala na bazi drva (osim kod proizvoda od drvene vune) najviše 3 masena postotka.

Računska analiza procesa difuzije vodene pare kroz građevne dijelove zgrade provodi se tzv. Glaserovom metodom, koja se osniva na opisanom Fickovom zakonu. Metodologija proračuna opisana je u normi HRN EN ISO 13788 [67]. Proračun se provodi zasebno za svaki od dvanaest mjeseci u godini za prosječne rubne uvjete s vanjske i unutarnje strane građevnog dijela. Zbog pojednostavnjenja se prihvaćaju slijedeće pretpostavke:

- uvjeti prijenosa topline su jednodimenzionalni i stacionarni,
- fizikalna svojstva materijala smatraju se konstantnim tj. neovisnim o sadržaju vlage u materijalu i o temperaturi materijala,
- prijenos vlage u materijalu događa se samo procesom difuzije vodene pare (bez kapilarnog upijanja vlage i prijenosa vlage u tekućem agregatnom stanju),
- nema prijenosa vlage konvekcijom vlage kroz pukotine, zračne prostore i sl.,

- rubni uvjeti su konstantni tijekom proračunskog mjeseca,
- nije uzet u obzir utjecaj Sunčevog zračenja i dugovalnog zračenja vanjske površine građevnog dijela.

Zbog navedenih pojednostavnjenja, u nastavku opisana metoda proračuna godišnje bilance vlage i najveće količine akumulirane vlage uslijed kondenzacije difundirane vodene pare unutar građevnog dijela zgrade, više je upotrebljiva za ocjenu i usporedbu različitih rješenja građevnih dijelova nego za točan izračun parametara vlage.

Proračun započne s prvim mjesecom u godini u kojem dolazi do kondenzacije vodene pare koja je difuzijom dospjela unutar građevnog dijela zgrade. Proračuna se ukupna akumulirana masa kondenzata na kraju mjeseci u kojima je bilo kondenzacije i uspoređi s ukupnom mogućom masom isparene vode iz građevnog dijela za vrijeme ostalih mjeseci u godini.

Temperaturna krivulja, krivulja tlaka zasićene pare i krivulja parcijalnog tlaka vodene pare

Kod proračuna svaki se sloj višeslojnog građevnog dijela mora promatrati kao zaseban sloj. Slojeve s velikim toplinskim otporom, kao što su to toplinsko-izolacijski slojevi, preporuča se podijeliti u određeni broj tanjih slojeva, svaki s jednakim toplinskim otporom, ne većim od $0,25 \text{ m}^2 \times \text{K/W}$. Kod proračuna se svi slojevi podpodjele tretiraju ravnopravno kao zasebni slojevi materijala. Za svaki pojedini sloj izračuna se njegov toplinski otpor, R_j , i debljina sloja zraka ekvivalentna difuziji vodene pare, $s_{d,j}$. Za materijale koji potpuno sprječavaju prolazak vodene pare i stoga imaju vrijednost $\mu = \infty$, kod proračuna se uzima vrijednost $\mu = 100\,000$. Eventualno male količine kondenzata, koje se u ovom slučaju kod proračuna dobiju, mogu se zanemariti, jer su one rezultat netočnosti proračunske metode uzrokovane pojednostavnjenjima.

Ako građevni dio sadrži sloj zraka dobro ventiliran prema van (vidjeti točku 4.2.3), slojevi između sloja zraka i vanjskog prostora ne uzimaju se u proračun. Za temperaturu i tlak vodene pare u zračnom sloju pretpostavlja se da odgovaraju onima za vanjski zrak. Vrijednost otpora prijelaza topline s vanjske strane građevnog dijela prema sloju zraka uzima se da je jednaka onoj s unutarnje strane prema tablici 4.3 u skladu sa smjerom toplinskog toka.

Ako se građevni dio sastoji od toplinski nehomogenih slojeva (npr. kosi krov s drvenim rogovima), tada se proračun difuzije vodene pare treba provesti za svaki odsječak građevnog dijela s različitim slojevima.

Utvrđivanje da li dolazi do kondenzacije vodene pare koja je difuzijom dospjela unutar građevnog dijela provodi se kombinirano: grafički i računski.

Najprije treba odrediti temperaturnu krivulju. U tu svrhu nacrtava se presjek građevnog dijela na način da se svaki njegov sloj j predstavi s njegovim toplinskim otporom, R_j , (vidjeti sliku 4.17 a). Slojevi se numeriraju izvana prema unutra, redoslijedom kako dolaze. Prvi sloj je sloj uz vanjsku površinu građevnog dijela. Izračuna se suma toplinskih otpora, R'_n , između vanjske strane građevnog dijela i svake granične površine n između pojedinih slojeva:

$$R'_n = R_{se} + \sum_{(od\ j=1\ do\ j=n)} R_j \quad (4.108)$$

R'_n je zbroj otpora vanjskog prijelaza topline i toplinskih otpora dijela slojeva, počevši s prvim slojem do uključivo n -tog sloja građevnog dijela (brojeći slojeve izvana prema unutra), u $\text{m}^2 \times \text{K/W}$.

Ukupni toplinski otpor građevnog dijela iznosi:

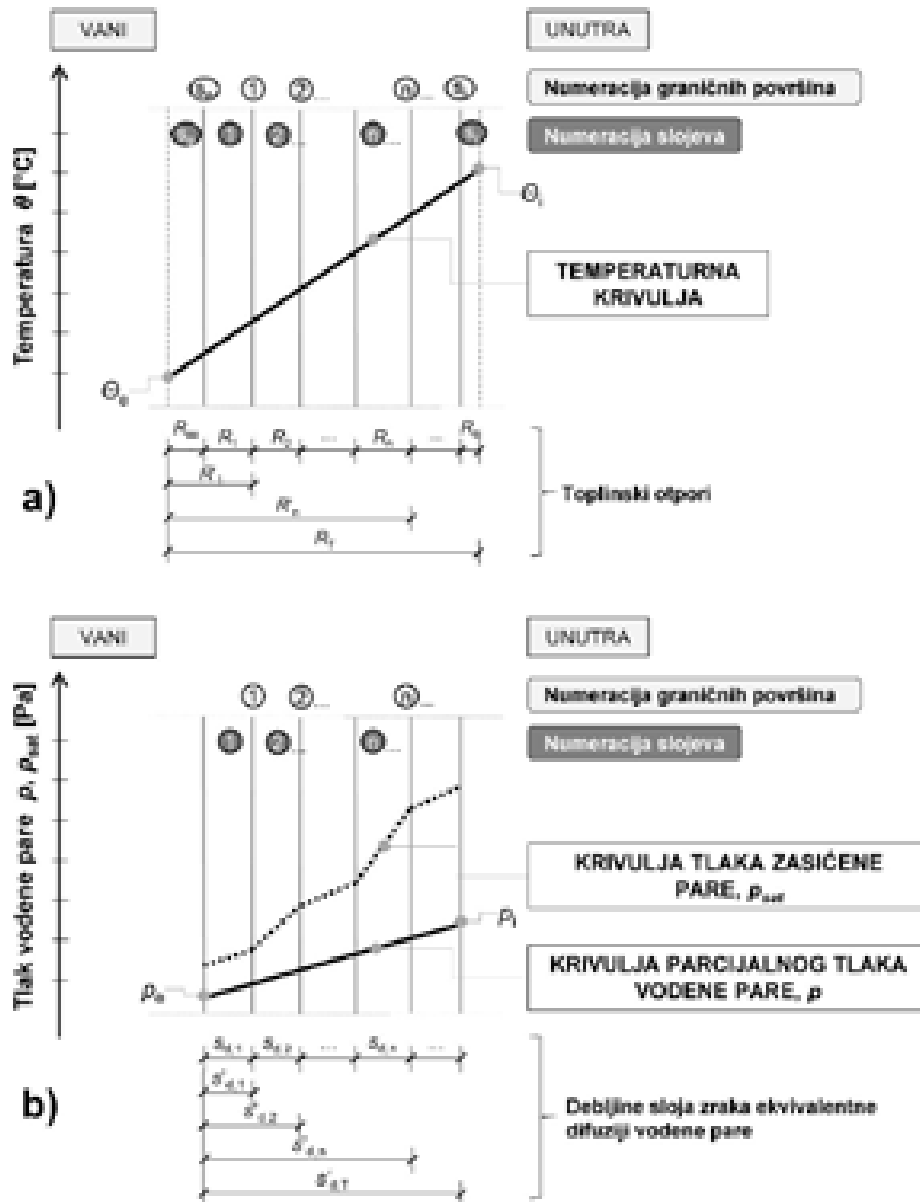
$$R_T = R_{se} + \sum_{(od\ j=1\ do\ j=N)} R_j + R_{si} \quad (4.109)$$

Ovdje je $R_j = d/\lambda_j$ toplinski otpor j -tog sloja, u $\text{m}^2 \times \text{K/W}$, a N je ukupni broj slojeva. Pomoću gore izračunatih toplinskih otpora izračunavaju se temperature na svakoj graničnoj površini između pojedinih slojeva prema izrazu:

$$\theta_n = \theta_e + \left(\frac{R'_n}{R_T} \right) \times (\theta_i - \theta_e) \quad (4.110)$$

θ_n je temperatura na graničnoj površini nakon n -tog sloja građevnog dijela (brojeći slojeve izvana prema unutra).

Raspodjela temperature u svakom sloju je linearna jer su pretpostavljeni stacionarni uvjeti.



a) poprečni presjek u mjerilu toplinskog otpora

b) poprečni presjek u mjerilu debljine sloja zraka ekvivalentne difuzije vodene pare

Slika 4.17 Shematski prikaz crteža poprečnog presjeka građevnog dijela zgrade i način numeracije slojeva i graničnih površina

Slijedeći proračunski korak je određivanje krivulje tlaka zasićene vodene pare. Iz temperature na svakoj graničnoj površini između pojedinih slojeva izračuna se tlak zasićene vodene pare, p_{sat} , pomoću izraza (4.66) ili (4.67) i unese u crtež poprečnog presjeka

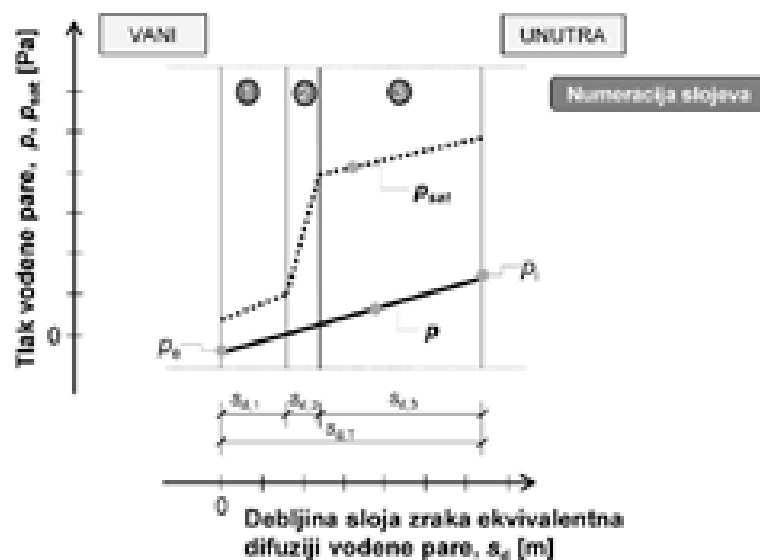
građevnog dijela u kojem su slojevi umjesto svojom debljinom predstavljeni s odgovarajućom debljinom sloja zraka ekvivalentnoj difuziji vodene pare, s_d , (vidjeti sliku 4.17 b). Povuku se ravne linije koje povezuju tlakove zasićene pare, p_{sat} , na svakoj graničnoj površini između pojedinih slojeva. Dobivena krivulja naziva se **krivulja tlaka zasićene pare**. Sada je još potrebno u presjek ucrtati **krivulju parcijalnog tlaka vodene pare**.

Pod pretpostavkom da se parcijalni tlak vodene pare unutarnjeg i vanjskog zraka ne mijenja kroz duže vremensko razdoblje te da su kapilare i pore materijala građevnog dijela zgrade „relativno suhe“, parcijalni tlak vodene pare unutar građevnog dijela prilagodi se otporima difuzije vodene pare pojedinih slojeva s_d , a unutar građevnog dijela uspostavi se stalna gustoća difuzijskog toka vodene pare, g . Ako ne postoji nakupljeni kondenzat iz prethodnog mjeseca, krivulja parcijalnog tlaka vodene pare dobije se tako da se u poprečnom presjeku građevnog dijela spoje ravnom linijom točke koje prikazuju tlakove unutarnjeg i vanjskog zraka, p_i i p_e , u Pa:

$$p_i = \varphi_i \times p_{sat,i} \quad (4.111)$$

$$p_e = \varphi_e \times p_{sat,e} \quad (4.112)$$

Ako ta krivulja niti na jednoj dodirnoj ravnini između slojeva ne prelazi tlak zasićene vodene pare, to znači da unutar građevnog dijela ne dolazi do kondenzacije difundirane vodene pare. Parcijalni tlak vodene pare u svakoj točki unutar građevnog dijela manji je od tlaka zasićene pare. Primjer krivulje tlaka zasićene vodene pare i krivulje parcijalnog tlaka vodene pare kad ne dolazi do kondenzacije, prikazan je na slici 4.18.



Slika 4.18 Primjer krivulje tlaka zasićene vodene pare, p_{sat} , i krivulje parcijalnog tlaka vodene pare, p , za slučaj kad nema kondenzacije vodene pare unutar građevnog dijela zgrade

Vrijednost parcijalnog tlaka vodene pare, p_n , u Pa, na graničnoj površini između dva sloja (nakon n -tog sloja građevnog dijela, brojeći slojeve izvana prema unutra) proračuna se pomoću izraza:

$$p_n = p_e + (p_i - p_e) \times \frac{s'_{d,n}}{s_{d,T}} \quad (4.113)$$

gdje je:

p_i parcijalni tlak vodene pare unutarnjeg zraka, u Pa,

p_e parcijalni tlak vodene pare vanjskog zraka, u Pa,

$s_{d,T}$ ukupna debljina sloja zraka ekvivalentna difuziji vodene pare za građevni dio, u m.

$s'_{d,n} = \mu_1 \times d_1 + \mu_2 \times d_2 + \dots + \mu_n \times d_n$ je zbroj debljina sloja zraka ekvivalentnih difuziji vodene pare počevši s prvim slojem do uključivo n -tog sloja građevnog dijela (brojeći slojeve izvana prema unutra), u metrima.

Za slučaj prikazan na slici 4.18 gustoća difuzijskog toka vodene pare, g , u $\text{kg}/(\text{m}^2 \times \text{s})$, dana je izrazom:

$$g = \delta_0 \times \frac{(p_i - p_e)}{s_{d,T}} \quad (4.114)$$

gdje je:

$\delta_0 = 2 \times 10^{-10} \text{ kg}/(\text{m} \times \text{s} \times \text{Pa})$ srednja približna vrijednost koeficijenta difuzijske vodljivosti za difuziju vodene pare u zraku,

p_i parcijalni tlak vodene pare za unutarnji zrak, u Pa,

p_e parcijalni tlak vodene pare za vanjski zrak, u Pa,

$s_{d,T}$ ukupna debljina sloja zraka ekvivalentna difuziji vodene pare za građevni dio, u m.

Ako krivulja parcijalnog tlaka vodene pare prelazi krivulju tlaka zasićenja u bilo kojoj dodirnoj ravnini između slojeva tada treba popraviti oblik krivulje parcijalnog tlaka. Parcijalni tlak vodene pare niti u jednoj točki poprečnog presjeka ne može biti veći od tlaka zasićene pare. Zato se u svim dodirnim ravninama u kojima je $p_n > p_{\text{sat}}$ stavi da je $p_n = p_{\text{sat}}$.

Ako je $p_n > p_{\text{sat},n}$, izraz (4.113) za proračun parcijalnog tlaka vodene pare u spojnim ravninama treba ispraviti na način prikazan u nastavku.

Ako je $p_1 > p_{\text{sat},1}$ onda vrijedi:

$$p_1 = p_{\text{sat},1}$$

i

$$p_2 = p_1 + (p_i - p_1) \times s_{d,2} / (s_{d,T} - s'_{d,1})$$

$$p_3 = p_1 + (p_i - p_1) \times (s_{d,2} + s_{d,3}) / (s_{d,T} - s'_{d,1})$$

$$p_4 = p_1 + (p_i - p_1) \times (s_{d,2} + s_{d,3} + s_{d,4}) / (s_{d,T} - s'_{d,1}) \text{ itd.} \quad (4.115)$$

gdje je $s'_{d,1} = s_{d,1}$

Ako je i $p_2 > p_{\text{sat},2}$ onda vrijedi:

$$p_2 = p_{\text{sat},2}$$

i

$$p_3 = p_2 + (p_i - p_2) \times s_{d,3} / (s_{d,T} - s'_{d,2})$$

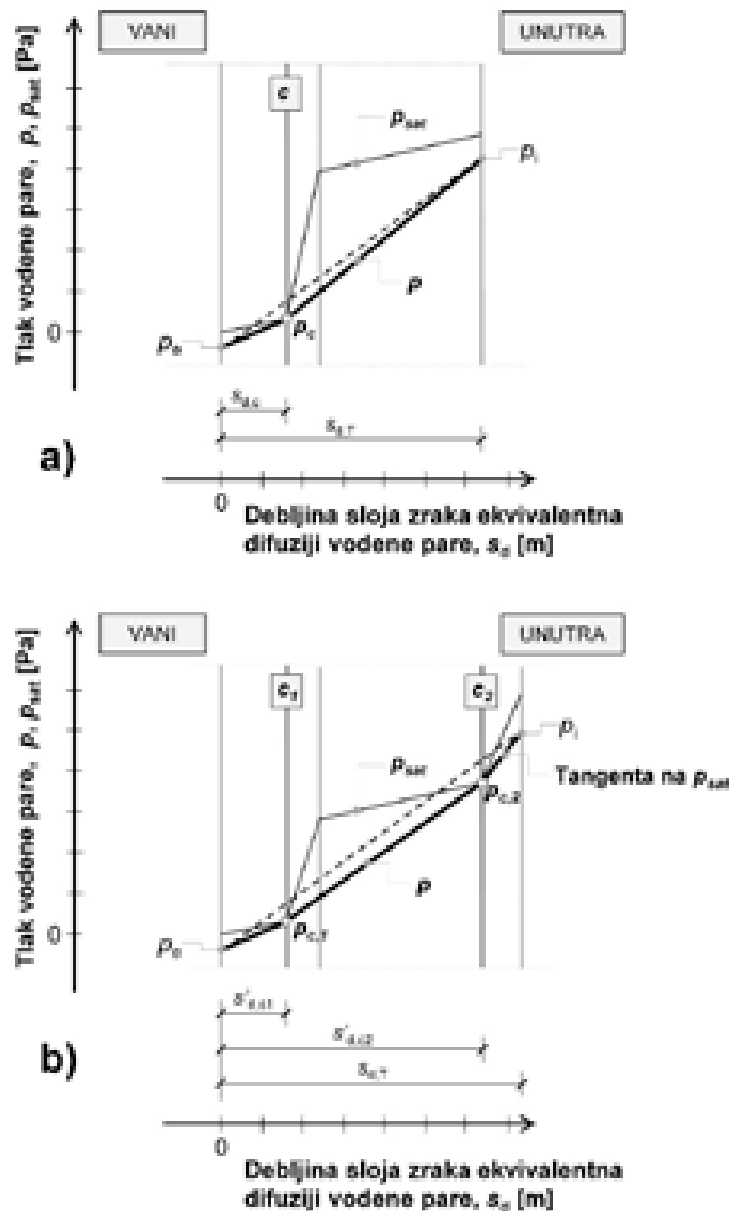
$$p_4 = p_2 + (p_i - p_2) \times (s_{d,3} + s_{d,4}) / (s_{d,T} - s'_{d,2}) \text{ itd.} \quad (4.116)$$

gdje je $s'_{d,2} = s_{d,1} + s_{d,2}$

Grafički to znači da će se krivulja parcijalnog tlaka vodene pare sastojati od niza ravnih linija koje, u što je moguće manje točaka, dodiruju ali ne prelaze krivulju tlaka zasićene pare. U tu svrhu se iz točaka p_i i p_e povuku tangente na krivulju tlaka zasićene pare. Dobivene dodirne točke predstavljaju ravnine kondenzacije tj. granične ravnine u kojima nastaje kondenzat. U tom slučaju izraze (4.115) i (4.116) treba prilagoditi stvarnom izgledu krivulje parcijalnog tlaka vodene pare.

Kod proračuna kondenzata unutar građevnog dijela zgrade treba razlikovati dva slučaja:

- kondenzaciju u jednoj dodirnoj ravnini,
- kondenzaciju u dvije ili više dodirnih ravnina.



- a) kondenzacija u jednoj dodirnoj ravnini
- b) kondenzacija u dvije dodirne ravnine

Slika 4.19 Difuzija vodene pare u višeslojnom građevnom dijelu s kondenzacijom unutar građevnog dijela

Proračun količine kondenzirane vodene pare unutar građevnog dijela

U slučaju kondenzacije u jednoj dodirnoj ravnini (vidjeti sliku 4.19 a) količina kondenzirane vode, g_c , u $\text{kg}/(\text{m}^2 \times \text{s})$, jednaka je razlici između gustoće difuzijskog toka koji dolazi do ravnine kondenzacije i gustoće difuzijskog toka koji je odveden od ravnine kondenzacije prema van:

$$g_c = \delta_0 \times \left[\frac{(p_i - p_c)}{(s_{d,T} - s'_{d,c})} - \frac{(p_c - p_e)}{s'_{d,c}} \right] \quad (4.117)$$

Značenje novo uvedenih simbola vidljivo je iz slike 4.19 a.

Masa kondenzirane količine vode, M_c , u kg/m^2 ploštine građevnog dijela iznosi:

$$M_c = g_c \times t_c \quad (4.118)$$

gdje je t_c vrijeme trajanja kondenzacije u sekundama (proračunski korak: mjesec dana).

U slučaju kondenzacije u dvije ili više dodirnih ravnina količina kondenzirane vode, g_c , u $\text{kg}/(\text{m}^2 \times \text{s})$, i ukupna masa kondenzirane vode, M_c , u kg/m^2 , proračunaju se za svaku dodirnu ravninu kondenzacije iz razlike nagiba uzastopnih ravnih linija krivulje parcijalnog tlaka vodene pare. Za dvije dodirne ravnine kondenzacije (vidjeti sliku 4.19 b) vrijede izrazi:

- za dodirnu ravninu c1:

$$g_{c1} = \delta_0 \times \left[\frac{(p_{c2} - p_{c1})}{(s'_{dc2} - s'_{dc1})} - \frac{(p_{c1} - p_e)}{s'_{dc1}} \right] \quad (4.119)$$

$$M_{c1} = g_{c1} \times t_c \quad (4.120)$$

- za dodirnu ravninu c2:

$$g_{c2} = \delta_0 \times \left[\frac{(p_i - p_{c2})}{(s_{dT} - s'_{dc2})} - \frac{(p_{c2} - p_{c1})}{(s'_{dc2} - s'_{dc1})} \right] \quad (4.121)$$

$$M_{c2} = g_{c2} \times t_c \quad (4.122)$$

Ukupna masa kondenzata po m^2 ploštine građevnog dijela iznosi:

$$M_c = M_{c1} + M_{c2} \quad (4.123)$$

Značenje novo uvedenih simbola vidljivo je iz slike 4.19 b.

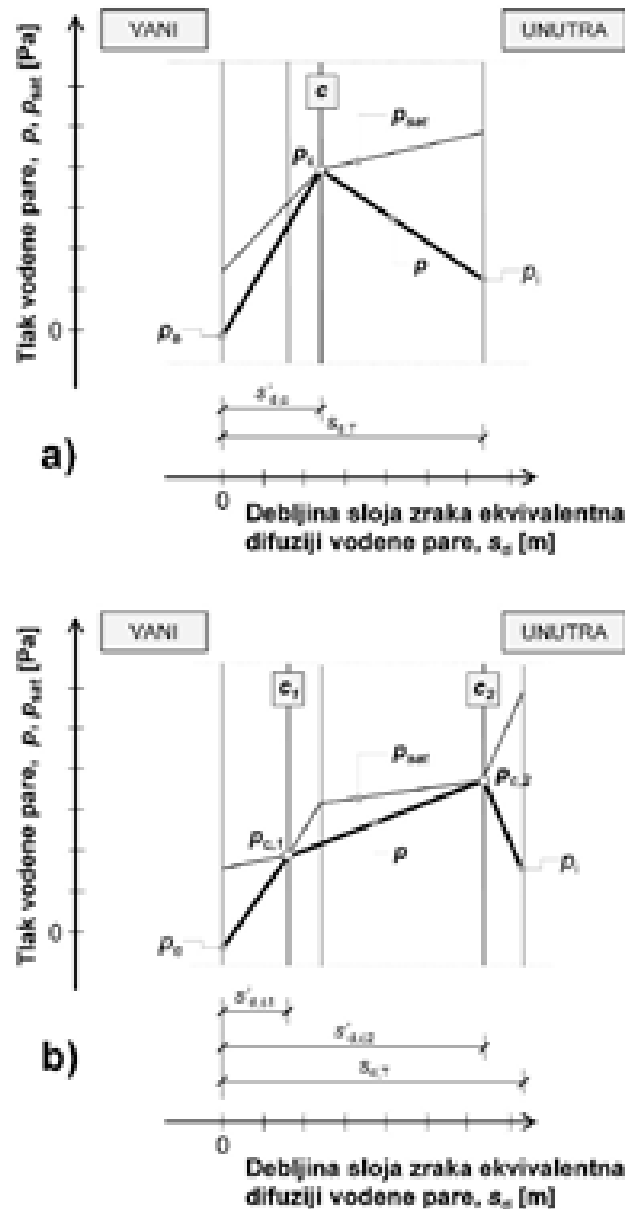
Dodirne ravnine određene točkama tangente p_{c1} i p_{c2} ograničavaju područje unutar kojeg dolazi do kondenzacije. p_{c1} i p_{c2} su tlakovi zasićene pare na granicama zone kondenzacije.

Najveća akumulirana količina kondenzata unutar građevnog dijela tijekom jedne godine dana je izrazom:

$$M_{a,\max} = \Sigma M_c \text{ za sve mjesece u godini za koje je } g_c > 0 \quad (4.124)$$

Proračun isparavanja vodene pare iz građevnog dijela

Nakupi li se kondenzat tijekom jednog ili više mjeseci na jednoj ili više graničnih površina, tlak pare na toj graničnoj površini mora biti jednak tlaku zasićene pare, a krivulja parcijalnog tlaka vodene pare se nacrtava spajajući ravnom linijom vrijednosti parcijalnog tlaka vodene pare sa strane prostorije, graničnih površina s kondenzatom i parcijalnog tlaka vodene pare s vanjske strane građevnog dijela (vidjeti sliku 4.20).



a) Kondenzacija u jednoj graničnoj ravnini

b) Kondenzacija u dvije granične ravnine

Slika 4.20 Isparavanje vodene pare iz građevnog dijela s kondenzacijom unutar građevnog dijela

Gustoća toka vodene pare koja se isparava, g_{ev} , u $\text{kg}/(\text{m}^2 \times \text{s})$, u slučaju jedne dodirne ravnine (vidjeti sliku 4.20 a), iznosi:

$$g_{ev} = \delta_0 \times \left[\frac{(p_i - p_c)}{(s'_{d,T} + s'_{d,c})} + \frac{(p_c - p_e)}{s'_{d,c}} \right] \quad (4.125)$$

Masa najveće moguće količine isparene vode, M_{ev} , u kg/m^2 ploštine građevnog dijela, iznosi:

$$M_{ev} = g_{ev} \times t_{ev} \quad (4.126)$$

gdje je

t_{ev} vrijeme trajanja isparavanja u sekundama (proračunski korak: mjesec dana).

Izraz (4.125) za isparavanje i izraz (4.117) za kondenzaciju su jednaki. Do kondenzacije dolazi ako je vrijednost dobivena tim izrazima pozitivna, a do isparavanja ako je vrijednost negativna.

U građevnom dijelu s više od jedne dodirne ravnine s nastajanjem kondenzata, moguća količina isparene vode se odvojeno izračuna za svaku dodirnu ravninu. Za slučaj dvije dodirne ravnine kondenzacije (vidjeti sliku 4.20 b) vrijede izrazi:

- za dodirnu ravninu c1:

$$g_{ev,c1} = \delta_0 \times \left[\frac{(p_{c2} - p_{c1})}{(s'_{d,c2} - s'_{d,c1})} - \frac{(p_{c1} - p_e)}{s'_{d,c1}} \right] \quad (4.127)$$

$$M_{ev,c1} = g_{ev,c1} \times t_{ev} \quad (4.128)$$

- za dodirnu ravninu c2:

$$g_{ev,c2} = \delta_0 \times \left[\frac{(p_i - p_{c2})}{(s_{dT} - s'_{d,c2})} - \frac{(p_{c2} - p_{c1})}{(s'_{d,c2} - s'_{d,c1})} \right] \quad (4.129)$$

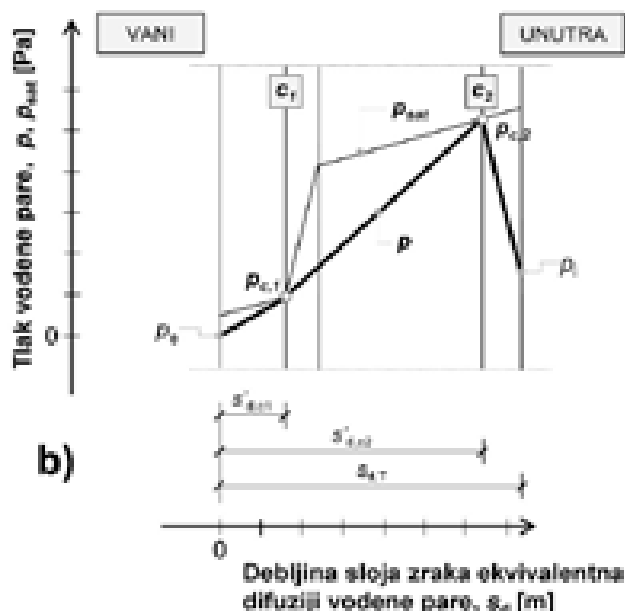
$$M_{ev,c2} = g_{ev,c2} \times t_{ev} \quad (4.130)$$

Značenje simbola u gornjim izrazima vidljivo je iz slike 4.20 b.

Izrazi za isparavanje (4.127) i (4.129) te izrazi za kondenzaciju (4.119) i (4.121) su jednaki. Do kondenzacije dolazi ako je vrijednost dobivena navedenim izrazima pozitivna, a do isparavanja ako je vrijednost negativna.

Ako izračunata akumulirana količina kondenzata u nekoj dodirnoj ravnini na kraju mjeseca ima negativnu vrijednost, dodijeli joj se vrijednost nula. Alternativno se može proračunati vrijeme (dio mjeseca) koje je potrebno za isparavanje akumuliranog kondenzata.

U građevnom dijelu s više od jedne dodirne ravnine kondenzacije, moglo bi u nekim mjesecima doći do kondenzacije u jednoj ravnini i isparavanja u drugoj ravnini (vidjeti sliku 4.21).



Slika 4.21 Isparavanje u jednoj graničnoj površini i kondenzacija u drugoj graničnoj površini, u građevnom dijelu kod kojeg do kondenzacije dolazi u dvije granične površine

Količina kondenzacije, g_c , u $\text{kg}/(\text{m}^2 \times \text{s})$, ili količina isparavanja, g_{ev} , u $\text{kg}/(\text{m}^2 \times \text{s})$, izračunaju se za svaku dodirnu ravninu posebno:

- za dodirnu ravninu $c1$ (kondenzacija):

$$g_c = \delta_0 \times \left[\frac{(p_{c2} - p_{c1})}{(s'_{d\ c2} - s'_{d\ c1})} - \frac{(p_{c1} - p_e)}{s'_{d\ c1}} \right] \quad (4.131)$$

- za dodirnu ravninu $c2$ (isparavanje):

$$g_{ev} = \delta_0 \times \left[\frac{(p_i - p_{c2})}{(s_{dT} - s'_{d\ c2})} - \frac{(p_{c2} - p_{c1})}{(s'_{d\ c2} - s'_{d\ c1})} \right] \quad (4.132)$$

Određivanje početnog mjeseca za proračun

Opisani proračun difuzije vodene pare kroz građevni dio zgrade treba provesti za svaki mjesec u godini. Proračun započne s tzv. početnim mjesecom. To je prvi mjesec u kojem nastaje kondenzat unutar građevnog dijela tj. u mjesecu ispred početnog nema kondenzacije vodene pare. Da bi se utvrdio početni mjesec postupa se na slijedeći način:

- provede se proračun difuzije vodene pare za bilo koji mjesec u godini (pokusni mjesec). Ako u tom mjesecu nema kondenzacije, proračun se nastavi po redu sa slijedećim mjesecima jednim za drugim sve dok se ne pronađe mjesec s kondenzacijom. Taj mjesec je početni mjesec. Ako ni za jedan od dvanaest mjeseci nije nađena kondenzacija, zaključuje se da unutar građevnog dijela ne dolazi do kondenzacije difundirane vodene pare tj. da građevni dio zadovoljava u pogledu difuzije vodene pare.
- Ako se proračunom za pokusni mjesec utvrdi da u njemu dolazi do kondenzacije vodene pare, ponovi se proračun uzastopno unatrag za prethodne mjesece sve dok nije pronađen mjesec bez kondenzacije. Tada se slijedeći mjesec uzima kao početni mjesec za proračun. Ako je kondenzacija utvrđena u svih dvanaest mjeseci tada počevši s bilo kojim mjesecom izračunamo ukupnu godišnju količinu kondenzata kako je ranije opisano.
- Kad je početni mjesec određen, provedu se proračuni difuzije vodene pare kako je gore opisano za svaki mjesec u godini počevši s početnim mjesecom.

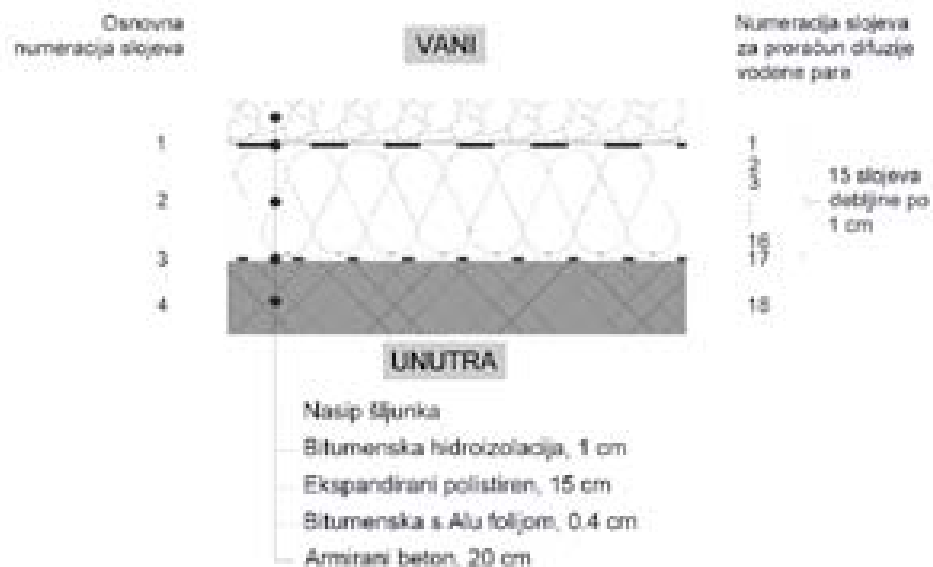
Početni mjesec najbrže se može odrediti ako se kao probni mjesec odabere mjesec koji je za dva ili tri mjeseca ispred najhladnijeg mjeseca u godini.

Određivanje godišnje bilance vlage

Nakon proračuna difuzije vodene pare po mjesecima izračuna se najveća količina kondenzirane vode tijekom jedne godine i napravi se godišnja bilanca vlage. Bilanca vlage se provodi na način da se ukupna masa kondenzirane vode na kraju onih mjeseci u kojima je došlo do kondenzacije usporedi s ukupnim mogućim isparavanjem tijekom preostalog dijela godine. Ako je bilanca vlage pozitivna tj. ako se tijekom godine više vlage kondenzira nego što se ispari, vlažnost građevnog materijala će iz godine u godinu stalno rasti. Projektirani građevni dio, u tom slučaju, ne zadovoljava u pogledu difuzije vodene pare. Ako je, pak, bilanca vlage negativna tj. ako tijekom godine iz građevnog dijela može ispariti više vlage nego što se u njemu tijekom godine kondenzira, vodena para kondenzirana tijekom mjeseci u kojima dolazi do kondenzacije, svake godine se i isušuje. U tom slučaju, građevni dio zadovoljava kriterij isušivanja kondenzirane difuzijske vodene pare.

Primjer 4.12

Ravni krov sastava prema slici 4.22 potrebno je provjeriti da li zadovoljava u pogledu difuzije vodene pare. Rubni uvjeti s vanjske i unutarnje strane koje kod proračuna treba koristiti dani su u tablici 4.17. Temperatura unutarnjeg zraka određena je prema dijagramu na slici 4.12, a relativna vlažnost unutarnjeg zraka pomoću dijagrama na slici 4.14, za slučaj jačeg opterećenja vlagom.



Slika 4.22 Presjek ravnog krova iz primjera 4.12

Tablica 4.17 Vanjski i unutarnji rubni uvjeti za proračun difuzije vodene pare kroz ravni krov iz primjera 4.12

Mjesec	Zrak izvana		Zrak iznutra	
	Temperatura, θ_e °C	Rel. vlažnost, φ_e -	Temperatura, θ_i °C	Rel. vlažnost, φ_i -
Siječanj	0,5	0,79	20,0	0,51
Veljača	3,1	0,73	20,0	0,53
Ožujak	7,3	0,65	20,0	0,57
Travanj	11,8	0,61	20,9	0,62
Svibanj	16,3	0,64	23,2	0,66
Lipanj	19,3	0,67	24,7	0,69
Srpanj	21,3	0,65	25,0	0,70
Kolovoz	20,6	0,68	25,0	0,70
Rujan	17,0	0,73	23,5	0,67
Listopad	11,9	0,76	21,0	0,62
Studen	6,4	0,79	20,0	0,56
Prosinac	2,0	0,80	20,0	0,52

U tablici 4.18 prikazan je proračun toplinskih svojstava ravnog krova potrebnih za daljnji proračun difuzije vodene pare. Numeracija slojeva ravnog krova ide izvana prema unutra.

Tablica 4.18 Proračun toplinskih svojstava ravnog krova

Redni broj sloja	Materijal sloja	d m	μ -	$s_d = d \times \mu$ m	λ W/(m×K)	R m ² ×K/W
	R_{se}					0,040
1	Bitumenska hidroizolacija	0,010	50 000	500	0,230	0,043
2	Ekspandirani polistiren (EPS)	0,150	60	9	0,040	3,750
3	Bitumenska traka s alu folijom	0,004	100 000	400	0,170	0,024
4	Armirani beton	0,200	80	16	2,600	0,077
	R_{si}					0,100
Zbroj		$d_T = 0,364$		$s_{d,T} = 925$		$R_T = 4,0 \times 34$
Karakteristike građevnog dijela zgrade:						
Ukupna debljina					$d_T = 0,364$ m	
Ukupna s_d - vrijednost					$s_{d,T} = 925$ m	
Ukupni otpor prolasku topline					$R_T = 4,034$ m ² ×K/W	
Koeficijent prolaska topline					$U = 0,248$ W/(m ² ×K)	

Budući da je otpor prolasku topline sloja od ekspandiranog polistirena veći od 0,25 m²×K/W, sloj će se podijeliti u 15 tanjih slojeva, debljine po 1 cm.

Proračun difuzije vodene pare proveden je za svaki od dvanaest mjeseci u godini. Početni mjesec je studeni. U tablici 4.19 dan je detaljan ispis proračuna temperaturne krivulje (jednadžbe (4.108) do (4.110)), krivulje tlaka zasićene pare (jednadžba (4.65) i krivulje parcijalnog tlaka vodene pare za mjesec prosinac (jednadžbe (4.113), (4.115) i (4.116)). Jednaku tablicu treba napraviti za svaki mjesec u godini. Parcijalni tlak vodene pare unutarnjeg i vanjskog zraka u prosincu je

$$p_i = 0,52 \times 2\,337 = 1\,215 \text{ Pa}$$

$$p_e = 0,80 \times 705 = 564 \text{ Pa}$$

Tablica 4.19 Proračun temperaturne krivulje, krivulje tlaka zasićene pare i krivulje parcijalnog tlaka vodene pare za mjesec prosinac, za ravni krov iz primjera 4.12 (j je redni broj sloja, n je redni broj granične plohe između slojeva)

Broj sloja	Materijal sloja	d_j m	R_j m ² ×K/W	R'_n m ² ×K/W	θ_n °C	$p_{sat,n}$ Pa	$s_{d,j}$ m	$S'_{d,n}$ m	p_n Pa
	Vanjski zrak				2,00	705			
	R_{se}		0,040	0,040	2,18	714			564
1	Hidroizolacija	0,010	0,043	0,083	2,37	724	500,0	500,0	916 724
2	EPS	0,010	0,250	0,333	3,49	783	0,6	500,6	725
3	EPS	0,010	0,250	0,583	4,60	847	0,6	501,2	725

4	EPS	0,010	0,250	0,833	5,72	915	0,6	501,8	726
5	EPS	0,010	0,250	1,083	6,83	987	0,6	502,4	727
6	EPS	0,010	0,250	1,333	7,95	1 065	0,6	503,0	727
7	EPS	0,010	0,250	1,583	9,06	1 148	0,6	503,6	728
8	EPS	0,010	0,250	1,833	10,18	1 237	0,6	504,2	729
9	EPS	0,010	0,250	2,083	11,29	1 332	0,6	504,8	730
10	EPS	0,010	0,250	2,333	12,41	1 433	0,6	505,4	730
11	EPS	0,010	0,250	2,583	13,53	1 541	0,6	506,0	731
12	EPS	0,010	0,250	2,833	14,64	1 655	0,6	506,6	732
13	EPS	0,010	0,250	3,083	15,76	1 778	0,6	507,2	732
14	EPS	0,010	0,250	3,333	16,87	1 908	0,6	507,8	733
15	EPS	0,010	0,250	3,583	17,99	2 046	0,6	508,4	734
16	EPS	0,010	0,250	3,833	19,10	2 193	0,6	509,0	734
17	Parna brana	0,004	0,024	3,857	19,21	2 208	400,0	909,0	1 197
18	Armirani beton	0,200	0,077	3,934	19,55	2 255	16,0	925,0	1 215
	R_{si}		0,100	4,034	20,00	2 337			
	Unutarnji zrak				20,00	2 337			

Do kondenzacije vodene pare dolazi u graničnoj površini 1 tj. između prvog i drugog sloja (sloja hidroizolacije i ekspaniranog polistirena). U tablici 4.20 dani su rezultati proračuna kondenzacije i isušivanja vodene pare po mjesecima tijekom godine. Iz tablice je vidljivo da do kondenzacije vodene pare dolazi u zimskim mjesecima od studenog do ožujka, a do isparavanja tog kondenzata tijekom proljeća i ljeta tj. od travnja do kolovoza. Najveća akumulirana količina kondenzata u ravnom krovu je krajem mjeseca ožujka i iznosi 0,002 kg/m² što je manje od dopuštene vrijednosti koja iznosi 0,5 kg/m². Sva količina kondenzata koji se sakupi tijekom zime ispari se tijekom ljeta tj. bilanca vlage je negativna. Analizirani ravni krov, za dane klimatske uvjete, ocjenjuje se zadovoljavajućim u pogledu difuzije vodene pare.

Tablica 4.20 Mjesečni iznosi kondenzacije vodene pare, M_c , i akumulirana količina kondenzata, M_a , u ravni kondenzacije 1

Mjesec	Granična površina 1	
	M_c kg/m ²	M_a kg/m ²
Studen	0,00029	0,00029
Prosinac	0,00053	0,00082
Siječanj	0,00060	0,00142
Veljača	0,00041	0,00183
Ožujak	0,00017	0,00200

Travanj	-0,00013	0,00187
Svibanj	-0,00036	0,00151
Lipanj	-0,00052	0,00099
Srpanj	-0,00089	0,00010
Kolovoz	-0,00070	0,00000
Rujan	0,00000	0,00000
Listopad	0,00000	0,00000

4.4 Toplinski mostovi u građevnim dijelovima zgrade

4.4.1 Definicija toplinskog mosta

Općenito se mostom naziva građevina kojom se neka prometnica (cesta, željeznička pruga, pješački hodnik,...) prevodi preko neke prepreke (rijeke, doline, druge prometnice,...). Most uvijek služi da bi se preko njega odvijao neki promet: automobila, vlakova, ljudi,... U skladu s tim i toplinski most služi za „promet“ topline, koji se stručno naziva prijenos topline i karakterizira gustoćom toplinskog toka. Toplinskim mostom koji se nalazi u građevnom dijelu zgrade prolazi mnogo više topline tj. tu je veća gustoća toplinskog toka nego kroz područje građevnog dijela koje se nalazi oko toplinskog mosta.

U običnom govoru često se toplinski most naziva i „hladni most“, jer je temperatura unutarnje površine toplinskog mosta redovito niža od površinske temperature preostalog područja građevnog dijela. Ponekad se za toplinski most koristi i naziv „temperaturni most“. Međutim, u službenoj komunikaciji treba koristiti naziv „toplinski most“.

Toplinski most je prostorno ograničeno područje u toplinskoj ovojnici zgrade kroz koje je povećana gustoća toplinskog toka u usporedbi sa susjednim prostorno prevladavajućim područjem ovojnice zgrade. Do ovog povećanja gustoće toplinskog toka dolazi zbog poremećaja u geometriji ili sastavu ovojnice zgrade na tom mjestu u odnosu na tipičan neporemećeni dio.

Da bi se jednoznačno moglo odrediti da li uopće postoji toplinski most i gdje su njegove granice, gornja definicija toplinskog mosta nije dovoljna. Za odgovor na postavljeno pitanje potrebno je pobliže analizirati transmisijski toplinski tok kroz ovojnicu zgrade.

Toplina se iz grijanog prostora zgrade prenosi transmisijom preko ovojnice zgrade u hladniji vanjski prostor, negrijane dijelove zgrade i tlo. Taj prijenos topline karakteriziran je gustoćom toplinskog toka tj. količinom topline koja u jedinici vremena prođe kroz površinu ovojnice zgrade jedinične ploštine. Gustoća toplinskog toka je vektor koji u svakoj točki ovojnice zgrade djeluje u smjeru najvećeg pada temperature u toj točki. To se, u slučaju dvodimenzionalnog toplinskog toka, može prikazati grafički tako da se u presjek građevnog dijela ucrtaju linije toplinskog toka. Linije toplinskog toka su zamišljene linije koje pokazuju kojim se putem kroz ovojnicu zgrade prenosi toplina. Tangenta na liniju toplinskog toka pokazuje smjer strujanja topline. Druga mogućnost je da se u presjek ucrtaju izoterme tj. zamišljene krivulje koje spajaju točke jednake temperature. Linije toplinskog toka i izoterme uvijek su međusobno okomite.

Građevni dijelovi zgrade koji čine ovojnicu zgrade obično su ravni (pločasti), a sastoje se od paralelnih slojeva od homogenog materijala. Kod njih su linije toplinskog toka, na većem području presjeka, međusobno približno paralelne i okomite na ravninu građevnog dijela. Izoterme su horizontalne i paralelne međusobno i s graničnim površinama promatranog građevnog dijela. Za takvo područje građevnog dijela zgrade kažemo da je neporemećeno

(bez toplinskih mostova). Područje toplinskog mosta karakterizirano je time da linije toplinskog toka više nisu paralelne i usmjerene u jednom pravcu. To znači da se smjer toplinskog toka mijenja od jedne do druge točke presjeka. Isto tako izoterme na tom mjestu više nisu paralelne već su savinute, odnosno točnije rečeno, izoterme nisu više ravnine paralelne s površinom građevnog dijela već su to zakrivljene plohe (vidjeti sliku 4.23).



Slika 4.23 Prikaz linija izoterma i toplinskog toka

U točki 4.2 prikazani način proračuna toplinskog toka kroz građevni dio zgrade i karakteriziranje građevnog dijela s koeficijentom prolaska topline, U , primjenjivi su samo na neporemećena područja građevnog dijela tj. tamo gdje je toplinski tok okomit na površinu građevnog dijela. To su područja u toplinskoj ovojnici zgrade koja su dovoljno udaljena od geometrijskih promjena u ovojnici. Tamo gdje pretpostavka o toplinskom toku okomitom na ravninu površine građevnog dijela nije ispunjena, govorimo o toplinskom mostu. To su područja uz bridove prostorija i uglove prostorija. Prolazak topline kroz područje toplinskog mosta ne može se tako jednostavno proračunati kao kod neporemećenog građevnog dijela. U neporemećenom području svojstva građevnog dijela mijenjaju se samo u jednom prostornom smjeru (u smjeru debljine građevnog dijela) pa je dovoljan jednodimenzionalni (1-D) proračun. Za područje toplinskog mosta potreban je dvodimenzionalni (2-D) (bridovi prostorije) ili čak trodimenzionalni (3-D) proračun (uglovi / kutovi prostorije), a što je praktički izvedivo jedino uz pomoć računala.

4.4.2 Razredba toplinskih mostova

Prema načinu prijenosa topline razlikuje se

- toplinski most uvjetovan konvekcijom i
- toplinski most uvjetovan transmisijom.

Toplinski most uvjetovan konvekcijom nastaje tamo gdje se toplina prenosi zbog nekontroliranog strujanja zraka kroz zrakopropusna mjesta u ovojnici zgrade. Takvi toplinski mostovi nastaju najčešće na nedovoljno zabrtvljenim mjestima spajanja pojedinih građevnih dijelova u ovojnici zgrade.

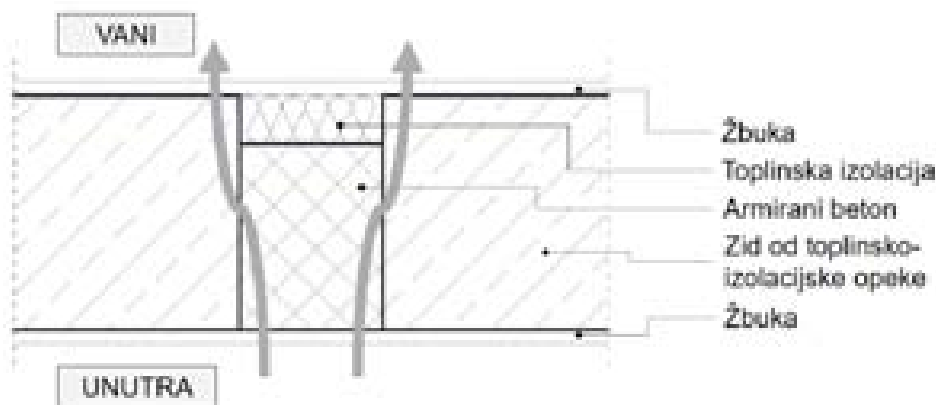
Kod toplinskih mostova uvjetovanih transmisijom povećan je prijenos topline mehanizmom vođenja topline. U nastavku ove točke biti će riječi samo o toj vrsti toplinskih mostova.

Prema uzroku nastanka toplinskog mosta uvjetovanog transmisijom razlikuje se

- toplinski most uvjetovan materijalom i
- toplinski most uvjetovan geometrijom.

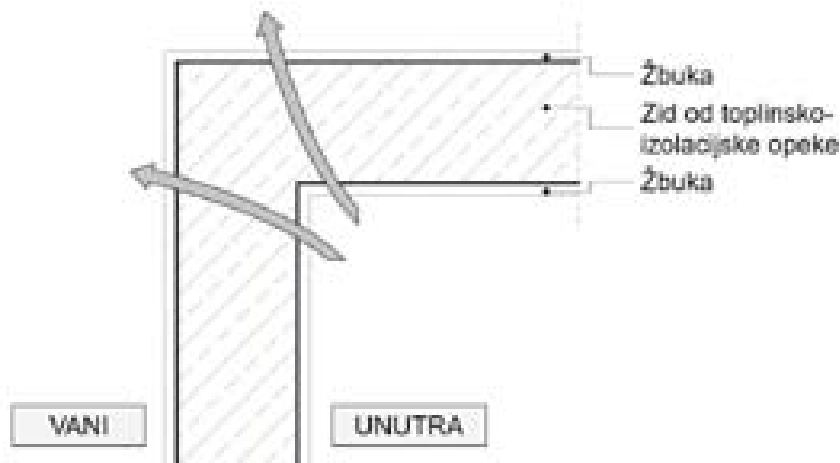
Često su kod toplinskog mosta prisutna oba ova uzroka njegova nastanka.

Toplinski most uvjetovan materijalom nastaje onda kada se u građevnom dijelu, iz nekog razloga, dio toplinsko-izolacijskog sloja zamijeni materijalom veće toplinske vodljivosti. Takva situacija nastaje primjerice kod skeletnih konstrukcija (masivni stupovi i grede), kod serklaža i nadvoja ili kod elemenata za povezivanje koji prodiru kroz toplinsko-izolacijski sloj (npr. razni metalni profili, čavli, vijci,...). Toplinski most uvjetovan materijalom nalazi se, dakle, na svim onim mjestima gdje je toplinsko-izolacijski sloj prekinut ili probijen materijalom koji bolje provodi toplinu.

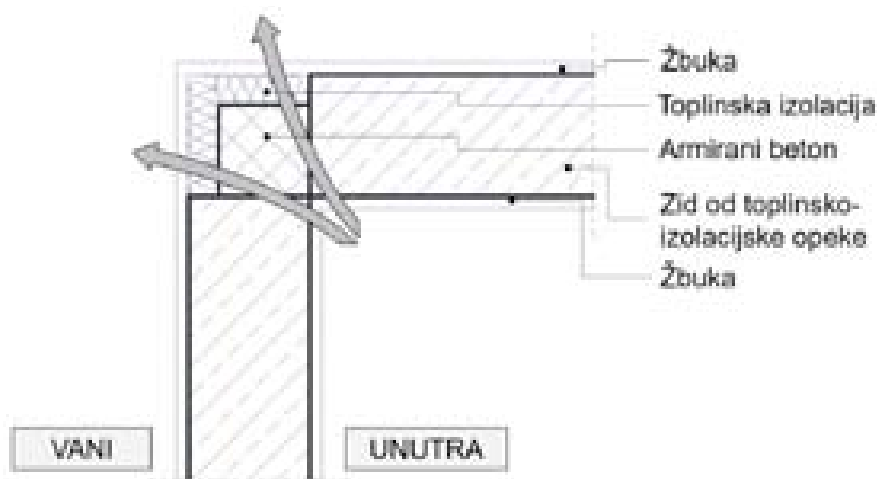


Slika 4.24 Shematski prikaz tipičnog toplinskog mosta uvjetovanog materijalom

Toplinski most uvjetovan geometrijom nastaje onda kad građevni dio mijenja smjer (savija se ili lomi), to znači uvijek kad postoji veća razlika između ploštine plohe koja prima toplinu u grijanoj prostoriji i ploštine plohe koja odaje toplinu vanjskom zraku ili zraku negrijane prostorije. Tu dolazi do pojave tzv. „efekta rashladnog rebra“. Takva situacija redovito postoji u području bridova i uglova u kojima se spajaju vanjski građevni dijelovi zgrade.



Slika 4.25 Shematski prikaz tipičnog toplinskog mosta uvjetovanog geometrijom



Slika 4.26 Shematski prikaz toplinskog mosta uvjetovanog i materijalom i geometrijom

S obzirom na svoj oblik toplinski most može biti

- linijski toplinski most i
- točkasti toplinski most.

Linijski toplinski most je relativno uzak, a proteže se preko čitave duljine (ili visine) građevnog dijela zgrade. Nastaje uglavnom duž međusobne spojnice pojedinih građevnih dijelova zgrade. Točkasti toplinski most je relativno malih dimenzija koje nisu mnogo veće od debljine građevnog dijela. Oni većinom nastaju na mjestima gdje spojni elementi okomiti na slojeve povezuju ili pričvršćuju pojedine slojeve ili čitav građevni dio.

Linijski toplinski most uzrokuje dvodimenzionalni toplinski tok, a točkasti toplinski most trodimenzionalni tok. S gledišta gubitaka topline linijski toplinski most može se karakterizirati s duljinskim koeficijentom prolaska topline, ψ , u $W/(m \times K)$ i duljinom linijskog toplinskog mosta l . Točkasti toplinski most karakterizira se s točkastim koeficijentom prolaska topline, χ , u W/K .

Linijski toplinski mostovi najčešće nastaju na slijedećim mjestima u ovojnici zgrade:

- na mjestu međusobnog spajanja vanjskih građevnih dijelova zgrade (kutovi između dva vanjska zida, zida i krova, zida i stropa),
- na mjestu spajanja unutarnjeg zida s vanjskim zidom i krovom,
- na mjestu spajanja stropa s vanjskim zidom,
- na stupovima i serklažima u vanjskom zidu,
- oko prozora i vrata u vanjskom zidu.

4.4.3 Posljedice toplinskih mostova

Toplinski most nastaje na svakom mjestu međusobnog spajanja građevnih dijelova zgrade i na mjestima gdje se mijenja sastav građevnog dijela. Dvije glavne posljedice postojanja toplinskog mosta su: povećanje iznosa toplinskog toka kroz toplinski most i smanjenje temperature na unutarnjoj površini toplinskog mosta, oboje u usporedbi s tim vrijednostima na istom građevnom dijelu bez toplinskog mosta. Toplinski most u pravilu dovodi do porasta trodimenzionalnih i dvodimenzionalnih toplinskih tokova što znači povećanje ukupnih transmisivskih toplinskih gubitaka kroz ovojnicu zgrade. Smanjenje temperature unutarnje površine toplinskog mosta može biti uzrok problema s kondenzacijom vodene pare ili razvojem plijesni. Ako je temperatura unutarnje površine jednaka ili niža od točke rosišta unutarnjeg zraka, vlaga iz zraka prostorije kondenzira se na unutarnjoj površini toplinskog mosta. Posljedica toga je cvjetanje soli, pojava mrlja i razvoj plijesni. Ako kroz duže vremensko razdoblje relativna vlažnost zraka uz unutarnju površinu toplinskog mosta prelazi 80 %, može doći do razvoja plijesni bez obzira na to što nije bilo kondenzacije.

Toplinski mostovi su u svakom slučaju toplinski slaba i stoga nepoželjna područja u ovojnici zgrade i kod projektiranja zgrade treba nastojati izbjeći ih kad god je to moguće. Preostale toplinske mostove treba uvijek uzeti u obzir kod proračuna transmisivskih toplinskih gubitaka zgrade i kod ocjene rizika vezanih uz kondenzaciju i razvoj plijesni.

Učinak mnogobrojnih toplinskih mostova koji su jednoliko raspoređeni po građevnom dijelu zgrade, kao što su to primjerice sljubnice morta u zidovima od toplinsko-izolacijskih blokova, treba uključiti u proračun koeficijenta prolaska topline, U , promatranog građevnog dijela zgrade.

4.4.4 Koncept koeficijenta toplinske veze

Matematički model transmisivskog prijenosa topline kroz građevni dio zgrade, u općem slučaju, dan je parcijalnom diferencijalnom jednačbom (2.31). Radi se, dakle, o nelinearnom modelu čije rješavanje predstavlja vrlo složenu zadaću. Rješenje diferencijalne jednačbe je trodimenzionalno skalarno temperaturno polje iz kojeg se pomoću zakona vođenja topline (jednačba (2.27)) odredi vektorsko polje gustoće toplinskog toka.

U nastavku je prikazan postupak kojim se ovaj nelinearni model može linearizirati tj. aproksimirati približnim linearnim modelom. Svojstvo linearnosti u matematičkom smislu određeno je svojstvima superpozicije i proporcionalnosti, što znači da je neka funkcija $f(x)$ linearna ako za nju vrijedi:

$$\begin{aligned} f(x_1 + x_2) &= f(x_1) + f(x_2) \text{ svojstvo superpozicije, i} \\ f(a \times x) &= a \times f(x) \text{ svojstvo proporcionalnosti.} \end{aligned}$$

Linearizacijom diferencijalne jednačbe vođenja topline omogućen je relativno jednostavan proračun temperatura i toplinskih tokova. Pojednostavnjenja koja su pri tome prihvaćena nebitno umanjuju točnost rezultata proračuna i potpuno su prihvatljivi za rješavanje zadaća koji se susreću u graditeljstvu.

Prema zakonu vođenja topline, toplinski tok, ϕ , kroz ravni građevni dio izgrađen od homogenog materijala, proporcionalan je razlici temperatura s obje strane građevnog dijela:

$$\phi = \frac{\lambda \times A \times \Delta\theta}{d} \quad (4.133)$$

što se može napisati kao:

$$\phi = L \times \Delta\theta \quad (4.134)$$

Koeficijent proporcionalnosti L nazvan je **koeficijent toplinske veze** promatranog građevnog dijela zgrade [69]. To je karakteristika građevnog dijela zgrade kroz koji prolazi toplina. Koeficijent toplinske veze je onaj toplinski tok koji prolazi kroz građevni dio kada je razlika temperatura s obje strane građevnog dijela 1 K. Jedinica koeficijenta toplinske veze je W/K.

Iz jednačbi (4.133) i (4.134) proizlazi da je:

$$L = \frac{A}{R} \quad (4.135)$$

gdje je

A ukupna ploština površine promatranog građevnog dijela zgrade, u m^2 ,
 $R = d/\lambda$ toplinski otpor homogenog pločastog građevnog dijela, u $m^2 \times K/W$.

Ako se uzmu u obzir i otpori prijelaza topline R_{si} i R_{se} , može se pisati da je:

$$L = U \times A \quad (4.136)$$

Za ravni homogeni građevni dio koeficijent prolaska topline, U , jednak je koeficijentu toplinske veze istog građevnog dijela svedenog na jedinicu ploštine njegove površine.

Kad je poznat koeficijent toplinske veze, L , nekog građevnog dijela, pomoću jednadžbe (4.134) može se izračunati toplinski tok Φ kroz taj građevni dio za bilo koju razliku temperatura $\Delta\theta$ s obje njegove strane.

Primjenom gore opisanog postupka moguće je na vrlo jednostavan način opisati toplinske tokove u zgradi kod stacionarnih uvjeta. Gubitak topline Φ_i iz grijane prostorije i prema vanjskom prostoru e dan je izrazom:

$$\phi_i = L_{i,e} \times (\theta_i - \theta_e) \quad (4.137)$$

Jedna prostorija može biti odvojena od vanjskog prostora s više građevnih dijelova. Ukupni transmisijski gubitak topline iz te prostorije jednak je zbroju toplinskih tokova koji prolaze kroz pojedine građevne dijelove. Svaki građevni dio, u općem slučaju, ima različiti koeficijent toplinske veze. Ako je razlika temperatura $\Delta\theta$ s obje strane svih građevnih dijelova jednaka ona se može kod zbrajanja izvući kao zajednički faktor ispred zgrade tako da u zagradi ostane zbroj koeficijenata toplinske veze svih građevnih dijelova, dakle:

$$\phi_i = (\theta_i - \theta_e) \times \sum_k L_{k,(i,e)} \quad (4.138)$$

gdje je k broj relevantnih različitih građevnih dijelova.

Zbroj $\sum_k L_{k,(i,e)}$ pojedinačnih vrijednosti koeficijenta toplinske veze možemo označiti kao jedan koeficijent toplinske veze L :

$$L = \sum_k L_{k,(i,e)} \quad (4.139)$$

Ovo je moguće samo ako je s vanjske strane svih građevnih dijelova jednaka temperatura.

Koeficijent toplinske veze, L , između prostorije i i vanjskog zraka, zajedno s pripadnom razlikom temperatura između njih, određuje transmisijski toplinski tok između prostorije i i vanjskog zraka.

Opisani pristup s jednom prostorijom može se primijeniti i u slučaju toplinske zone ili čitave zgrade.

Jednadžba (4.140) može se prikazati i kao:

$$L = \sum_k U_k \times A_k \quad (4.140)$$

Gore opisani postupak odnosi se na jednodimenzionalno vođenje topline. Svojstva građevnog dijela mijenjaju se samo u jednom prostornom smjeru tj. u smjeru debljine. To je slučaj kada u građevnom dijelu nema toplinskih mostova.

Proračun toplinskog toka pomoću koeficijenta toplinske veze vrijedi, međutim, kako za opisani jednostavni jednodimenzionalni slučaj tako i za najsloženije slučajeve, dakle, i za dvodimenzionalne i trodimenzionalne toplinske tokove do kojih dolazi u području toplinskih mostova.

Postavlja se pitanje kako na temelju podataka iz projektnog rješenja zgrade izračunati koeficijente toplinske veze $L_{i,j}$ građevnih dijelova koji čine toplinsku ovojnici zgrade? Principi proračuna i uvjeti koje takav proračun mora zadovoljiti dani su u normi HRN EN ISO 10211 [70]. Najprije se, za dane rubne uvjete, pomoću odgovarajuće numeričke metode (metoda konačnih elemenata, metoda konačnih razlika,...) riješi parcijalna diferencijalna jednadžba vođenja topline za stacionarno stanje. Rješenje je temperaturno polje u promatranom građevnom dijelu koji sadrži toplinski most. Poznavajući temperaturno polje, pomoću Fourierovog zakona vođenja topline (jednadžba (2.30)) proračuna se gustoća toplinskog toka (vektorsko polje). Integrirajući gustoću toplinskog toka preko čitave površine promatranog građevnog dijela s toplinskim mostom, dobije se ukupni toplinski tok Φ kroz građevni dio zgrade uključivo s toplinskim mostom. S poznatom razlikom temperatura s obje strane građevnog dijela, pomoću jednadžbe (4.137) izračuna se pripadni koeficijent toplinske veze $L_{i,j}$. Jednom dobivena vrijednost za $L_{i,j}$ vrijedi za svaku promjenu vrijednosti rubnih uvjeta što znači da za promijenjene rubne uvjeta ne treba ponavljati proračun koeficijenta toplinske veze.

4.4.5 Modeliranje zgrade za numerički proračun

Ukupni transmisijski toplinski tok kroz ovojnicu zgrade, $\Phi_{i,j}$, u W, između unutarnjeg zraka temperature θ_i i vanjskog okoliša temperature θ_j , dan je izrazom:

$$\phi_{i,j} = L_{3D,i,j} \times (\theta_i - \theta_j) \quad (4.141)$$

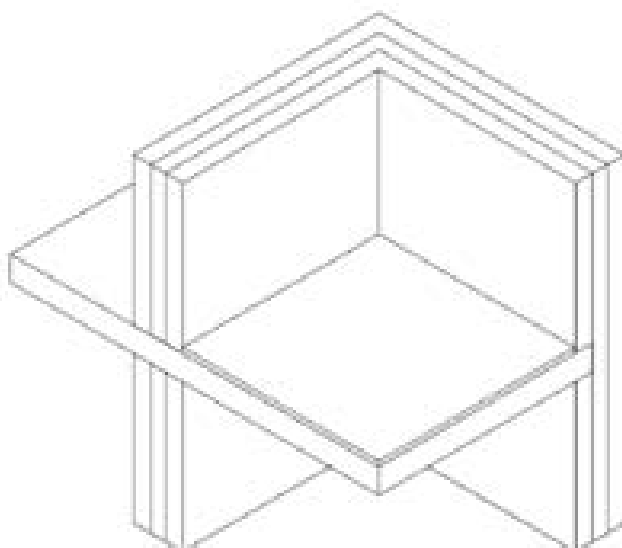
Ovdje je $L_{3D,i,j}$ koeficijent toplinske veze između unutarnjeg prostora označenog s i i vanjskog prostora označenog s j , koji je dobiven iz trodimenzionalnog (3-D) proračuna, izražen u W/K. Za određivanje vrijednosti koeficijenta $L_{3D,i,j}$ koristi se odgovarajuća numerička metoda koja daje približno rješenje diferencijalne jednadžbe vođenja topline koje konvergira analitičkom rješenju, ako ono postoji.

Raspodjela temperature unutar građevnog dijela i toplinskog toka kroz građevni dio mogu se proračunati kada su poznati njegovi građevni detalji (sastav, karakteristike materijala, dimenzije,...) te rubni uvjeti. U skladu s projektom zgrade odredi se geometrijski model zgrade ili njenih pojedinih dijelova za koje će se provesti potrebni proračuni. Geometrijski model se podijeli na određeni broj manjih elemenata (diskretizacija) od kojih je svaki od homogenog materijala, a predstavljen je točkom u sredini elementa koju nazivamo čvor. Primjenom zakona očuvanja energije i Fourierovog zakona vođenja topline te uzimajući u obzir rubne uvjete, dobije se sustav jednadžbi u kojima su temperature čvorova nepoznanice. Rješenjem tog sustava jednadžbi, izravnom ili iterativnom metodom, dobiju se temperature čvorova tj. temperaturno polje. Raspodjela temperatura u svakom elementu mreže proračuna se linearnom interpolacijom između temperatura čvorova. Iz rasporeda temperatura mogu se primjenom Fourierovog zakona proračunati toplinski tokovi. Rezultati provedenih proračuna mogu se upotrijebiti za određivanje koeficijenta toplinske veze i temperature unutarnje površine promatranog građevnog dijela zgrade.

Obično nije izvedivo modeliranje cijele zgrade uporabom jednog geometrijskog modela. U većini slučajeva zgrada se podijeli na više dijelova primjenom tzv. rastavnih (odreznih) ravnina. Rastavne ravnine su ravnine koje predstavljaju granice geometrijskog modela odvajajući model od ostatka zgrade. Navedena podjela zgrade mora se provesti na način da se izbjegnu sve razlike u rezultatima proračuna između zgrade podijeljene u nekoliko geometrijskih modela i zgrade obrađene kao jedan geometrijski model. To se postiže odabirom prikladnih položaja rastavnih ravnina. Rastavne ravnine moraju biti adijabatske (toplinski tok kroz njih mora biti nula).

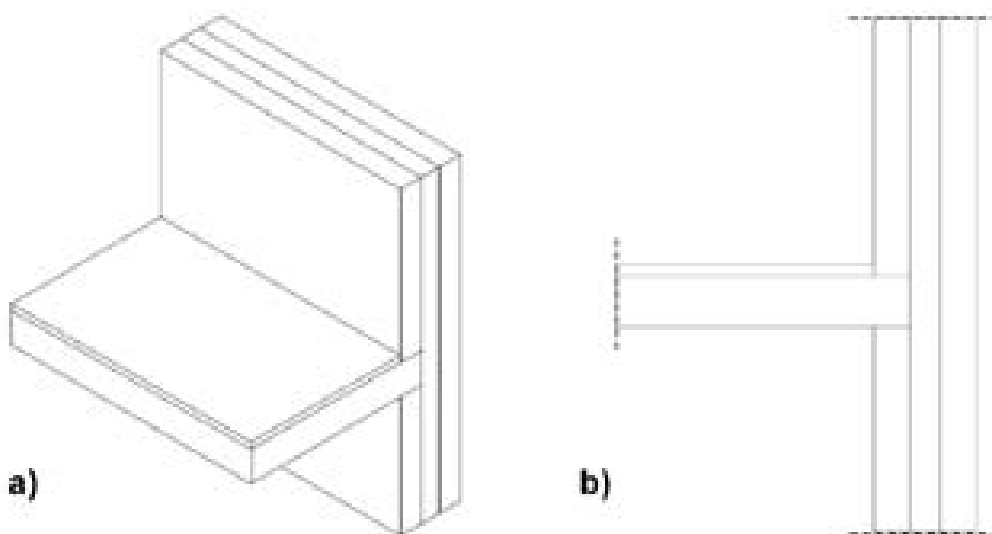
Geometrijski model može sadržavati više od jednog toplinskog mosta. Razlikuje se trodimenzionalni i dvodimenzionalni geometrijski model.

Trodimenzionalni geometrijski model ili 3-D geometrijski model je geometrijski model izveden iz projekta zgrade, tako da se za svaku os pravokutnog koordinatnog sustava poprečni presjek okomit na tu os mijenja u okviru granica modela.



Slika 4.27 Primjer 3-D geometrijskog modela

Dvodimenzionalni geometrijski model ili 2-D geometrijski model je geometrijski model izveden iz projekta zgrade, kod kojeg se za jednu od osi pravokutnog koordinatnog sustava poprečni presjek okomit na tu os ne mijenja u okviru granica modela. 2-D geometrijski model rabi se u dvodimenzionalnim proračunima.



- a) prostorni prikaz
- b) presjek

Slika 4.28 Primjeri 2-D geometrijskog modela

Trodimenzionalni geometrijski model može se rastaviti na trodimenzionalne bočne elemente i na trodimenzionalni središnji element. Trodimenzionalni bočni element ili 3-D bočni element je dio 3-D geometrijskog modela koji se, kad ga se promatra odvojeno, može prikazati 2-D geometrijskim modelom. Trodimenzionalni središnji element ili 3-D središnji element je dio 3-D geometrijskog modela koji nije dio 3-D bočnog elementa. Središnje element je prikazan 3-D geometrijskim modelom.

4.4.6 Određivanje koeficijenta toplinske veze i toplinskog toka iz 3-D proračuna

Dvije granične temperature, geometrijski model zgrade nepodijeljen

Granične temperature su temperature zraka uz granične površine promatranog građevnog dijela zgrade. Vanjska granična temperatura je temperatura vanjskog zraka uz pretpostavku da su jednake temperatura zraka i temperatura zračenja na vanjsku površinu ovojnice zgrade. Unutarnja granična temperatura je radna (operativna) temperatura za koju se uzima da je jednaka srednjoj aritmetičkoj vrijednosti temperature unutarnjeg zraka i srednje temperature zračenja svih površina koje okružuju unutarnji okoliš.

Ako postoje samo dva okoliša s dvije različite temperature (jedna unutarnja i jedna vanjska) i ako je cijela zgrada proračunata trodimenzionalno iz jednog geometrijskog modela, može se koeficijent toplinske veze, $L_{3D,1,2}$ odrediti iz ukupnog toplinskog toka zgrade Φ , pomoću izraza:

$$\phi = L_{3D,1,2} \times (\theta_1 - \theta_2) \quad (4.142)$$

Dvije granične temperature, geometrijski model zgrade podijeljen

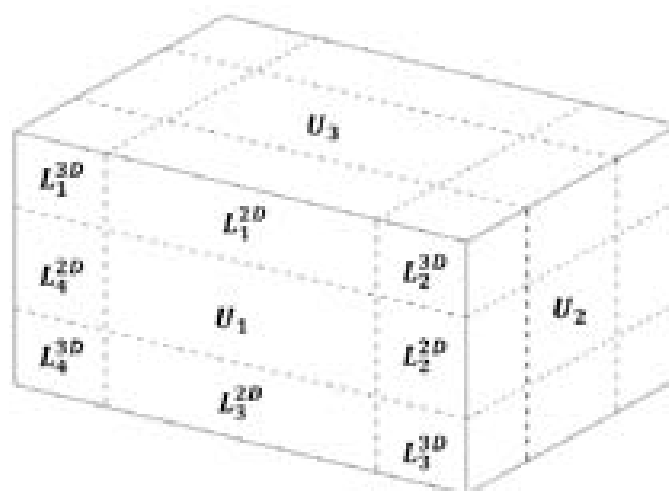
Na slici 4.29 prikazana je zgrada podijeljena na više geometrijskih modela 3-D, 2-D i 1-D. Kad je zgrada podijeljena na više geometrijskih modela, ukupna vrijednost $L_{3D,i,j}$ proračuna se iz jednadžbe:

$$L_{3Di,i} = \sum(k=1 \text{ do } N_k) U_{k(i,j)} \times A_k + \sum(m=1 \text{ do } N_m) L_{2D,m(i,j)} \times l_m + \sum(n=1 \text{ do } N_n) L_{3D,n(i,j)} \quad (4.143)$$

gdje je:

$L_{3D,n(i,j)}$	koeficijent toplinske veze određen iz 3-D proračuna dijela n zgrade, u W/K,
$L_{2D,m(i,j)}$	koeficijent toplinske veze određen iz 2-D proračuna dijela m zgrade, u W/(m×K),
l_m	duljina na koju se odnosi vrijednost $L_{2D,m(i,j)}$, u m,
$U_{k(i,j)}$	koeficijent prolaska t opline dijela k zgrade, određen iz 1-D proračuna, u W/(m ² ×K),
A_k	ploština površine na koju se odnosi vrijednost $U_{k(i,j)}$, u m ² ,
N_n	ukupan broj 3-D dijelova,
N_m	ukupan broj 2-D dijelova,
N_k	ukupan broj 1-D dijelova.

U jednadžbi (4.143) $\sum A_k$ manja je od ukupne ploštine ovojnice zgrade jer su neke površine uključene u izraze za 2-D i 3-D proračune.



Slika 4.29 Zgrada podijeljena na više geometrijskih modela 3-D, 2-D i 1-D

Više od dvije granične temperature

Toplinski tok, $\Phi_{i,j}$, iz okoliša i u toplinski povezani okoliš j dan je izrazom:

$$\phi_{i,j} = L_{3D,i,j} \times (\theta_i - \theta_j) \quad (4.144)$$

Kad postoje više od dvije granične temperature („više vanjskih prostora“ različitih temperatura ili susjednih negrijanih prostorija), ukupan toplinski tok, Φ , u W, u promatranu prostoriju ili iz te prostorije (toplinske zone ili zgrade) temperature θ_i može se proračunati iz izraza:

$$\phi = \sum_j [L_{3D,i,j} \times (\theta_i - \theta_j)] \quad (4.145)$$

gdje su

$L_{3D,i,j}$ koeficijenti toplinske veze između promatrane prostorije i pojedinih vanjskih okoliša ili susjednih prostorija, u W/K,

θ_j temperature pojedinih vanjskih okoliša ili susjednih prostorija, u °C.

Ukupan toplinski tok, Φ , u W, u toplinsku zonu / zgradu ili iz toplinske zone / zgrade, kad to rubni uvjeti zahtijevaju (više grupa unutarnjih prostorija s različitom temperaturom), može se proračunati iz izraza:

$$\phi = \sum_i \sum_j [L_{3D,i,j} \times (\theta_i - \theta_j)] \quad (4.146)$$

gdje su

$L_{3D,i,j}$ odgovarajući koeficijenti toplinske veze, u W/K,

θ_i temperature unutarnjih prostorija, u °C,

θ_j temperature vanjskog okoliša ili susjedne prostorije, u °C.

4.4.7 Određivanje koeficijenta toplinske veze uporabom duljinskih i točkastih koeficijenata prolaska topline iz 3-D proračuna

Proračun utjecaja toplinskih mostova u ovojnici zgrade na transmisijske toplinske gubitke zgrade može se provesti i pomoću indirektnog postupka. Taj postupak polazi od uobičajenog jednodimenzionalnog proračuna toplinskog gubitka zgrade kod kojeg se zbrajaju umnošci koeficijenta prolaska topline U pojedinih građevnih dijelova iz ovojnice zgrade s plošinom, A , njihove površine. Pogriješke jednodimenzionalnog proračuna mogu se ispraviti pribrajanjem dodatnih toplinskih gubitaka zbog postojanja toplinskih mostova. U slučaju dvodimenzionalnog vođenja topline taj dodatak ima oblik $\psi \times l$, gdje je ψ duljinski koeficijent prolaska topline linijskog toplinskog mosta, a l duljina toplinskog mosta. U slučaju trodimenzionalnog vođenja topline dodaju se još i točkasti koeficijenti prolaska topline, χ . Ukupni toplinski gubitak zgrade prema vanjskom prostoru dobije se zbrajanjem vrijednosti za jednodimenzionalni proračun ($\sum U \times A$) i svih dodataka za toplinske mostove ($\sum \psi \times l + \sum \chi$).

Duljinski koeficijent prolaska topline, ψ , jednak je povećanju stacionarnog toplinskog toka kroz linijski toplinski most, u odnosu na neporemećeno područje, podijeljenom duljinom i razlikom temperatura okoliša s obje strane toplinskog mosta. On količinski opisuje utjecaj linijskog toplinskog mosta (povećanje prolaska topline) na ukupni toplinski tok. Izražava se u W/(m×K).

Točkasti koeficijent prolaska topline, χ , jednak je povećanju stacionarnog toplinskog toka kroz točkasti toplinski most, u odnosu na neporemećeno područje, podijeljenom razlikom temperatura okoliša s obje strane toplinskog mosta. On količinski opisuje utjecaj točkastog toplinskog mosta (povećanje prolaska topline) na ukupni toplinski tok. Izražava se u W/K.

Proračun koeficijenta toplinske veze

Odnos između koeficijenta toplinske veze, $L_{3D,i,j}$, i koeficijenata prolaska topline, U , ψ i χ dan je izrazom:

$$L_{3D,i,j} = \sum(k=1 \text{ do } N_k) U_{k(i,j)} \times A_k + \sum(m=1 \text{ do } N_m) \psi_{m(i,j)} \times l_m + \sum(n=1 \text{ do } N_n) X_{n(i,j)} \quad (4.147)$$

gdje je

$U_{k(i,j)}$ plošni koeficijent prolaska topline dijela k ovojnice prostorije, zone ili zgrade, u $W/(m^2 \times K)$,

A_k ploština površine na koju se odnosi vrijednost $U_{k(i,j)}$, u m^2 ,

$\psi_{m(i,j)}$ duljinski koeficijent prolaska topline dijela m prostorije, zone ili zgrade, u $W/(m \times K)$,

l_m duljina na koju se odnosi $\psi_{m(i,j)}$, u m ,

$X_{n(i,j)}$ točkasti koeficijent prolaska topline dijela n prostorije, zone ili zgrade, u W/K ,

N_k broj plošnih koeficijenata prolaska topline,

N_m broj duljinskih koeficijenata prolaska topline,

N_n broj točkastih koeficijenata prolaska topline,

U gornjoj jednadžbi $\sum A_k$ jednaka je ukupnoj ploštini toplinske ovojnice.

Koeficijent toplinske veze, $L_{3D,i,j}$, ekvivalentan je koeficijentu prijenosa topline transmisijom H_{tr} (vidjeti točku 6.12).

Proračun duljinskih i točkastih koeficijenata prolaska topline

Vrijednost duljinskog koeficijenta prolaska topline, ψ , određuje se iz izraza:

$$\psi = L_{2D} - \sum(j=1 \text{ do } N_j) U_j \times l_j \quad (4.148)$$

gdje je

L_{2D} koeficijent toplinske veze dobiven iz 2-D proračuna komponente koja razdvaja dva promatrana okoliša, u $W/(m \times K)$,

U_j plošni koeficijent prolaska topline 1-D komponente j koja razdvaja dva promatrana okoliša, u $W/(m^2 \times K)$,

l_j duljina na koju se odnosi vrijednost U_j , u m ,

N_j broj 1-D komponenata.

Vrijednost točkastog koeficijenta prolaska topline, χ , određuje se iz izraza:

$$X = L_{3D} - \sum(i=1 \text{ do } N_i) U_i \times A_i - \sum(j=1 \text{ do } N_j) \psi_j \times l_j \quad (4.149)$$

gdje je

L_{3D} koeficijent toplinske veze dobiven iz 3-D proračuna 3-D komponente koja razdvaja dva promatrana okoliša, u W/K ,

U_i plošni koeficijent prolaska topline 1-D komponente i koja razdvaja dva promatrana okoliša, u $W/(m^2 \times K)$,

A_i ploština na koju se odnosi vrijednost U_i , u m^2 ,

ψ_i duljinski koeficijent prolaska topline proračunan pomoću jednadžbe (4.148),

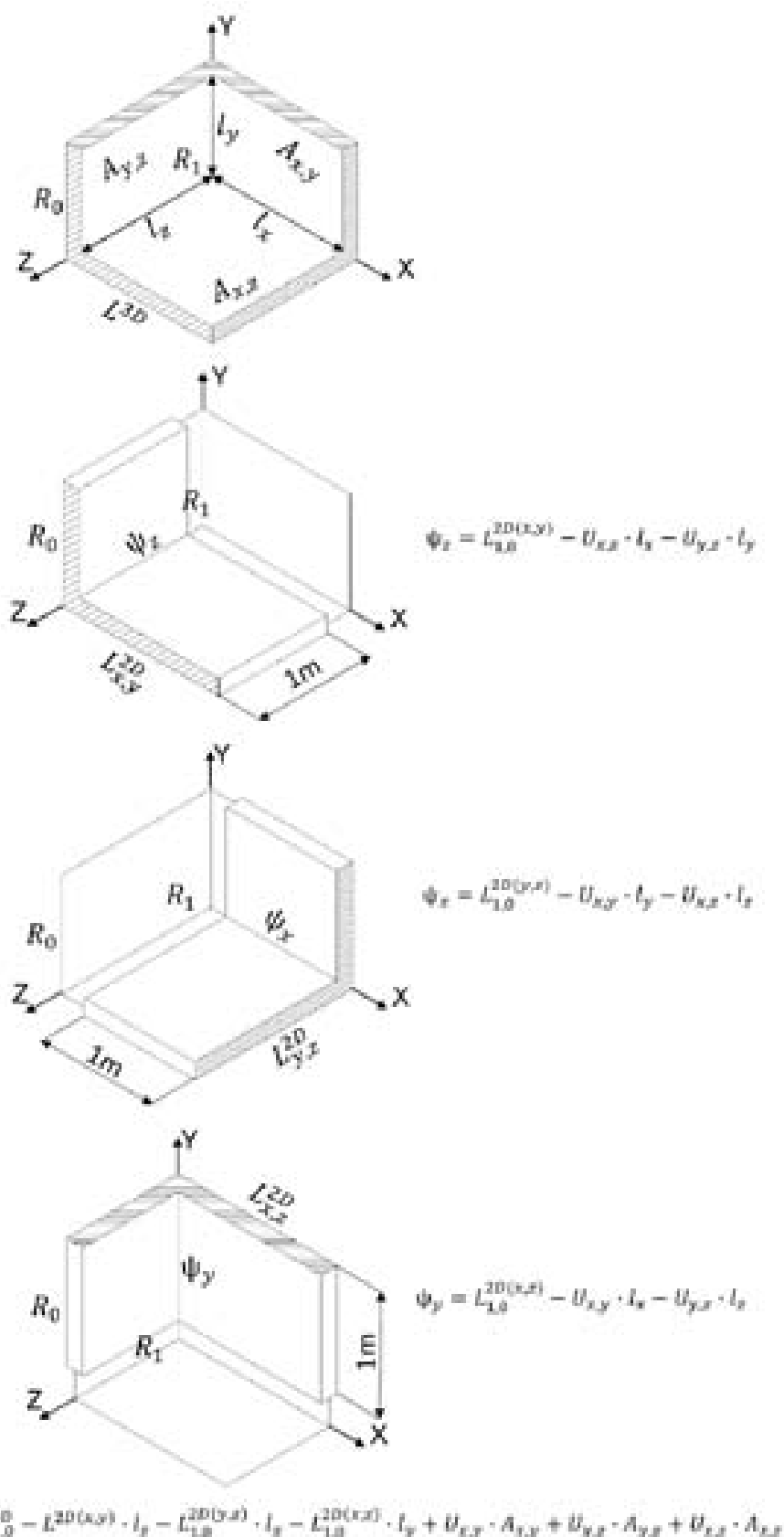
l_j duljina na koju se odnosi vrijednost ψ_j , u m ,

N_j broj 2-D komponenata,

N_i broj 1-D komponenata.

Pri određivanju vrijednosti koeficijenata ψ i χ nužno je navesti koji se sustav dimenzija koristio kod proračuna jer vrijednosti tih koeficijenata ovise o izboru sustava dimenzija.

Na slici 4.30 dan je primjer proračuna vrijednosti koeficijenata ψ i χ za slučaj dva odvojena okoliša.



Slika 4.30 3-D komponenta zgrade koja razdvaja dva okoliša – primjer određivanja duljinskih i točkastih koeficijenata prolaska topline

4.8 Određivanje koeficijenta toplinske veze, toplinskog toka i duljinskog koeficijenta prolaska topline iz 2-D proračuna

Dvije granične temperature

Toplinski tok po metru duljine, ϕ_i , linijskog toplinskog mosta iz unutarnjeg okoliša označenog indeksom i , prema vanjskom okolišu, označenom indeksom e , dan je izrazom:

$$\phi_i = L_{2D} \times (\theta_i - \theta_e) \quad (4.150)$$

Ovdje je L_{2D} koeficijent toplinske veze dobiven iz 2-D proračuna komponente koja razdvaja dva promatrana okoliša.

Više od dvije granične temperature

Toplinski tok $\phi_{i,j}$, iz okoliša i prema toplinski povezanom okolišu j dan je izrazom:

$$\phi_{i,j} = L_{2D,i,j} \times (\theta_i - \theta_j) \quad (4.151)$$

Za više od dva okoliša s različitim temperaturama (npr. različite unutarnje ili vanjske temperature) ukupni toplinski tok Φ koji ulazi ili izlazi iz prostorije odnosno zone / zgrade, može se izračunati iz izraza:

$$\phi = \sum_j L_{2D,i,j} \times (\theta_i - \theta_j) \quad (4.152)$$

Ovdje su $L_{2D,i,j}$ koeficijenti toplinske veze dobiveni iz 2-D proračuna za svaki par okoliša.

Određivanje duljinskog koeficijenta prolaska topline

Duljinski koeficijent prolaska topline, ψ , promatranog linijskog toplinskog mosta koji razdvaja dva okoliša, dan je izrazom:

$$\psi = L_{2D} - \sum_{(j=1 \text{ do } N_j)} U_j \times l_j \quad (4.153)$$

gdje je

- U_j plošni koeficijent prolaska topline 1-D komponente j koja razdvaja dva promatrana okoliša, u $W/(m^2 \times K)$,
- l_j duljina u 2-D geometrijskom modelu na koju se odnosi vrijednost U_j , u m,
- N_j broj 1-D komponenti.

Pri određivanju vrijednosti koeficijenata ψ nužno je navesti koji se sustav dimenzija koristio kod proračuna jer vrijednost ψ ovisi o izboru sustava dimenzija.

4.4.9 Metode određivanja duljinskog koeficijenta prolaska topline

Dostupne metode i očekivana točnost

Kod proračuna transmisijskih toplinskih gubitaka zgrade, koeficijent toplinske veze, $L_{3D,i,j}$, (odnosno koeficijent prijenosa topline transmisijom, H_{tr}), određuje se pomoću jednadžbe (4.147), pri čemu se točkasti koeficijenti prolaska topline smiju zanemariti.

Za određivanje duljinskog koeficijenta prolaska topline, ψ , ovisno o zahtijevanoj točnosti proračuna prijenosa topline, mogu se koristiti slijedeće metode

- numeričke metode (tipična točnost ± 5 %),
- katalozi / atlas toplinskih mostova (tipična točnost ± 20 %),
- „ručne“ metode proračuna (tipična točnost ± 20 %),
- zadane (tablične) vrijednosti (tipična točnost 0 % do 50 %).

U fazi projektiranja kad su poznate dimenzije i osnovni oblik zgrade, ali još nisu riješeni pojedini građevni detalji, može se načiniti samo gruba procjena doprinosa toplinskih mostova ukupnim toplinskim gubitcima.

Kad su građevni detalji već dovoljno razrađeni mogu se odrediti točnije vrijednosti duljinskog koeficijenta prolaska topline, ψ , linijskih toplinskih mostova pronalaženjem najbližeg primjera u katalogu toplinskih mostova i uporabom tamo dane vrijednosti ψ . U toj fazi projektiranja mogu se upotrijebiti i „ručne“ metode proračuna.

Ako su građevni detalji u potpunosti riješeni, mogu se upotrijebiti sve metode određivanja koeficijenta ψ , uključivo i numeričke proračune koji daju najtočnije vrijednosti.

Numeričke metode proračuna

Numeričke metode proračuna daju najtočnije vrijednosti koeficijenta ψ . One su detaljno opisane u prethodnim točkama.

Katalozi / atlasi toplinskih mostova

U katalozima i atlasima toplinskih mostova prikazani su različiti građevni detalji koji se susreću kod projektiranja zgrada, s pripadnim vrijednosti koeficijenta ψ . Vrijednosti koeficijenta ψ dane u katalozima / atlasima dobivene su na bazi numeričkih proračuna uz određene uvjete o čemu u katalogu mora biti dovoljno podataka. Građevni detalji su dani s određenim dimenzijama, određenim građevnim materijalima s određenim karakteristikama. Stoga su oni manje prilagodljivi realnim situacijama nego što su to numerički proračuni kod kojih radimo sa stvarnim dimenzijama i materijalima. Općenito se primjeri iz kataloga toplinskih mostova ne poklapaju u potpunosti sa stvarnim projektiranim detaljem. Vrijednosti ψ iz kataloga ipak se smiju upotrijebiti kad su dimenzije i toplinska svojstva materijala iz primjera u katalogu slična onima u projektiranom detalju ili ako su toplinski nepovoljnija od razmatranog detalja, kako se ne bi podcijenio učinak toplinskog mosta.

U fazi projektiranja, kada detalji još nisu u potpunosti riješeni, primjeri iz kataloga mogu poslužiti projektantu da odabere najpovoljnije rješenje svog detalja.

„Ručne“ metode proračuna

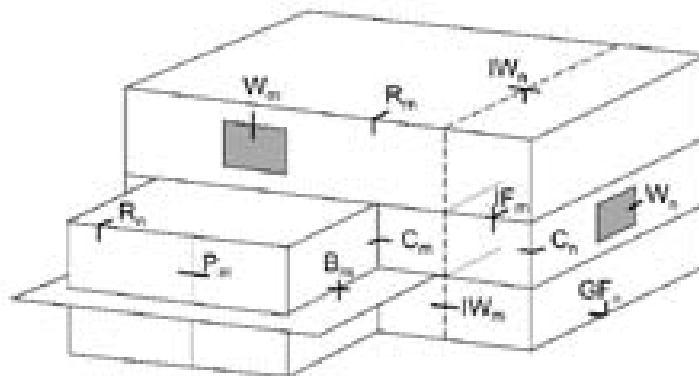
„Ručne“ metode proračuna namijenjene su za proračune koji se provode pomoću kalkulatora. Većina „ručnih“ metoda proračuna primjenjuje se samo na određeni tip toplinskog mosta. U određenom području primjene neka „ručna“ metoda proračuna može biti vrlo točna, ali izvan tog područja može biti vrlo netočna. Zato se uz „ručnu“ metodu proračuna moraju uvijek navesti slijedeći podaci

- tip građevnih detalja za proračun kojih je metoda namijenjena,
- granice dimenzija za koje je metoda valjana,
- granice toplinske vodljivosti, λ , upotrijebljenih materijala,
- vrijednosti otpora prijelaza topline koje su uzete u proračun,
- procjena točnosti metode (npr. najveća pogreška).

Zadane (tablične) vrijednosti

Uz određene uvjete smiju se pripremiti i tablice zadanih vrijednosti duljinskog koeficijenta prolaska topline, ψ , linijskog toplinskog mosta. Takve tablice moraju sadržavati jasne upute o njihovoj primjenjivosti i ne smiju podcijeniti učinke toplinskog mosta.

Primjer takve tablice sa zadanim vrijednostima koeficijenta ψ je Tablica A.2 u normi HRN EN ISO 14683 [71]. U normi zadane vrijednosti ψ dane su za raspon obično upotrebljivanih tipova dvodimenzionalnih toplinskih mostova. Tipična mjesta tih uobičajenih tipova toplinskih mostova prikazana su na slici 4.31.



Slika 4.31 Shematski prikaz zgrade s naznačenim mjestima uobičajenog nastanka toplinskih mostova i njihovim oznakama

Velika slova za svaki toplinski most naznačuju tip toplinskog mosta, a broj označuje pojedini oblik toplinskog mosta toga tipa. Pregled tipova linijskih toplinskih mostova i njihovih oznaka dan je u tablici 4.21.

Tablica 4.21 Pregled tipova linijskih toplinskih mostova s korištenim oznakama prema normi HRN EN ISO 14683 [71].

Tip linijskog toplinskog mosta	Oznaka
Kut između krova i vanjskog zida	R1 do R12
Balkoni	B1 do B4
Kut između dva vanjska zida	C1 do C8
Spoj vanjskog zida i stropa između grijanih etaža	IF1 do IF8
Spoj unutarnjeg zida i vanjskog zida ili krova	IW1 do IW6
Spoj poda na tlu i vanjskog zida	GF1 do GF8
Spoj uzdignutog poda i vanjskog zida	GF9 do GF16
Toplinski neizolirani stupovi u vanjskom zidu	P1 do P4
Otvori u vanjskim zidovima za prozore i vrata	W1 do W18

Svakom toplinskom mostu dodijeljene su po tri zadane vrijednosti duljinskog koeficijenta prolaska topline, ψ , i to za slučaj primjene sustava vanjskih dimenzija (oznaka / indeks *e*), unutarnjih dimenzija (oznaka / indeks *i*) i ukupnih unutarnjih dimenzija (oznaka / indeks *oi*). U sustavu vanjskih dimenzija mjerenje se provodi do donjeg ruba podne ploče, odnosno, ako je ispod ploče sloj toplinske izolacije, do donjeg ruba izolacije.

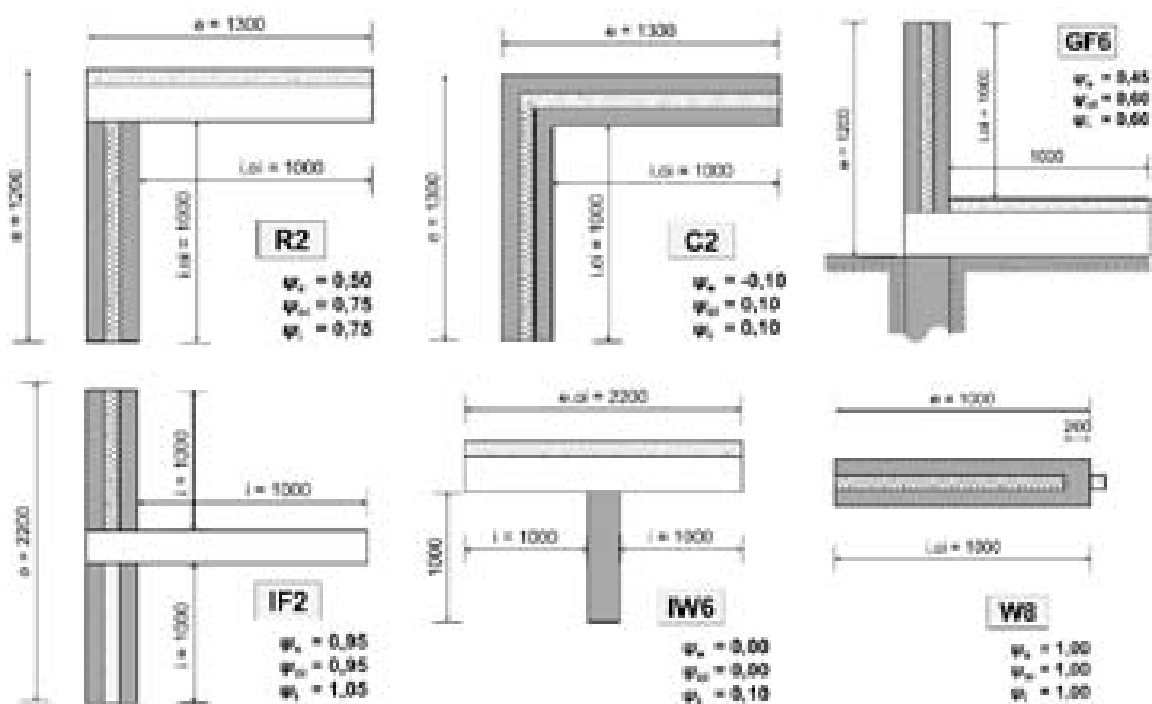
Za svaki tip toplinskog mosta postoje četiri položaja glavnog toplinsko-izolacijskog sloja: s vanjske strane, u sredini, s unutarnje strane ili s toplinskom izolacijom kroz čitavu debljinu građevnog dijela (npr. zid od laganih toplinsko-izolacijskih blokova). Glavni sloj toplinske izolacije je sloj s najvećim toplinskim otporom.

Vrijednosti duljinskog koeficijenta prolaska topline, ψ , navedene u tablici A.2 norme dobivene su dvodimenzionalnim numeričkim proračunima primjenom parametara iz tablice 4.22.

Tablica 4.22 Parametri upotrijebljeni za numeričke proračune čiji su rezultati dani u tablici A.2 norme HRN EN ISO 14683 [71]

Za sve detalje:		$R_{si} = 0,13 \text{ m}^2 \times \text{K/W}$ $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2 \times \text{K/W}$
Za vanjske zidove:		$d = 300 \text{ mm}$
Za unutarnje zidove:		$d = 200 \text{ mm}$
Za zidove s izolacijskim slojem:	- koeficijent prolaska topline - toplinski otpor izolacijskog sloja	$U = 0,343 \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$ $R = 2,500 \text{ m}^2 \times \text{K/W}$
Za lagane zidove:		$U = 0,375 \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$
Za podove na tlu:	- podna ploča - toplinska vodljivost tla - toplinski otpor izolacijskog sloja	$d = 200 \text{ mm}$ $\lambda = 2,0 \text{ W}/(\text{m} \times \text{K})$ $R = 2,5 \text{ m}^2 \times \text{K/W}$
Za stropove:		$d = 200 \text{ mm}$ $\lambda = 2,0 \text{ W}/(\text{m} \times \text{K})$
Za krovove:	- koeficijent prolaska topline - toplinski otpor izolacijskog sloja	$U = 0,365 \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$ $R = 2,5 \text{ m}^2 \times \text{K/W}$
Za okvire u otvorima:		$d = 60 \text{ mm}$
Za stupove:		$d = 300 \text{ mm}$ $\lambda = 2,0 \text{ W}/(\text{m} \times \text{K})$

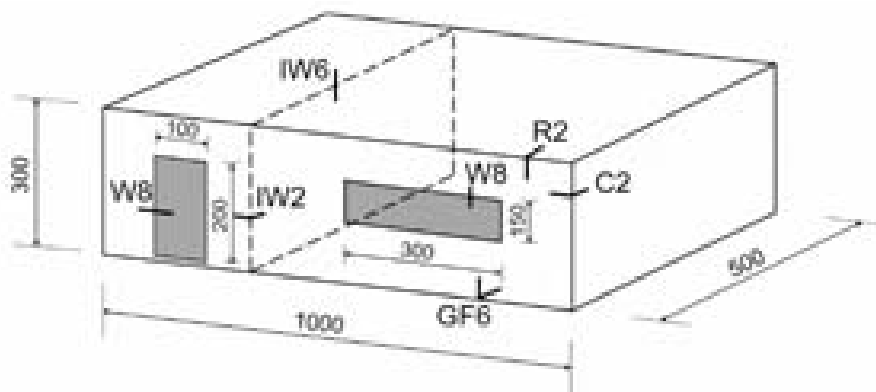
Na slici 4.32 dano je, radi ilustracije, nekoliko primjera linijskih toplinskih mostova iz tablice A.2 norme HRN EN ISO 14683 [71].



Slika 4.32 Primjeri linijskih toplinskih mostova iz tablice A.2 norme HRN EN ISO 14683[71] (*Napomena:* dimenzije su kotirane u mm, a koeficijenti ψ su u $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)

Primjer 4.13

Na slici 4.33 dan je shematski crtež prizemne zgrade s ravnim krovom, jednim pregradnim zidom, vanjskim vratima i prozorom. Kote u crtežu su u metrima, a predstavljaju vanjske dimenzije. Vrijednosti koeficijenata prolaska topline, U , različitih ravninskih građevnih dijelova zgrade s homogenim slojevima dani su u tablici 4.23. Potrebno je izračunati koeficijent toplinske veze koristeći za toplinske mostove podatke iz tablice A.2 norme HRN EN ISO 14683[71]. Točkaste toplinske mostove zanemariti.



Slika 4.33 Shematski prikaz zgrade s kotama vanjskih dimenzija i oznakama linijskih toplinskih mostova

Koeficijent toplinske veze za predmetnu zgradu, prema izrazu (4.147), svodi se na izraz

$$L = \sum_i A_i \times U_i + \sum_k \psi_k \times l_k \quad (4.154)$$

U tablici 4.23 dan je proračun vrijednosti koeficijenta toplinske veze u dijelu koji se odnosi na plošne dijelove ovojnice zgrade.

Tablica 4.23 Proračun koeficijenta toplinske veze kroz plošne dijelove ovojnice zgrade

Građevni dio zgrade	Koeficijent prolaska topline, U , $W/(m^2 \times K)$	Ploština građevnog dijela, A_e , m^2	Umnožak $U \times A_e$, W/K
Vanjski zid	0,400	83,5	33,40
Krov	0,300	50,0	15,00
Pod na tlu	0,350	50,0	17,50
Prozor	1,600	4,5	7,20
Vrata	2,000	2,0	4,00
Ukupno			77,10

Vrijednosti duljinskih koeficijenata prolaska topline linijskih toplinskih mostova te proračun vrijednosti koeficijenta toplinske veze u dijelu koji se odnosi na linijske toplinske mostove dani su u tablici 4.24.

Tablica 4.24 Proračun koeficijenta toplinske veze kroz linijske toplinske mostove ovojnice zgrade

Linijski toplinski most	Tip mosta	ψ_e W/(m×K)	l_e m	$\psi_e \times l_e$ W/K
Kut vanj. zid-krov	R2	0,50	30,0	15,00
Kut zid-zid	C2	-0,10	12,0	-1,20
Kut zid-pod	GF6	0,45	30,0	13,50
Spoj pr. zid-vanj. zid	IW2	0,95	6,0	5,70
Spoj pr. zid-krov	IW6	0,00	5,0	0,00
Spoj prozor/vrata-zid	W8	1,00	15,0	15,00
Ukupno				48,00

Ukupna vrijednost koeficijenta toplinske veze iznosi

$$L = 77,10 + 48,00 = 125,1 \text{ W/K}$$

Udio linijskih toplinskih mostova u ukupnom koeficijentu toplinske veze je 38,4 %.

4.4.10 Temperature na površini toplinskog mosta sa strane prostorije

Površinska temperatura toplinske ovojnice zgrade sa strane grijanog prostora zgrade karakterizira se faktorom temperature za površinu sa strane prostorije, f_{Rsi} . **Faktor temperature za površinu sa strane prostorije** je razlika temperature unutarnje površine, θ_{si} , proračunane uz otpor prijelaza topline na unutarnjoj površini R_{si} i vanjske temperature, θ_e , podijeljena razlikom unutarnje temperature, θ_i , i vanjske temperature, θ_e :

$$f_{Rsi} = \frac{(\theta_{si} - \theta_e)}{(\theta_i - \theta_e)} \quad (4.154)$$

Faktor f_{Rsi} je bezdimenzionalna veličina, a vrijednost joj se kreće u granicama od 0 do 1.

$f_{Rsi} = 1$ znači da je površinska temperatura sa strane prostorije jednaka temperaturi zraka u prostoriji.

$f_{Rsi} = 0$ znači da je površinska temperatura sa strane prostorije jednaka temperaturi vanjskog zraka.

Kad je poznat faktor temperature unutarnje površine, površinska temperatura sa strane prostorije može se proračunati za bilo koje vrijednosti temperature vanjskog i unutarnjeg zraka pomoću jednadžbe:

$$\theta_{si} = f_{Rsi} \times (\theta_i - \theta_e) + \theta_e \quad (4.155)$$

Na površini toplinskog mosta f_{Rsi} se određuje proračunom numeričkim metodama kako je prikazano u nastavku. Najvažnije mjesto proračuna površinske temperature obično je točka s najnižom površinskom temperaturom, $\theta_{si,min}$. Za tu točku provodi se procjena opasnosti površinske kondenzacije vodene pare i opasnosti razvoja plijesni.

4.4.10.1 Određivanje temperature na unutarnjoj površini iz 3-D proračuna

Dvije granične temperature

Ako postoje samo dva uključena okoliša, temperature površine mogu se izraziti u bezdimenzionalnom obliku prema jednadžbi:

$$f_{\text{Rsi}}(x, y, z) = \frac{[\theta_{\text{si}}(x, y, z) - \theta_e]}{(\theta_i - \theta_e)} \quad (4.156)$$

gdje je

$f_{\text{Rsi}}(x, y, z)$ faktor temperature za unutarnju površinu u točki (x,y,z), veličina bez dimenzija,
 $\theta_{\text{si}}(x, y, z)$ temperatura unutarnje površine u točki (x,y,z), u °C,
 θ_i unutarnja temperatura, u °C,
 θ_e vanjska temperatura, u °C.

Više od dvije granične temperature

Ako postoji više od dvije granične temperature, mora se koristiti ponder g . Njime se određuje odgovarajući utjecaj temperatura različitih toplinskih okoliša na temperaturu površine u promatranoj točki. S ponderom g omogućen je proračun temperature na svakom mjestu unutarnje površine s koordinatama (x,y,z) kao linearne funkcije bilo koje skupine graničnih temperatura.

Primjenom pondera temperature, temperatura površine u točki (x,y,z) u okolišu j , dana je izrazom:

$$\theta_j(x, y, z) = g_{j,1}(x, y, z) \times \theta_1 + g_{j,2}(x, y, z) \times \theta_2 + \dots + g_{j,n}(x, y, z) \times \theta_n \quad (4.157)$$

uz uvjet:

$$g_{j,1}(x, y, z) + g_{j,2}(x, y, z) + \dots + g_{j,n}(x, y, z) = 1 \quad (4.158)$$

Za model s n graničnih temperatura mogu se ponderi g proračunati tako da se $(n-1)$ puta ponovi proračun temperature u odabranoj točki. U svakom narednom proračunu za sve granične temperature postavi se da su 0 °C, osim jedne koja se postavi na 1 °C, kako je pokazano u tablici 4.25. Nakon $(n - 1)$ proračuna, ponder g_n se proračuna iz izraza (4.159).

Tablica 4.25 Shema proračuna pondera temperatura, g , u slučaju n graničnih temperatura

Proračun broj	Granične temperature, u °C				Ponderi
	θ_1	θ_2	θ_i	θ_{n-1}	
1	1	0	0	0	g_1
2	0	1	0	0	g_2
i	0	0	1	0	g_i
$n - 1$	0	0	0	1	g_{n-1}

4.4.10.2 Određivanje temperature na unutarnjoj površini iz 2-D proračuna

Dvije granične temperature

Ako postoje samo dva uključena okoliša, temperature površine mogu se izraziti u bezdimenzionalnom obliku prema jednadžbi

$$f_{\text{Rsi}}(x, y) = \frac{(\theta_{\text{si}}(x, y) - \theta_e)}{(\theta_i - \theta_e)} \quad (4.159)$$

gdje je

$f_{Rsi}(x,y)$ faktor temperature za unutarnju površinu u točki (x,y) , veličina bez dimenzija,

$\theta_{si}(x,y)$ temperatura unutarnje površine u točki (x,y) , u °C,

θ_i unutarnja temperatura, u °C,

θ_e vanjska temperatura, u °C.

Tri granične temperature

Ako postoje tri granične temperature moraju se koristiti ponderi temperature, g. Time se omogućuje proračun temperature na svakom mjestu unutarnje površine s koordinatama (x,y) kao linearne funkcije bilo koje skupine graničnih temperatura.

Temperatura površine u točki (x,y) u okolišu j , dana je izrazom:

$$\theta_j(x,y) = g_{j,1}(x,y) \times \theta_1 + g_{j,2}(x,y) \times \theta_2 + g_{j,3}(x,y) \times \theta_3 \quad (4.160)$$

uz uvjet

$$g_{j,1}(x,y) + g_{j,2}(x,y) + g_{j,3}(x,y) = 1 \quad (4.161)$$

Najvažnije mjesto proračuna površinske temperature obično je točka s najnižom površinskom temperaturom.

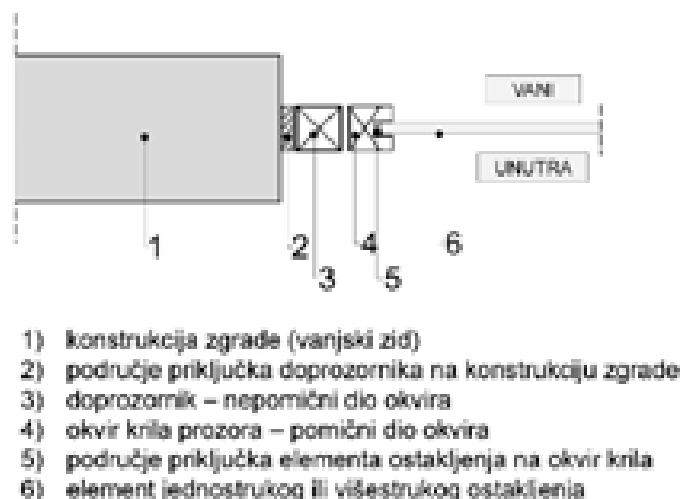
Površinska temperatura se proračuna pomoću jednadžbe (4.160) uz prethodni proračun vrijednosti $g_{j,1}$, $g_{j,2}$ i $g_{j,3}$.

4.5 Proračun koeficijenta prolaska topline, U , prozirnih građevnih dijelova

4.5.1 Uvod

Pod **prozirnim građevnim dijelovima** podrazumijevaju se prozori, vanjska vrata (balkonska vrata) i krovni prozori.

Prozor je otvor u zidu ili krovu zgrade zatvoren građevnom komponentom koja se sastoji najčešće od okvira učvršćenog za konstrukciju zgrade (doprozornik) i prozirnog elementa u okviru (krilo prozora) koji je pričvršćen za doprozornik. Kod toga treba razlikovati područje priključka doprozornika na konstrukciju zgrade od područja priključka ostakljenog elementa na okvir krila prozora (vidjeti sliku 4.34).



Slika 4.34 Shematski prikaz priključka prozora na konstrukciju zgrade

Prozor se razlikuje od vrata po tome što ne seže do poda već samo do parapeta. Prozor osigurava više funkcija za dotičnu prostoriju: osvjetljenje, pogled prema van, provjetravanje,

ponekad i sigurnu evakuaciju. Sve te funkcije su osigurane poštujući odvojenost dva prostora odgovarajućom toplinskom i zvučnom izolacijom prozora.

Podjela prozora provodi se prema različitim kriterijima:

- prema namjeni prostora (kuhinjski prozor, podrumski prozor,...),
- prema načinu otvaranja (otvaranje prema unutra: lijevo ili desno, otvaranje prema van: lijevo ili desno),
- prema načinu okretanja krila prozora (zaokretno krilo, otklopno krilo, zaokretno-otklopno krilo, posmično / klizno krilo,...),
- prema materijalu okvira prozora (drveni prozori, PVC prozori, aluminijski prozori,...),
- prema sastavu elementa ostakljenja (prozor s jednostrukim staklom, prozor s dvostrukim izolirajućim staklom, prozor s trostrukim izolirajućim staklom,...),
- prema konstrukciji prozora (jednostruki prozor, vezani prozor krilo na krilo, dvostruki prozor) (vidjeti sliku 4.35).



Slika 4.35 Shematski prikaz vrsta drvenog prozora prema konstrukciji

Jednostruki prozor ostakljen s jednom staklenom pločom koristio se sve do polovice sedamdesetih godina 20-tog stoljeća u područjima s blagom klimom, a dvostruki prozor sastavljen od dva jednostruka prozora s po jednom staklenom pločom u svakom prozoru, u području s hladnom klimom. Dvostruki prozor od polovice 20. stoljeća sve više zamjenjuje prozor krilo na krilo, kojim nije postignuto poboljšanje toplinske izolacije prozora već samo jednostavnije korištenje. Danas se za prozore grijanih prostorija koriste isključivo jednostruki prozori s višestrukim toplinsko-izolacijskim ostakljenjem.

Vrata su također složena komponenta zgrade, koja, poput prozora, mora ispuniti mnoge zahtjeve. Za razliku od prozora ona sežu sve do razine poda i namijenjena su u pravilu za prolaz ljudi. Vanjska vrata su kao i prozori sastavni dio toplinske ovojnice zgrade koji odvajaju unutarnji prostor od vanjskog, dakle dva klimatski potpuno različita prostora. Vrata se sastoje od vratnog krila učvršćenog na okvir vrata (dovratnik) koji je čvrsto povezan sa zidom.

Energetska učinkovitost prozora i vanjskih vrata ocjenjuje se prema tome koliko se kroz njih izgubi topline iz zgrade transmisijom i ventilacijom. Transmisijski toplinski gubitci karakteriziraju se koeficijentom prolaska topline prozora, U_w (eng.: window), odnosno vrata, U_d (eng.: door). Ventilacijski toplinski gubitci karakteriziraju se razredom propusnosti zraka prozora / vrata, koji ovisi o zabrtvljenosti reške/sljubnice između krila prozora / vrata i doprozornika / dovratnika. Osim toplinskih gubitaka, providni elementi prozora i vanjskih vrata omogućavaju prolaz sunčeva zračenja u prostor zgrade i njegovo zagrijavanje čime se smanjuje potrebna energija za grijanje. Ovo svojstvo prozirnih elemenata karakterizira se stupnjem propuštanja sunčeve energije, g (vidjeti poglavlje 6).

Koeficijent prolaska topline prozora ili vanjskih vrata može se utvrditi proračunom (norme HRN EN ISO 10077-1 [72] i HRN EN ISO 10077-2 [73]), mjerenjem (norme HRN EN ISO 12567-1 [74] i HRN EN ISO 12567-2 [75]) ili kod prozora još i pomoću zadanih tabličnih vrijednosti (norma HRN EN ISO 10077-1 [72]).

4.5.2 Proračun koeficijenta prolaska topline prozora, U_w

Jednostruki prozor

Shematski prikaz jednostrukog prozora dan je na slici 4.36. Koeficijent prolaska topline jednostrukog prozora, U_w , u $W/(m^2 \times K)$, mora se izračunati pomoću jednadžbe:

$$U_w = \frac{(\sum A_g \times U_g + \sum A_f \times U_f + \sum l_g \times \psi_g)}{(\sum A_g + \sum A_f)} \quad (4.162)$$

gdje je

U_g koeficijent prolaska topline ostakljenja (eng.: glazing), u $W/(m^2 \times K)$,

U_f koeficijent prolaska topline okvira (eng.: frame), u $W/(m^2 \times K)$,

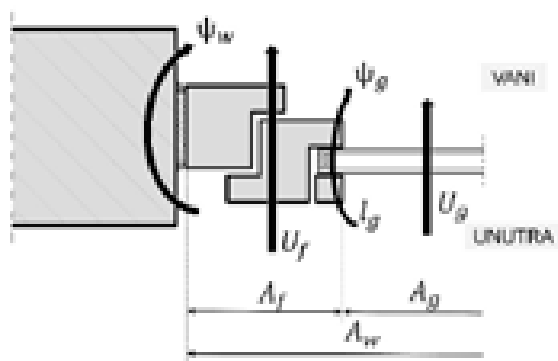
ψ_g duljinski koeficijent prolaska topline linijskog toplinskog mosta (spoj elementa ostakljenja s okvirom krila prozora), u $W/(m \times K)$,

A_g ploština ostakljenja, u m^2 ,

A_f ploština okvira, u m^2 ,

l_g duljina spoja elementa ostakljenja s okvirom krila prozora, u m.

Linijski koeficijent prolaska topline ψ_w na spoju prozora i konstrukcije zgrade ne ulazi u proračun U_w .



Slika 4.36 Shematski prikaz udjela pojedinih dijelova jednostrukog prozora u ukupnom koeficijentu prolaska topline prozora, U_w

Ako je jedan dio ostakljenja zamijenjen neprozirnom ispunom, koeficijent prolaska topline, U_w , proračuna se pomoću jednadžbe:

$$U_w = \frac{(\sum A_g \times U_g + \sum A_p \times U_p + \sum A_f \times U_f + \sum l_g \times \psi_g + \sum l_p \times \psi_p)}{(\sum A_g + \sum A_p + \sum A_f)} \quad (4.163)$$

gdje je

U_p koeficijent prolaska topline neprozirne ispune, u $W/(m^2 \times K)$,

A_p ploština neprozirne ispune, u m^2 ,

ψ_p duljinski koeficijent prolaska topline za neprozirnu ispunu, u $W/(m \times K)$,

l_p duljina spoja neprozirne ispune i okvira, u m.

Kao ploština ostakljenja, A_g , odnosno ispune, A_p , uzima se manja od vidljivih površina ostakljenja, odnosno ispune, gledanih s obje strane.

l_g je ukupna duljina ruba elementa ostakljenja. l_p je ukupna duljina ruba neprozirne ispune. Ako je ta duljina na svakoj strani elementa ostakljenja različita, u proračun se uvrštava veća od te dvije vrijednosti.

Ploština unutarnje projicirane površine okvira, $A_{f,i}$, je ploština projekcije okvira s unutarnje strane, na ravninu paralelnu s površinom ostakljenja. Ploština vanjske projicirane površine

okvira, $A_{f,e}$, je ploština projekcije okvira s vanjske strane na ravninu paralelnu s površinom ostakljenja. Kao ploština okvira, A_f , uzima se veća od dvije projicirane površine gledane s obje strane.

$$A_f = \max(A_{f,i}; A_{f,e}) \quad (4.164)$$

Ploština prozora, A_W , je zbroj ploštine okvira, A_f , i ploštine ostakljenja, A_g

$$A_W = A_g + A_f \quad (4.165)$$

Linijski toplinski most na spoju ostakljenja s okvirom krila prozora nastaje prvenstveno zbog rubnog povezivanja staklenih ploča višestrukog izolacijskog ostakljenja. Zato se u slučaju jednostrukog ostakljenja djelovanje ovog toplinskog mosta može zanemariti. Ako po rubu neprozirne ispune ne postoji linijski toplinski most, utjecaj toplinskog mosta ψ_p može se također zanemariti.

Konačna vrijednost koeficijenta prolaska topline prozora, U_W , u $W/(m^2 \times K)$, mora biti navedena s dvije značajne znamenke.

Duljinski koeficijent prolaska topline, ψ_W , na mjestu spajanja prozora i konstrukcije zgrade nije dio koeficijenta prolaska topline prozora već se uzima u obzir kao dio toplinskih gubitaka ovojnice zgrade.

Da bi se mogao izračunati koeficijent prolaska topline prozora, U_W , pomoću jednadžbi (4.162) i (4.163), potrebno je poznavati vrijednosti veličina U_g , U_f , U_p , ψ_g i ψ_p , koje su ulazni parametri za proračun. Njihove vrijednosti se mogu odrediti na jedan od načina navedenih u tablici 4.26.

Tablica 4.26 Metode utvrđivanja ulaznih parametara za proračun koeficijenta prolaska topline prozora, U_W

Potrebni ulazni parametri	Metode utvrđivanja vrijednosti ulaznog parametra
U_g	Tablice zadanih vrijednosti: HRN EN ISO 10077-1 [72] Metoda proračuna: HRN EN 673 [77] Metoda mjerenja: HRN EN 674 [78]
U_f	Tablice zadanih vrijednosti: HRN EN ISO 10077-1 [72] Metoda proračuna: HRN EN ISO 10077-2 [73] Metoda mjerenja: HRN EN 12412-2 [76]
ψ_g, ψ_p	Tablice zadanih vrijednosti: HRN EN ISO 10077-1 [72] Metoda proračuna: HRN EN ISO 10077-2 [73]
U_p	Metoda proračuna: HRN EN ISO 6946 [66] (vidjeti točku 4.2)

Dvostruki prozor

Shematski prikaz dvostrukog prozora dan je na slici 4.37. Dvostruki prozor sastoji se ustvari od dva odvojena jednostruka prozora. Koeficijent prolaska topline dvostrukog prozora, U_W , u $W/(m^2 \times K)$, mora se izračunati pomoću jednadžbe:

$$U_W = \frac{1}{\left(\frac{1}{U_{w1}} + R_{si} + R_s + R_{se} + \frac{1}{U_{w2}} \right)} \quad (4.166)$$

gdje je

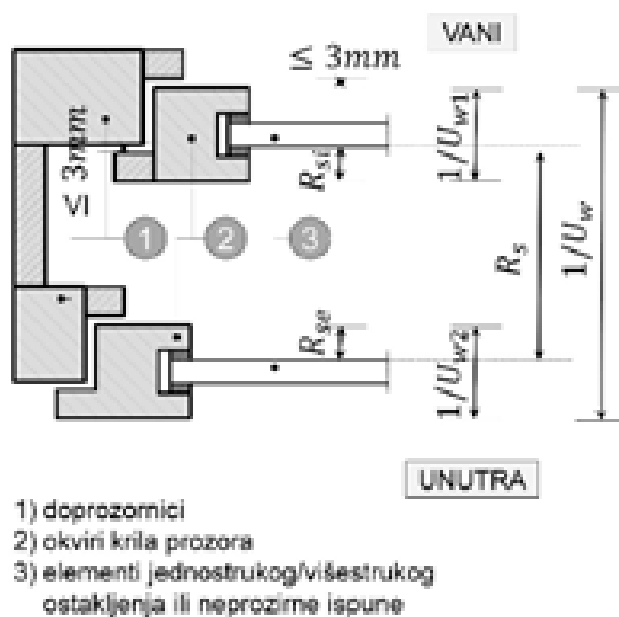
U_{w1} koeficijent prolaska topline vanjskog prozora, u $W/(m^2 \times K)$, izračunatog samostalno prema jednadžbi (4.163),

U_{w2} koeficijent prolaska topline unutarnjeg prozora, u $W/(m^2 \times K)$, izračunatog samostalno prema jednadžbi (4.163),

R_{si} toplinski otpor unutarnjeg prijelaza topline, u $W/(m^2 \times K)$,

R_{se} toplinski otpor vanjskog prijelaza topline, u $W/(m^2 \times K)$,

R_s toplinski otpor prostora (sloja zraka) između ostakljenja dvaju prozora, u $W/(m^2 \times K)$.



Slika 4.37 Shematski prikaz dvostrukog prozora s naznačenim toplinskim otporima

Ako je reška (razdjelnica) između krila prozora i doprozornika veća od 3 mm ova se metoda proračuna ne primjenjuje.

Toplinski otpori unutarnjeg i vanjskog prijelaza topline dani su u tablici 4.3.

Toplinski otpori sloja zraka, R_s , izračunati pomoću norme HRN EN 673 [77], za okomite prozore ($90^\circ C \geq \alpha \geq 60^\circ C$) i dvostruko izolacijsko staklo, dani su u tablici 4.27.

Tablica 4.27 Toplinski otpor R_s , u $W/(m^2 \times K)$, neprovjetravanog sloja zraka, za dvostruke prozore i prozore krilo na krilo (prema HRN EN ISO 10077-1 [72])

Debljina sloja zraka u mm	Toplinski otpor sloja zraka, R_s , $W/(m^2 \times K)$				
	Jedna strana s dodatnim slojem emisivnosti $\varepsilon =$				Obje strane bez dodatnog sloja
	0,1	0,2	0,4	0,8	
6	0,211	0,191	0,163	0,132	0,127
9	0,299	0,259	0,211	0,162	0,154
12	0,377	0,316	0,247	0,182	0,173
15	0,447	0,364	0,276	0,197	0,186

50	0,406	0,336	0,260	0,189	0,179
100	0,376	0,315	0,247	0,182	0,173
300	0,333	0,284	0,228	0,171	0,163

Konačna vrijednost koeficijenta prolaska topline prozora, U_w , u $W/(m^2 \times K)$, mora biti navedena s dvije značajne znamenke.

Prozor krilo na krilo

Shematski prikaz prozora krilo na krilo dan je na slici 4.38. Prozor krilo na krilo sastoji se od nepomičnog dijela okvira (doprozornika) i dva odvojena krila. Koeficijent prolaska topline prozora krilo na krilo, U_w , mora se izračunati pomoću jednadžbe (4.163). Da bi se odredio koeficijent prolaska topline kombiniranog ostakljenja, U_g , u $W/(m^2 \times K)$, mora se koristiti jednadžba:

$$U_g = \frac{1}{\left(\frac{1}{U_{g1}} + R_{si} + R_s + R_{se} + \frac{1}{U_{g2}} \right)} \quad (4.167)$$

gdje je

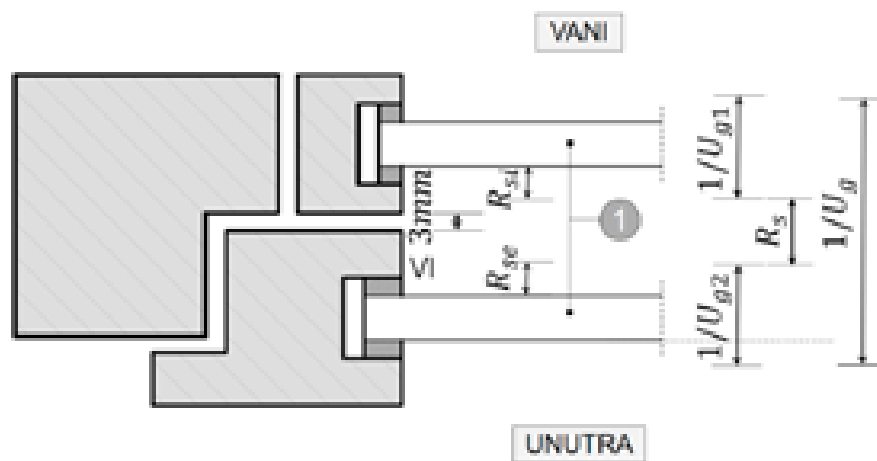
U_{g1} koeficijent prolaska topline vanjskog ostakljenja, u $W/(m^2 \times K)$, izračunat prema jednadžbi (4.169) odnosno (4.170),

U_{g2} koeficijent prolaska topline unutarnjeg ostakljenja, u $W/(m^2 \times K)$, izračunat prema jednadžbi (4.169) odnosno (4.170),

R_{si} toplinski otpor unutarnjeg prijelaza topline za vanjsko ostakljenje kad bi bilo ugrađeno samostalno, u $W/(m^2 \times K)$,

R_{se} toplinski otpor vanjskog prijelaza topline za unutarnje ostakljenje kad bi bilo ugrađeno samostalno, u $W/(m^2 \times K)$,

R_s toplinski otpor prostora (sloja zraka) između unutarnjeg i vanjskog ostakljenja, u $W/(m^2 \times K)$.



1) elementi jednostrukog/višestrukog ostakljenja

Slika 4.38 Shematski prikaz prozora krilo na krilo

Toplinski otpori unutarnjeg i vanjskog prijelaza topline dani su u tablici 4.3, a toplinski otpor sloja zraka, R_s , u tablici 4.27.

Ako je reška (razdjelnica) između dva krila prozora veća od 3 mm ova se metoda proračuna ne primjenjuje.

Konačna vrijednost koeficijenta prolaska topline prozora, U_w , u $W/(m^2 \times K)$, mora biti navedena s dvije značajne znamenke.

Tipične vrijednosti koeficijenta prolaska topline prozora, U_w

U tablici 4.28 dane su tipične vrijednosti koeficijenta prolaska topline prozora, U_w , izračunate prema jednadžbi (4.162) koristeći duljinske koeficijenta prolaska topline, ψ_g , iz tablice 4.35. Podaci u tablici 4.28 vrijede za prozore u vertikalnom položaju, dimenzija $1,23 \text{ m} \times 1,48 \text{ m}$, kod kojih udio ploštine okvira iznosi 30 % ukupne ploštine prozora. Vrijednosti koeficijenta prolaska topline ostakljenja $U_g \geq 2,1 \text{ W}/(m^2 \times K)$ odnose se na stakla bez Low-E nanosa, a vrijednosti $U_g \leq 2,0 \text{ W}/(m^2 \times K)$ odnose se na stakla s Low-E nanosom. Koeficijent prolaska topline okvira $U_f = 7,0 \text{ W}/(m^2 \times K)$ odnosi se na metalni profil bez toplinskog prekida, $2,2 \leq U_f \leq 3,8$ na metalne profile s toplinskim prekidom, a $U_f \leq 2,0 \text{ W}/(m^2 \times K)$ na okvire od drva ili PVC-a.

Tablica 4.28 Tipične vrijednosti koeficijenta prolaska topline prozora, U_w , za vertikalni položaj prozora i udio ploštine okvira u ukupnoj ploštini prozora 30 % (prema HRN EN ISO 10077-1 [72])

Vrsta ostakljenja	U_g $W/(m^2 \times K)$	Koeficijent prolaska topline okvira, U_f , $W/(m^2 \times K)$								
		0,8	1,0	1,4	2,0	2,2	2,6	3,0	3,8	7,0
Jednostruko	5,7	4,2	4,3	4,4	4,6	4,6	4,8	4,9	5,1	6,1
Dvostruko ili trostruko	3,3	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	3,3	3,4	3,6	4,5
	3,1	2,6	2,6	2,7	2,9	3,0	3,1	3,3	3,5	4,3
	2,9	2,4	2,5	2,6	2,8	2,9	3,0	3,1	3,4	4,2
	2,7	2,3	2,3	2,5	2,6	2,7	2,9	3,0	3,2	4,0
	2,5	2,1	2,2	2,3	2,5	2,6	2,7	2,8	3,1	3,9
	2,3	2,0	2,1	2,2	2,4	2,5	2,6	2,7	3,0	3,8
	2,1	1,9	1,9	2,0	2,2	2,3	2,4	2,6	2,8	3,6
	2,0	1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	2,5	2,6	2,8	3,6
	1,9	1,8	1,8	1,9	2,1	2,3	2,4	2,5	2,7	3,6
	1,7	1,6	1,7	1,8	2,0	2,1	2,2	2,4	2,6	3,4
	1,5	1,5	1,5	1,7	1,8	2,0	2,1	2,2	2,5	3,3
	1,3	1,3	1,4	1,5	1,7	1,8	2,0	2,1	2,3	3,1
	1,1	1,2	1,3	1,4	1,6	1,7	1,8	1,9	2,2	3,0
	0,9	1,1	1,1	1,2	1,4	1,6	1,7	1,8	2,0	2,9
	0,7	0,9	1,0	1,1	1,3	1,4	1,5	1,7	1,9	2,7
	0,5	0,8	0,8	1,0	1,2	1,3	1,4	1,5	1,8	2,6

4.5.3 Proračun koeficijenta prolaska topline ostakljenja

Koeficijent prolaska topline jednoslojnog ili laminiranog stakla, U_g , u $W/(m^2 \times K)$, mora se izračunati pomoću jednadžbe:

$$U_g = \frac{1}{\left(R_{se} + \frac{\sum_j d_j}{\lambda_j + R_{si}} \right)} \quad (4.168)$$

gdje je

- R_{se} toplinski otpor vanjskog prijelaza topline, u $m^2 \times K/W$,
 λ_j toplinska vodljivost stakla, odnosno prozirnog materijala, u $W/(m \times K)$,
 d_j debljina stakla, odnosno prozirnog materijala, u m,
 R_{si} toplinski otpor unutarnjeg prijelaza topline, u $m^2 \times K/W$.

U slučaju višestrukog ostakljenja, koeficijent prolaska topline, U_g , u $W/(m^2 \times K)$, mora se izračunati u skladu s normom HRN EN 673 [77] ili pomoću jednadžbe:

$$U_g = \frac{1}{\left(R_{se} + \frac{\sum_j d_j}{\lambda_j + \sum R_{sj} + R_{si}} \right)} \quad (4.169)$$

gdje je

- R_{se} toplinski otpor vanjskog prijelaza topline, u $m^2 \times K/W$,
 λ_j toplinska vodljivost stakla, odnosno prozirnog materijala sloja j, u $W/(m \times K)$,
 d_j debljina stakla, odnosno prozirnog materijala sloja j, u m,
 R_{si} toplinski otpor unutarnjeg prijelaza topline, u $m^2 \times K/W$,
 $R_{s,j}$ toplinski otpor sloja zraka j, u $m^2 \times K/W$.

Toplinski otpori unutarnjeg i vanjskog prijelaza topline dani su u tablici 4.3, a toplinski otpor sloja zraka, R_s , u tablici 4.27.

U tablicama 4.29 i 4.30 navedeni su koeficijenti prolaska topline, U_g , za dvostruko i trostruko izolacijsko ostakljenje, izračunati prema normi HRN EN 673 [77]. Vrijednosti su dane za različite emisivnosti površina stakala s Low-E nanosom i za različite plinove kojima je ispunjen prostor između stakala.

Tablica 4.29 Zadane (tablične) vrijednosti koeficijenta prolaska topline, U_g , za dvostruko izolacijsko ostakljenje, izračunate prema HRN EN 673 [77], [73]

Dvostruko izolacijsko ostakljenje			U_g za razne vrste plina u prostoru između stakala (koncentracija plina veća od 90 %)				
Vrsta stakla	Emisivnost	Dimenzije mm	Zrak	Argon	Kripton	SF ₆	Ksenon
Obično staklo	0,89	4-6-4	3,3	3,0	2,8	3,0	2,6
		4-8-4	3,1	2,9	2,7	3,1	2,6
		4-12-4	2,8	2,7	2,6	3,1	2,6
		4-16-4	2,7	2,6	2,6	3,1	2,6
		4-20-4	2,7	2,6	2,6	3,1	2,6

Jedna ploča stakla s Low-E nanosom	$\leq 0,2$	4-6-4	2,7	2,3	1,9	2,3	1,6
		4-8-4	2,4	2,1	1,7	2,4	1,6
		4-12-4	2,0	1,8	1,6	2,4	1,6
		4-16-4	1,8	1,6	1,6	2,5	1,6
		4-20-4	1,8	1,7	1,6	2,5	1,7
	$\leq 0,1$	4-6-4	2,6	2,2	1,7	2,1	1,4
		4-8-4	2,2	1,9	1,4	2,2	1,3
		4-12-4	1,8	1,5	1,3	2,3	1,3
		4-16-4	1,6	1,4	1,3	2,3	1,4
		4-20-4	1,6	1,4	1,4	2,3	1,4
	$\leq 0,05$	4-6-4	2,5	2,1	1,5	2,0	1,2
		4-8-4	2,1	1,7	1,3	2,1	1,1
		4-12-4	1,7	1,3	1,1	2,1	1,2
		4-16-4	1,4	1,2	1,2	2,2	1,2
		4-20-4	1,5	1,2	1,2	2,2	1,2

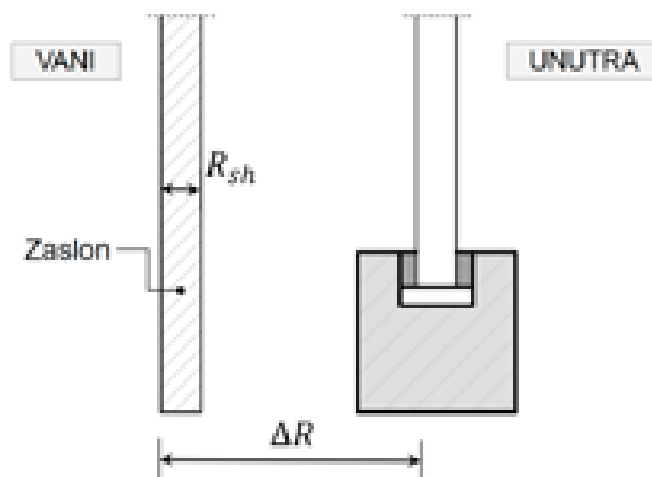
Tablica 4.30 Zadane (tablične) vrijednosti koeficijenti prolaska topline, U_g , za trostruko izolacijsko ostakljenje, izračunate prema HRN EN 673 [77], [72]

Trostruko izolacijsko ostakljenje			U_g za razne vrste plina u prostoru između stakala (koncentracija plina veća od 90 %)				
Vrsta stakla	Emisivnost	Dimenzije mm	Zrak	Argon	Kripton	SF ₆	Ksenon
Obično staklo	0,89	4-6-4-6-4	2,3	2,1	1,8	1,9	1,7
		4-8-4-8-4	2,1	1,9	1,7	1,9	1,6
		4-12-4-12-4	1,9	1,8	1,6	2,0	1,6
Dvije ploče stakla s Low-E nanosom	$\leq 0,2$	4-6-4-6-4	1,8	1,5	1,1	1,3	0,9
		4-8-4-8-4	1,5	1,3	1,0	1,3	0,8
		4-12-4-12-4	1,2	1,0	0,8	1,3	0,8
	$\leq 0,1$	4-6-4-6-4	1,7	1,3	1,0	1,1	0,8

		4-8-4-8-4	1,4	1,1	0,8	1,1	0,7
		4-12-4-12-4	1,1	0,9	0,6	1,2	0,6
	≤ 0,05	4-6-4-6-4	1,6	1,2	0,9	1,1	0,7
		4-8-4-8-4	1,3	1,0	0,7	1,1	0,5
		4-12-4-12-4	1,0	0,8	0,5	1,1	0,5

4.5.4 Proračun koeficijenta prolaska topline prozora sa zatvorenim zaslonom s vanjske strane

Zaslon (kapak) s vanjske strane prozora uzrokuje dodatni toplinski otpor, koji potječe od sloja zraka između zaslona i prozora i toplinskog otpora samog zaslona (vidjeti sliku 4.39).



Slika 4.39 Prozor sa zaslonom s vanjske strane

Koeficijent prolaska topline prozora sa zatvorenim zaslonom, U_{ws} , u $W/(m^2 \times K)$, izračunava se pomoću jednadžbe:

$$U_{ws} = \frac{1}{\frac{1}{U_w} + \Delta R} \quad (4.170)$$

gdje je

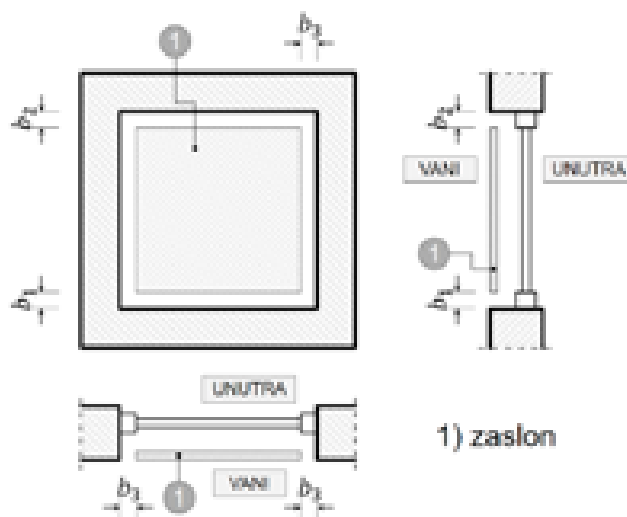
U_w koeficijent prolaska topline prozora bez zaslona, u $W/(m^2 \times K)$,

ΔR dodatni toplinski otpor sloja zraka između prozora i zaslona i toplinski otpor samog zaslona, u $W/(m^2 \times K)$.

Dodatni toplinski otpor, ΔR , ovisi o toplinskom otporu samog zaslona, R_{sh} , i o njegovoj propustljivosti za zrak. R_{sh} se može izračunati ili izmjeriti. Propustljivost zaslona za zrak ocjenjuje se ovisno o vrijednosti ukupnog efektivnog razmaka između zaslona i elemenata oko njega, u skladu sa slikom 4.40, danog izrazom:

$$b_{sh} = b_1 + b_2 + b_3 \quad (4.171)$$

gdje su b_1 , b_2 i b_3 prosječni razmaci po rubu zaslona. b_3 se pribraja samo za jednu stranu jer bočni razmaci manje utječu na propusnost zraka od razmaka na gornjoj i donjoj strani.



Slika 4.40 Određivanje ukupnog efektivnog razmaka između zaslona i elemenata oko njega

Razred zrakopropusnosti zaslona u ovisnosti o ukupnom efektivnom razmaku, b_{sh} , određuje se prema tablici 4.31.

Tablica 4.31 Odnos između razreda zrakopropusnosti zastora i ukupnog efektivnog razmaka između zaslona i elemenata oko njega, prema [72]

Razred	Zrakopropusnost zaslona	Efektivni razmak, b_{sh} , u mm
1	Vrlo velika propusnost zraka	$b_{sh} \geq 35$
2	Velika propusnost zraka	$15 \leq b_{sh} < 35$
3	Prosječna propusnost zraka	$8 \leq b_{sh} < 15$
4	Mala propusnost zraka	$b_{sh} \leq 8$
5	Nepropustan za zrak	$b_{sh} \leq 3$ i $b_1+b_3=0$ ili $b_2+b_3=0$

Dodatni toplinski otpor, ΔR , ovisno o toplinskom otporu samog zaslona, R_{sh} , i o njegovom razredu zrakopropusnosti određuje se pomoću izraza u tablici 4.32.

Tablica 4.32 Dodatni toplinski otpor za prozore sa zatvorenim zaslonom, prema [72]

Zrakopropusnost zaslona	Dodatni toplinski otpor, ΔR , u $m^2 \times K/W$
Vrlo velika propusnost zraka	0,08
Velika propusnost zraka	$0,25 \times R_{sh} + 0,09$
Prosječna propusnost zraka	$0,55 \times R_{sh} + 0,11$
Mala propusnost zraka	$0,80 \times R_{sh} + 0,14$
Nepropustan za zrak	$0,95 \times R_{sh} + 0,17$

Ukoliko nedostaju vrijednosti za R_{sh} , za uobičajene zaslone mogu se koristiti tipične vrijednosti toplinskog otpora iz tablice 4.33.

Tablica 4.33 Tipične vrijednosti toplinskog otpora R_{sh} nekih uobičajenih tipova zaslona, prema [72]

Vrsta zaslona	Tipičan toplinski otpor zaslona, R_{sh} , u $m^2 \times K/W$
Aluminijske rolete	0,01
Drvene i plastične rolete bez pjenaste ispune	0,10
Plastične rolete s pjenastom ispunom	0,15
Drveni kapci debljine 25 mm do 30 mm	0,20

4.5.5 Koeficijent prolaska topline vrata

Koeficijent prolaska topline vrata, U_D , u $W/(m^2 \times K)$, za konstrukcije slične prozorima, izračuna se pomoću jednadžbe:

$$U_D = \frac{(\sum A_g \times U_g + \sum A_f \times U_f + \sum l_g \times \psi_g)}{(\sum A_g + \sum A_f)} \quad (4.172)$$

gdje je

U_g koeficijent prolaska topline ostakljenja, u $W/(m^2 \times K)$,

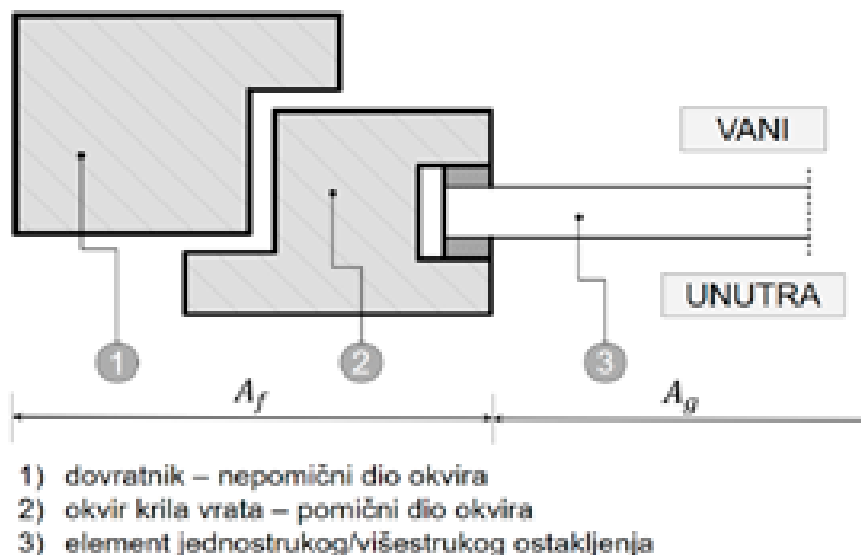
U_f koeficijent prolaska topline okvira, u $W/(m^2 \times K)$,

ψ_g duljinski koeficijent prolaska topline linijskog toplinskog mosta (spoj elementa ostakljenja s okvirom krila vrata), u $W/(m \times K)$,

A_g ploština površine ostakljenja, u m^2 ,

A_f ploština površine okvira, u m^2 ,

l_g duljina spoja elementa ostakljenja s okvirom, u m.



Slika 4.41 Shematski prikaz vrata s ostakljenjem

Ako se vrata sastoje od okvira, ostakljenja i neprozirne ispune, koeficijent prolaska topline vrata, U_D , proračuna se pomoću jednadžbe:

$$U_D = \frac{(\sum A_g \times U_g + \sum A_p \times U_p + \sum A_f \times U_f + \sum l_g \times \psi_g + \sum l_p \times \psi_p)}{(\sum A_g + \sum A_p + \sum A_f)} \quad (4.173)$$

gdje je

U_p koeficijent prolaska topline neprozirne ispune, u $W/(m^2 \times K)$,

A_p ploština neprozirne ispune, u m^2 ,

ψ_p duljinski koeficijent prolaska topline za neprozirnu ispunu, u $W/(m \times K)$.

Ako vrata ne sadrže ostakljenje, za proračun se koristi jednačba (4.173) s tim da se u nju uvrsti $A_g = 0$ i $I_g = 0$.

Ako sklop vrata nije konstruiran slično prozoru, koeficijent prolaska topline krila vrata može se izračunati u skladu s točkom 4.2.1 (odnosno HRN EN ISO 6946 [66]).

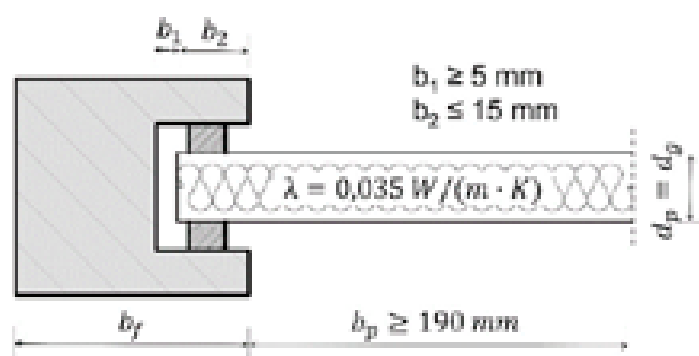
Konačna vrijednost koeficijenta prolaska topline vrata, U_D , u $W/(m^2 \times K)$, mora biti navedena s dvije značajne znamenke.

4.5.6 Koeficijent prolaska topline okvira prozora / vrata

Koeficijent prolaska topline okvira, U_f , koristi se kao ulazni podatak za proračun koeficijenta prolaska topline prozora, U_w . Koeficijent U_f određuje se računski pomoću numeričkih metoda (metoda konačnih elemenata, metoda konačnih razlika,...) u skladu s normom HRN EN ISO 10077-2 [75] ili izravnim mjerenjem u vrućoj komori u skladu s normom HRN EN ISO 12412-2 [76]. U normi HRN EN ISO 10077-1 [72] dane su tipične vrijednosti koeficijenta U_f za uobičajene vrste okvira, koje se mogu koristiti u nedostatku proračunatih ili izmjerenih vrijednosti. Ove zadane vrijednosti, dane u tablicama ili dijagramima, dobivene su statističkom obradom velikog broja izmjerenih ili izračunatih vrijednosti.

Proračun koeficijenta prolaska topline okvira

Proračun koeficijenta prolaska topline okvira, U_f , provodi se dvodimenzionalnom numeričkom metodom u skladu s normom EN ISO 10211 [70]. Pretpostavlja se da su profili postavljeni vertikalno i da je glavni toplinski tok usmjeren okomito na ravninu paralelnu s vanjskom i unutarnjom površinom okvira. Otpori vanjskog i unutarnjeg prijelaza topline su $R_{se} = 0,04 m^2 \times K/W$ i $R_{si} = 0,13 m^2 \times K/W$. U uglovima dviju ploha unutarnji koeficijent prijelaza topline se povećava na širini/dubini do 30 mm zbog smanjenja prijenosa topline zračenjem i konvekcijom, i tu iznosi $R_{si} = 0,20 m^2 \times K/W$. U proračunskom modelu ostakljenje ili neprozirna ispunjena zamjene se pločom homogenog toplinsko-izolacijskog materijala toplinske vodljivosti $\lambda = 0,035 W/(m \cdot K)$, kako je to prikazano na slici 4.42.



Slika 4.42 Proračunski model profila okvira s ugrađenim zamjenskim toplinsko-izolacijskim materijalom

Za sklop prikazan na slici 4.42 proračuna se koeficijent toplinske veze $L_{2D,f}$. Koeficijent prolaska topline samog okvira, U_f , u $W/(m^2 \times K)$, dobije se iz izraza:

$$U_f = \frac{(L_{2D,f} - U_p \times b_p)}{b_f} \quad (4.174)$$

gdje je

$L_{2D,f}$ dvodimenzionalni koeficijent toplinske veze površine prikazane na slici 4.42, u $W/(m \times K)$,

U_p koeficijent prolaska topline ispune podalje od ruba, u $W/(m^2 \times K)$,

b_p širina ispune u proračunskom modelu, u m,

b_f projicirana širina profila okvira, u m.

Zadane vrijednosti koeficijenta prolaska topline okvira

Okviri na bazi polimera

Tipične vrijednosti koeficijenta prolaska topline okvira na bazi polimera, pojačanih s metalnim profilom u jezgri, dani su u tablici 4.34.

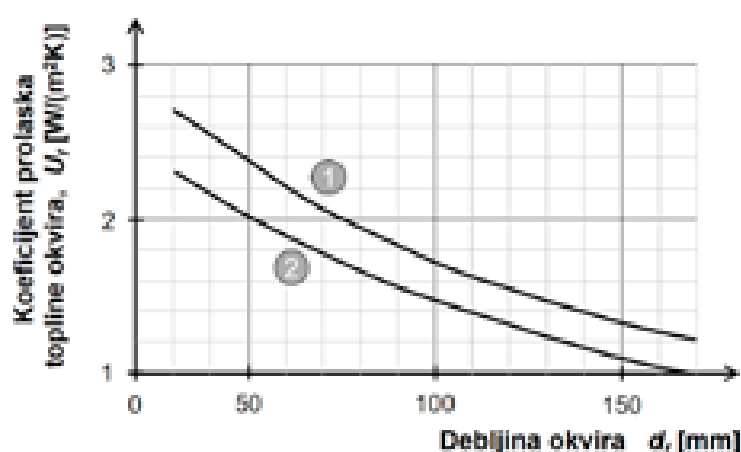
Tablica 4.34 Tipične vrijednosti koeficijenta U_f za okvire na bazi polimera, prema [72]

Materijal okvira	Vrsta okvira	U_f $W/(m^2 \times K)$
Poliuretan	Metalna jezgra	2,8
	Debljina poliuretana ≥ 5 mm	
PVC – šuplji profili	Dvije šuplje komore*	2,2
Dubina zračnih šupljina u smjeru toplinskog toka najmanje 5 mm	Tri šuplje komore*	2,0

Napomena: *Danas se proizvode PVC profili s 4, 5, 6 ili čak 7 komora, kod kojih je koeficijent prolaska topline, U_f , još manji.

Drveni okviri

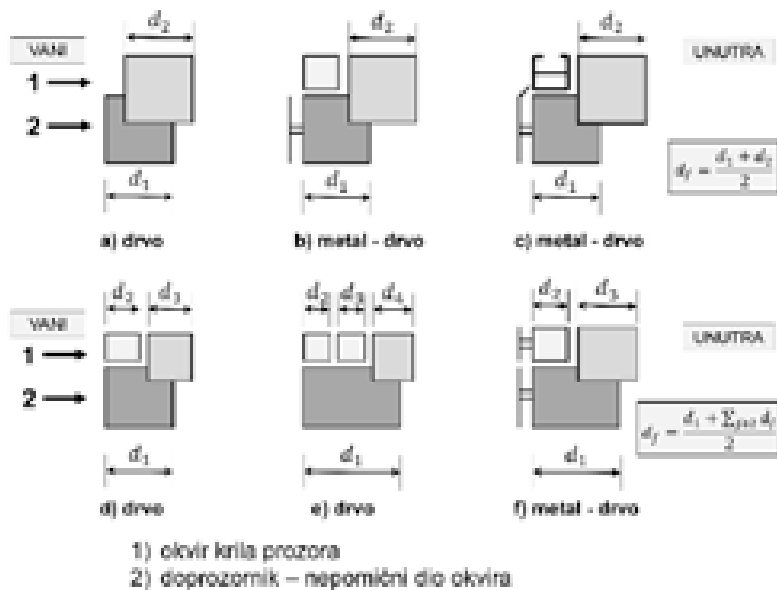
Vrijednosti koeficijenta U_f za drvene okvire mogu se očitati iz dijagrama na slici 4.43, ovisno o debljini okvira d_f . Očitane vrijednosti U_f odgovaraju za sadržaj vlage u drvu 12 %. Debljina okvira d_f definirana je na slici 4.44.



1) Tvrdo drvo (gustoća 700 kg/m^3), $\lambda = 0,18 \text{ W/(mK)}$

2) Meko drvo (gustoća 500 kg/m^3), $\lambda = 0,13 \text{ W/(mK)}$

Slika 4.43 Dijagram ovisnosti koeficijenta prolaska topline drvenog okvira o debljini okvira



Slika 4.44 Definicija debljine okvira, d_f , za razne vrste drvenih prozora

Za drveni i metalno-drveni okvir na slici 4.44, a), b) i c) debljina okvira iznosi:

$$d_f = \frac{(d_1 + d_2)}{2} \quad (4.175)$$

Za drveni i metalno-drveni okvir na slici 4.44, d), e) i f) debljina okvira iznosi:

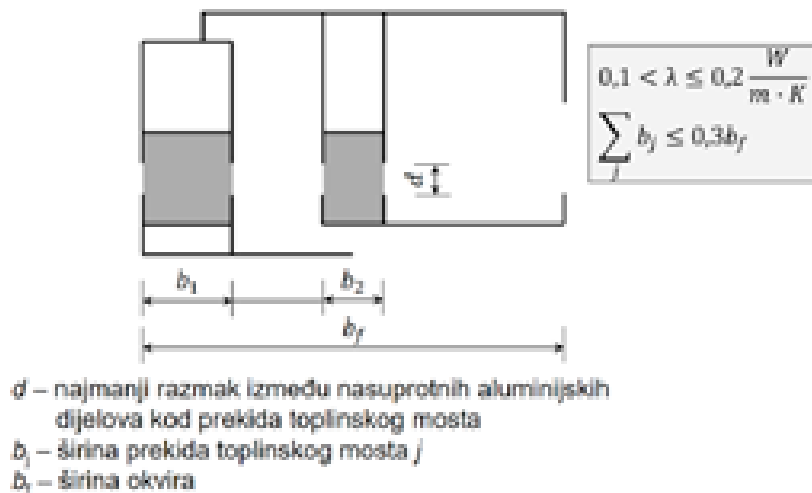
$$d_f = \frac{(d_1 + \sum_{j \geq 2} d_j)}{2} \quad (4.176)$$

Metalni okviri

Metalni okviri mogu biti izvedeni bez prekida toplinskog mosta ili s prekidom toplinskog mosta. Dva tipa prekida toplinskog mosta prikazana su na slikama 4.45 i 4.46.

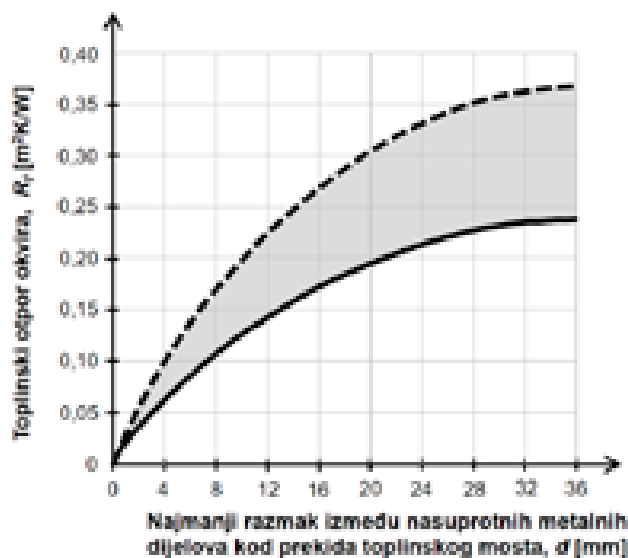


Slika 4.45 Poprečni presjek metalnog okvira tip 1: prekid toplinskog mosta s materijalom s toplinskom vodljivošću manjom od 0,3 W/(m·K)



Slika 4.46 Poprečni presjek metalnog okvira tip 2: prekid toplinskog mosta s materijalom s toplinskom vodljivošću manjom od $0,2 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$

Za metalne okvire bez toplinskog prekida uzima se da je $R_f = 0 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$. Za metalne okvire s toplinskim prekidom, R_f se očitava s pune krivulje na slici 4.47 u ovisnosti od najmanje udaljenosti, d , u mm, između dva dijela metalnog okvira odvojena toplinskim prekidom.



Slika 4.47 Vrijednost toplinskog otpora R_f za metalne okvire s toplinskim mostom, prema [72]

Koeficijent prolaska topline okvira, U_f , u $\text{W/(m}^2\cdot\text{K)}$, dan je jednačinom:

$$U_f = \frac{1}{\left(\frac{R_{si} \times A_{f,i}}{A_{f,di}} + R_f + R_{se} \times \frac{A_{f,e}}{A_{f,de}} \right)} \quad (4.177)$$

gdje je

$A_{f,i}$ ploština unutarnje projicirane površine okvira, u m^2 ,

$A_{f,e}$ ploština vanjske projicirane površine okvira, u m^2 ,

$A_{f,di}$ ploština unutarnje razvijene površine okvira (ploština ploha okvira u dodiru s unutarnjim zrakom), u m^2 ,

$A_{f,de}$ ploština vanjske razvijene površine okvira (ploština ploha okvira u dodiru s vanjskim zrakom), u m^2 .

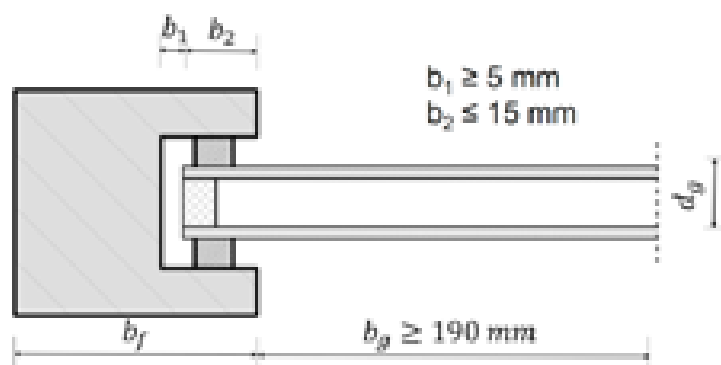
4.5.7 Duljinski koeficijent prolaska topline linijskog toplinskog mosta na spoju elementa ostakljenja ili neprozirne ispune s okvirom krila prozora

Duljinski koeficijent prolaska topline, ψ_g , linijskog toplinskog mosta na spoju elementa ostakljenja s okvirom krila prozora koristi se kao ulazni podatak za proračun koeficijenta prolaska topline prozora, U_w .

Koeficijent prolaska topline ostakljenja, U_g , odnosi se na središnje područje ostakljenja tj. podalje od njegova ruba. Koeficijent prolaska topline okvira, U_f , odnosi se na okvir bez ostakljenja. Uz rub elementa ostakljenja ugrađuje se profil koji povezuje staklene ploče u toplinsko-izolacijsko ostakljenje. Zato uz rub ostakljenja dolazi do dodatnog toplinskog toka (linijski toplinski most). Kad se ovakav element ostakljenja ugradi u okvir prozora ili vrata, zbog uzajamnog djelovanja između okvira i ruba ostakljenja dolazi do daljnjeg dodatnog toplinskog toka. Utjecaj oba ova dodatna toplinska toka na ukupni prijenos topline uzima se u obzir duljinskim koeficijentom prolaska topline ψ . Duljinski koeficijent prolaska topline, ψ_g , opisuje, dakle, dodatno vođenje topline zbog međudjelovanja između okvira, ostakljenja i rubnog profila između staklenih ploča toplinsko-izolacijskog ostakljenja.

Proračun duljinskog koeficijenta prolaska topline spoja ostakljenja i okvira

Duljinski koeficijent prolaska topline, ψ_g , određuje se računski pomoću numeričkih metoda (metoda konačnih elemenata, metoda konačnih razlika,...) u skladu s normom HRN EN ISO 10077-2 [73] i HRN EN ISO 10211 [70]. Proračun dvodimenzionalnog koeficijenta toplinske veze, $L_{2D,\psi}$, provodi se za površinu prikazanu na slici 4.48.



Slika 4.48 Proračunski model profila okvira s ugrađenim ostakljenjem

Duljinski koeficijent prolaska topline ψ odredi se pomoću izraza:

$$\psi = L_{2D,\psi} - U_f \times b_f - U_g \times b_g \quad (4.178)$$

gdje je

$L_{2D,\psi}$ dvodimenzionalni koeficijent toplinske veze površine prikazane na slici 4.48, u $W/(m \times K)$

U_f koeficijent prolaska topline okvira, u $W/(m^2 \times K)$,

U_g koeficijent prolaska topline u srednjem području ostakljenja, u $W/(m^2 \times K)$,

b_f projicirana širina profila okvira, u m,

b_g vidljiva širina ostakljenja, u m.

Jednaki postupak vrijedi i za profile okvira vrata s neprozirnim panelima umjesto ostakljenja.

Vidljiva duljina ostakljenja odnosno panela od 190 mm dovoljna je za debljinu ostakljenja odnosno panela do 60 mm. U drugim slučajevima debljina se mora odgovarajuće povećati.

Zadane vrijednosti koeficijenta duljinskog prolaska topline spoja ostakljenja i okvira

U tablici 4.35 dane su tipične vrijednosti duljinskog koeficijenta prolaska topline, ψ_g , za različite vrste okvira i ostakljenja, kada su između staklenih ploča toplinsko-izolacijskog ostakljenja ugrađeni profili od aluminija ili čelika. Za druge materijale profila u ostakljenju, koeficijent ψ_g , treba odrediti numeričkim proračunom pomoću jednadžbe (4.178).

Tablica 4.35 Vrijednosti duljinskog koeficijenta prolaska topline, ψ_g , za aluminijske i čelične profile između staklenih ploča toplinsko-izolacijskog ostakljenja, prema [72]

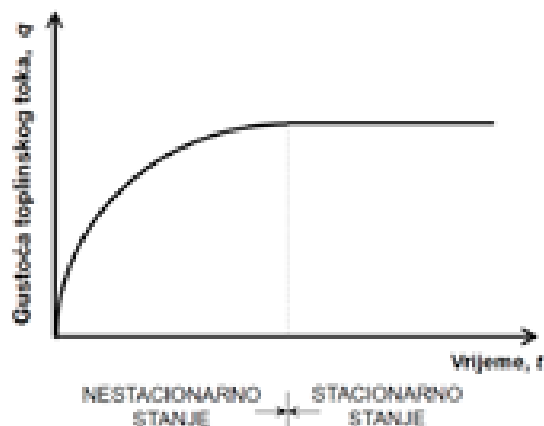
Duljinski koeficijent prolaska topline, ψ_g , u W/(m ² ·K)		
Materijal okvira	Dvostruko ili trostruko izolacijsko ostakljenje, staklo bez Low-E nanosa, ispuna zrakom ili plinom	Dvostruko ili trostruko izolacijsko ostakljenje, staklo s Low-E nanosom (dvostruko ostakljenje – jedno staklo, trostruko ostakljenje-dva stakla), ispuna zrakom ili plinom
Drvo ili PVC	0,06	0,08
Metal s toplinskim prekidom	0,08	0,11
Metal bez toplinskog prekida	0,02	0,05

4.6 Prijenos topline u nestacionarnim uvjetima

4.6.1 Stacionarna i nestacionarna stanja

Stanje prijenosa topline u kojem parametri ne ovise o vremenu nazivamo **stacionarno** (ustaljeno, statičko) **stanje**. Stanje prijenosa topline u kojem barem jedan parametar ovisi o vremenu nazivamo **nestacionarno** (dinamičko) **stanje**. U stacionarnom stanju odvija se samo proces prijenosa topline. U nestacionarnom stanju, uz proces prijenosa topline istovremeno se odvija i proces akumulacije topline (ispravnije promjena unutarnje energije). Stacionarne sustave opisujemo algebarskim jednadžbama. Dinamičke sustave opisujemo diferencijalnim jednadžbama. Uvjeti proračuna u nestacionarnom stanju su, dakle, složeniji od onih u stacionarnom stanju. Obrađivanje nestacionarnih stanja zahtijeva veći utrošak vremena za računanje, više ulaznih podataka i računalnu podršku.

Pretpostavka za prijenos topline između dvije točke nekog materijalnog tijela ili sustava je razlika njihovih temperatura, što znači različite toplinske potencijale tih točaka. Ako se, primjerice, između dva prostora različitih stalnih temperatura θ_1 i θ_2 koja su međusobno odvojena nekim građevnim dijelom zgrade, uspostavi toplinska veza, onda će gustoća toplinskog toka kroz građevni dio, iz prostora više temperature, θ_1 , u prostor niže temperature, θ_2 , najprije postupno rasti, a nakon nekog vremena zadobiti će konstantnu vrijednost. Stanje do postizanja konstantne vrijednosti gustoće toplinskog toka je nestacionarno stanje. Stanje kad se uspostavi konstantan toplinski tok je stacionarno stanje. Potrebno vrijeme do uspostave stacionarnog stanja ovisi o vrsti materijala i debljini slojeva građevnog dijela te razlici temperatura.



Slika 4.49 Vremenski razvoj gustoće toplinskog toka kroz građevni dio zgrade koji odjeljuje dva prostora različitih ali konstantnih temperatura

Za stacionarno stanje vrijedi:

- temperatura svake točke građevnog dijela je konstantna tj. vremenski nepromjenjiva,
- gustoća toplinskog toka kroz sve poprečne presjeke okomite na smjer toplinskog toka ima jednaku vrijednost i vremenski je nepromjenjiva,
- u sloju građevnog dijela od homogenog materijala temperatura se linearno smanjuje u smjeru toplinskog toka, to znači proporcionalno debljini sloja.

Stacionarno stanje može se opisati i na način da, okomito na toplinski tok, zamislimo u građevnom dijelu isječen mali elementarni paralelopiped. U stacionarnom stanju, količina topline koja ulazi u elementarni paralelopiped jednaka je količini topline koja iz njega izlazi.

Proces prijenosa topline kroz građevne dijelove zgrade općenito je trodimenzionalni proces s vremenski promjenjivim rubnim uvjetima tj. promjenjivom temperaturom ili promjenjivim toplinskim tokom na jednoj ili obje strane građevnog dijela. Zbog dnevnih promjena temperature vanjskog zraka i promjena intenziteta Sunčeva zračenja na vanjsku površinu ovojnice zgrade, toplinski tokovi kroz vanjske građevne dijelove zgrade nikada se ne događaju u stacionarnim uvjetima. Proračuni ovih dinamičkih procesa su vrlo složeni, a u mnogim slučajevima i neprovedivi. Da bi se dobile za građevinsku praksu jednostavne i praktične metode proračuna toplinskih karakteristika građevnih dijelova i zgrada, nužno je bilo prihvatiti određena pojednostavnjenja. Najvažnije pojednostavnjenje je prihvaćanje stacionarnog stanja tj. vremenski nepromjenjivih rubnih uvjeta, npr. konstantne temperature vanjskog i unutarnjeg zraka. Kako su pokazale višestruko provedene analize, s navedenom pretpostavkom dobije se zadovoljavajuća točnost karakteriziranja ponašanja građevnih dijelova zgrade u zimskim uvjetima, osim u slučaju prekidanog grijanja. Dobivene statičke toplinske karakteristike građevnih dijelova omogućuju međusobnu usporedbu svojstava različitih građevnih dijelova zgrade.

Određena nestacionarna stanja prijenosa topline ne mogu se, međutim, dovoljno točno opisati s navedenim pojednostavnjenjem. Tipični slučajevi u zgradama kod kojih treba modelirati prijenos topline pod nestacionarnim uvjetima su:

- zagrijavanje ili ohlađivanje građevnih dijelova zgrade ili prostora zgrade kod uključenja / isključenja izvora topline u zgradi,
- pregrijavanje prostora zgrade uslijed djelovanja Sunčeva zračenja koje je prodrlo u zgradu kroz prozirne elemente u ovojnici zgrade,
- prijenos toplinskog toka kroz neprozirne vanjske građevne dijelove zgrade izložene periodičkim oscilacijama temperature vanjskog zraka i Sunčeva zračenja tijekom ljeta,
- kratkotrajni procesi toplinskog toka kod dodira dva materijala različitih temperatura (npr. hodanje bosim nogama).

4.6.2 Akumulacija topline u građevnim dijelovima zgrade

Akumulacija je prikupljanje, nagomilavanje određenih dobara. **Akumulacija topline** je svojstvo građevnog materijala da prihvati dovedenu mu toplinu, u sebi je pohrani, i kod hlađenja okoliša ponovno je preda tom okolišu [23]. U količini materijala mase m , čija je temperatura za $\Delta\theta$ viša od temperature okoliša, pohranjena (akumulirana) količina topline, Q , u J ili $W \times h$, iznosi:

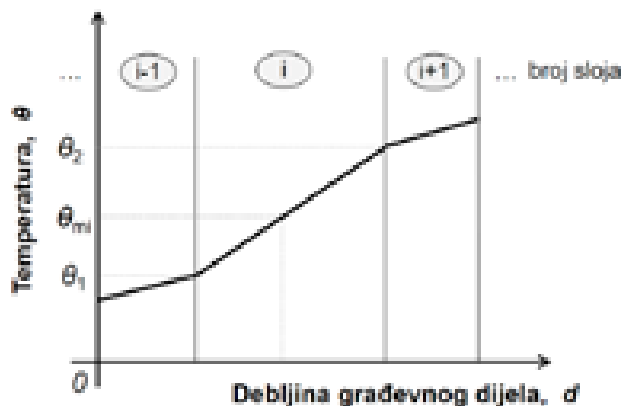
$$Q = m \times c \times \Delta\theta \quad (4.179)$$

Ovdje je c specifični toplinski kapacitet materijala u $J/(kg \times K)$ ili $W \times h/(kg \times K)$.

Kod višeslojnog građevnog dijela zgrade, pod stacionarnim zimskim uvjetima, temperatura u svakom sloju i mijenja se linearno u skladu s toplinskim otporom, R , tog sloja. Za svaki sloj i višeslojnog građevnog dijela biti će mjerodavna temperatura u sredini tog sloja, $\theta_{m,i}$. Razlika temperatura, $\Delta\theta_{m,i}$ između srednje temperature sloja i , $\theta_{m,i}$, i temperature vanjskog zraka, θ_e , (ili neke druge referentne temperature), iznositi će:

$$\Delta\theta = \Delta\theta_{m,i} = \theta_{m,i} - \theta_e \quad (4.180)$$

gdje je $\theta_{m,i} = (\theta_1 + \theta_2) / 2$. Ovdje su θ_1 i θ_2 temperature obje granične površine sloja.



Slika 4.50 Određivanje temperature u sredini sloja višeslojnog građevnog dijela zgrade

U vanjskom građevnom dijelu zgrade s n slojeva, u kojem je za svaki sloj i , $m_i = \rho_i \times V_i$ i $V_i = d_i \times A$, ukupna pohranjena (akumulirana) količina topline iznositi će:

$$\begin{aligned} Q &= \sum_1^n m_i \times c_i \times \Delta\theta_{m,i} = \sum_1^n V_i \times \rho_i \times c_i \times \Delta\theta_{m,i} = \\ &= A \times \sum_1^n \rho_i \times c_i \times d_i \times \Delta\theta_{m,i} \end{aligned} \quad (4.181)$$

gdje je:

- ρ_i gustoća materijala sloja i , u kg/m^3 ,
- V_i obujam sloja i , u m^3 ,
- d_i debljina sloja i , u m ,
- A ploština površine promatranog građevnog dijela zgrade, u m^2 .

Veličinu

$$C = A \times \sum_1^n \rho_i \times c_i \times d_i \quad (4.182)$$

izraženu u J/K ili $W \times h/K$, nazivamo **toplinski kapacitet** građevnog dijela zgrade. To je količina topline koju građevni dio zgrade akumulira po 1 K neke toplinske pobude. S porastom mase pojedinih slojeva građevnog dijela raste njegov toplinski kapacitet, a time i sposobnost akumulacije topline.

Akumulirana toplota po m² vanjskog neprozirnog građevnog dijela zgrade iznosi:

$$\frac{Q}{A} = \sum_1^n \rho_i \times c_i \times d_i \times \Delta\theta_{m,i} = \sum_1^n \kappa_i \times \Delta\theta_{m,i} \quad (4.183)$$

Veličinu

$$\kappa_i = \rho_i \times c_i \times d_i = m_i \times c_i, \quad (4.184)$$

u J/(m²×K) ili W×h/(m²×K) nazivamo **plošni toplinski kapacitet** sloja pločastog građevnog dijela zgrade.

Za unutarnje građevne dijelove zgrade (pregradni zidovi i stropovi), ako graniče s prostorijama s približno jednakom temperaturom unutarnjeg zraka, može se prihvatiti da je njihova temperatura jednaka temperaturi unutarnjeg zraka, θ_i . Za njih razlika temperatura, $\Delta\theta_m$, iznosi:

$$\Delta\theta_m = \theta_i - \theta_e \quad (4.185)$$

Ukupna toplinska akumulacija neke prostorije, toplinske zone ili cijele zgrade dobije se zbrajanjem akumulirane topline u pojedinim njihovim građevnim dijelovima.

U kojoj mjeri se može iskoristiti sposobnost akumulacije topline u pojedinim slojevima građevnog dijela zgrade, ovisi o tijeku temperaturne krivulje u poprečnom presjeku vanjskog građevnog dijela. Višeslojni građevni dijelovi s jednakom masom i jednakim toplinskim otporom mogu prihvatiti različite količine topline. Ta razlika proizlazi samo iz različitog redoslijeda pojedinih slojeva u sastavu građevnog dijela.

Primjer 4.14

Za stacionarno stanje proračunati toplinski kapacitet i akumuliranu toplotu po m² vanjskog zida od armiranog betona debljine 20 cm s toplinsko-izolacijskim slojem od ekspandiranog polistirena debljine 10 cm. Proračun provesti za položaj toplinsko-izolacijskog sloja s vanjske strane i posebno za njegov položaj s unutarnje strane zida. Ukrasno-zaštitna žbuka na sloju ekspandiranog polistirena se zanemaruje. Temperatura zraka u prostoriji iznosi 20 °C, a temperatura vanjskog zraka je -5 °C.

Relevantne karakteristike materijala slojeva zida su:

-Armirani beton: $\lambda = 2,60 \text{ W/(m} \times \text{K)}$, $\rho = 2\,500 \text{ kg/m}^3$, $c = 1\,000 \text{ J/(kg} \times \text{K)}$.

-Ekspandirani polistiren: $\lambda = 0,040 \text{ W/(m} \times \text{K)}$, $\rho = 20 \text{ kg/m}^3$, $c = 1\,450 \text{ J/(kg} \times \text{K)}$.

Toplinski otpor zida iznosi:

$$1/U = 0,13 + 0,20/2,60 + 0,10/0,040 + 0,04 = 2,747 \text{ m}^2 \times \text{K/W}$$

Koeficijent prolaska topline zida iznosi:

$$U = 0,364 \text{ W/(m}^2 \times \text{K)}$$

Gustoća toplinskog toka kroz zid je

$$q = U \times \Delta\theta = 0,364 \times 25 = 9,10 \text{ W/m}^2$$

Plošni toplinski kapacitet sloja armiranog betona iznosi:

$$\kappa_1 = 2\,500 \times 1\,000 \times 0,20 = 500 \text{ kJ/(m}^2 \times \text{K)}$$

Plošni toplinski kapacitet sloja ekspandiranog polistirena iznosi:

$$\kappa_2 = 20 \times 1\,450 \times 0,10 = 2,9 \text{ kJ/(m}^2 \times \text{K)}$$

1. Slučaj: toplinsko-izolacijski sloj s vanjske strane zida

Temperatura u sredini sloja armiranog betona iznosi:

$$\theta_{m,1} = 20 - 9,10 \times [0,13 + 0,5 \times (0,20/2,60)] = 18,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

Razlika srednje temperature sloja armiranog betona i vanjske temperature iznosi:

$$\Delta\theta_{m,1} = 18,5 - (-5) = 23,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

Temperatura u sredini sloja toplinske izolacije iznosi:

$$\theta_{m,2} = 20 - 9,10 \times [0,13 + 0,20/2,60 + 0,5 \times (0,10/0,040)] = 6,7 \text{ }^\circ\text{C}$$

Razlika srednje temperature sloja toplinske izolacije i vanjske temperature iznosi:

$$\Delta\theta_{m,1} = 6,7 - (-5) = 11,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Akumulirana toplina po m^2 vanjskog zida iznosi:

$$Q/A = 500 \times 23,5 + 2,9 \times 11,7 = \mathbf{11\,783,9 \text{ kJ/m}^2}$$

2. Slučaj: toplinsko-izolacijski sloj s unutarnje strane zida

Temperatura u sredini sloja toplinske izolacije iznosi:

$$\theta_{m,1} = 20 - 9,10 \times [0,13 + 0,5 \times (0,10/0,040)] = 7,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Razlika srednje temperature sloja toplinske izolacije i vanjske temperature iznosi:

$$\Delta\theta_{m,1} = 7,4 - (-5) = 12,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Temperatura u sredini sloja armiranog betona iznosi:

$$\theta_{m,2} = 20 - 9,10 \times [0,13 + 0,10/0,040 + 0,5 \times (0,20/0,02,60)] = -4,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Razlika srednje temperature sloja armiranog betona i vanjske temperature iznosi:

$$\Delta\theta_{m,1} = -4,3 - (-5) = 0,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Akumulirana toplina po m^2 vanjskog zida iznosi:

$$Q/A = 2,9 \times 12,4 + 500 \times 0,7 = \mathbf{385,9 \text{ kJ/m}^2}$$

što iznosi svega oko 3,3 % toplinske energije koju akumulira vanjski zid s toplinsko-izolacijskim slojem s vanjske strane.

Primjer 4.15

Za prostoriju tlocrtnih unutarnjih dimenzija $5 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ i svijetle visine $2,7 \text{ m}$, koja je smještena u sredini visine višekatne zgrade i graniči s prostorijama grijanim na jednaku temperaturu, potrebno je izračunati ukupnu akumuliranu količinu topline (u unutarnjim i vanjskim građevnim dijelovima i u zraku prostorije). Temperatura zraka u prostoriji je $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, a temperatura vanjskog zraka je $-5 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Sastav građevnih dijelova koji ogradaju predmetnu prostoriju je slijedeći:

*Vanjski zid (iznutra prema van):

- armirani beton debljine 20 cm ($\lambda = 2,60 \text{ W/(m}\times\text{K)}$, $\rho = 2\,500 \text{ kg/m}^3$, $c = 1\,000 \text{ J/kg}\times\text{K}$)
- ekspandirani polistiren debljine 10 cm ($\lambda = 0,040 \text{ W/(m}\times\text{K)}$, $\rho = 20 \text{ kg/m}^3$, $c = 1\,450 \text{ J/kg}\times\text{K}$)
- zaštitna armirana žbuka (njen utjecaj se zanemaruje)

*Tri pregradna zida od šuplje opeke od gline, debljine 24 cm ($\lambda = 0,48 \text{ W/(m}\times\text{K)}$, $\rho = 1\,100 \text{ kg/m}^3$, $c = 900 \text{ J/kg}\times\text{K}$) s obostranom vapneno-gipsanom žbukom debljine po 2 cm ($\lambda = 0,70 \text{ W/(m}\times\text{K)}$, $\rho = 1\,400 \text{ kg/m}^3$, $c = 1\,000 \text{ J/kg}\times\text{K}$)

*Gornji i donji strop (odozgo prema dolje)

- završna podna obloga (njen utjecaj se zanemaruje)
- plivajući armirani cementni estrih debljine 5 cm ($\lambda = 1,60 \text{ W/(m}\times\text{K)}$, $\rho = 2\,000 \text{ kg/m}^3$, $c = 1\,000 \text{ J/kg}\times\text{K}$)
- polietilenska folija (njen utjecaj se zanemaruje)
- elastificirani ekspandirani polistiren debljine 3 cm ($\lambda = 0,040 \text{ W/(m}\times\text{K)}$, $\rho = 20 \text{ kg/m}^3$, $c = 1\,450 \text{ J/kg}\times\text{K}$)
- armirano betonska stropna ploča debljine 20 cm ($\lambda = 2,60 \text{ W/(m}\times\text{K)}$, $\rho = 2\,500 \text{ kg/m}^3$, $c = 1\,000 \text{ J/kg}\times\text{K}$)

Za akumulaciju topline promatrane prostorije pregradne zidove treba računati s polovicom njihove mase, a kod stropova uzima se u obzir masa slojeva stropa do toplinsko-izolacijskog sloja, gledajući sa strane promatrane prostorije.

Efektivni plošni toplinski kapacitet unutarnjih građevnih dijelova, prema izrazu (4.184) iznosi:

-pregradni zidovi:

$$\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa_3 = 0,02 \times 1\,400 \times 1\,000 + 0,5 \times 0,24 \times 1\,100 \times 900 = 146,8 \text{ kJ/(m}^2 \times \text{K)}$$

-strop (prema gore)

$$\kappa_4 = 0,20 \times 2\,500 \times 1\,000 = 500,0 \text{ kJ/(m}^2 \times \text{K)}$$

-strop (prema dolje):

$$\kappa_5 = 0,05 \times 2\,000 \times 1\,000 = 100,0 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \times \text{K})$$

-vanjski zid:

$$\kappa_6 = 0,20 \times 2500 \times 1000 + 0,10 \times 20 \times 1450 = 500,0 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \times \text{K}) + 2,9 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \times \text{K})$$

Toplinski otpor vanjskog zida iznosi:

$$1/U = 0,13 + 0,20/2,60 + 0,10/0,040 + 0,04 = 2,747 \text{ m}^2 \times \text{K}/\text{W}$$

Koeficijent prolaska topline vanjskog zida iznosi:

$$U = 0,364 \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$$

Gustoća toplinskog toka kroz vanjski zid je

$$q = U \times \Delta\theta = 0,364 \times 25 = 9,10 \text{ W}/\text{m}^2$$

Temperatura u sredini sloja armiranog betona iznosi:

$$\theta_{m,1} = 20 - 9,10 \times [0,13 + 0,5 \times (0,20/2,60)] = 18,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

Razlika srednje temperature sloja armiranog betona i vanjske temperature iznosi:

$$\Delta\theta_{m,1} = 18,5 - (-5) = 23,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

Temperatura u sredini sloja toplinske izolacije iznosi:

$$\theta_{m,2} = 20 - 9,10 \times [0,13 + 0,20/2,60 + 0,5 \times (0,10/0,040)] = 6,7 \text{ }^\circ\text{C}$$

Razlika srednje temperature sloja toplinske izolacije i vanjske temperature iznosi:

$$\Delta\theta_{m,1} = 6,7 - (-5) = 11,7 \text{ }^\circ\text{C}$$

Rezultati proračuna prikazani su u tablici 4.36.

Tablica 4.36 Proračun akumulacije topline jedne prostorije zgrade

Građevni dio zgrade	κ kJ/(m ² ×K)	A m ²	$\Delta\theta$ K	Q kJ	Q %
Pregradni zid 1	146,8	13,5	25	49 545	
Pregradni zid 2	146,8	16,2	25	59 454	
Pregradni zid 3 (vrata 2,1 m ²)	146,8	11,4	25	41 838	
Strop (prema gore)	500,0	30,0	25	375 000	
Strop (prema dolje)	100,0	30,0	25	75 000	
Ukupno unutarnji građevni dijelovi:				600 837	81,7
Vanjski zid:					
-sloj armiranog betona	500,0	11,2	23,5	13 1600	
-sloj toplinske izolacije	2,9	11,2	11,7	380	
Ukupno vanjski zid:				131 980	17,9
Zrak u prostoriji (Q = ρ×V×c×Δθ)			25	2 531	0,4
Sveukupno:				735 348	100

Kod određivanja ukupne toplinske akumulacije neke prostorije, zone ili zgrade, toplina akumulirana u unutarnjem zraku je praktički zanemariva. Kratkotrajno provjetravanje unutarnjeg prostora ne dovodi do primjetnog rashlađivanja unutarnjih površina građevnih dijelova.

Vanjski građevni dijelovi zgrade relativno malo doprinose ukupnoj toplinskoj akumulaciji, tako da se u većini slučajeva njihov doprinos može zanemariti. Sposobnost toplinske akumulacije neke prostorije, zone ili zgrade bitno je određena njenim unutarnjih vertikalnim i horizontalnim građevnim dijelovima.

U stacionarnim uvjetima akumulirana toplina u građevnim dijelovima zgrade nema nikakvog praktičnog značaja. Ona dolazi do izražaja tek ako dođe do većih vremenskih oscilacija temperature okoliša, dakle, kod nestacionarnih uvjeta. U zimskom razdoblju takva situacija nastaje kod prodora promjenjivog Sunčevog zračenja kroz prozirne plohe u unutrašnjost prostora zgrade te kod eventualnog noćnog smanjenja ili potpunog prekida rada sustava grijanja. U ljetnom razdoblju nestacionarni uvjeti nastaju djelovanjem promjenjivog Sunčeva zračenja na vanjske građevne dijelove ovojnice zgrade.

Sposobnost zgrade da akumulira toplinu igra važnu ulogu kod različitih metoda proračuna kojima se utvrđuje potrebna toplina za grijanje i hlađenje zgrade. Ona se kod proračuna uzima u obzir na različite načine. Tako se kod mjesečne metode proračuna određuje visina mogućih iskorištavanja toplinskih dobitaka pomoću faktora iskorištenja η (vidjeti poglavlje 6.). Kod dinamičkih modeliranja sposobnost pohrane topline pojedinih slojeva građevnih dijelova zgrade uzima se u obzir eksplicitno u svakom računskom koraku, što omogućuje točnije određivanje opterećenja grijanja ili hlađenja kao i određivanje operativnih temperatura.

Toplinski kapacitet građevnog dijela zgrade definiran je kao količina topline potrebna da mu se temperatura povisi za 1 °C, odnosno 1 K. Kod definicije toplinskog kapaciteta građevnog dijela zgrade razlikuju se tri slučaja:

- statički toplinski kapacitet kod jednokratne pobude u obliku skoka ili pada temperature (npr. kod zagrijavanja ili ohlađivanja na određenu temperaturu),
- dinamički toplinski kapacitet kod periodičke pobude (npr. za period $T = 24$ h), bez uzimanja u obzir otpora prijelaza topline, $R_{si}R_{se}$,
- dinamički toplinski kapacitet kod periodičke pobude (npr. za period $T = 24$ h), uključujući otpore prijelaza topline, $R_{si}R_{se}$.

Kod statičkog toplinskog kapaciteta u proračunu akumulacije topline sudjeluju svi slojevi građevnog dijela. Kod dinamičkog toplinskog kapaciteta, ovisno o trajanju perioda oscilacija T , temperaturni val prodire samo u dio dubine građevnog dijela. Zato je u tom slučaju manja i akumulirana toplina u građevnom dijelu zgrade.

4.6.3 Toplinska inercija (toplinska tromost)

Inercija (tromost, ustrajnost) općenito označava svojstvo onoga što je nepokretno, nepromjenjivo, nedjelotvorno. Inercija je težnja svakog sustava da očuva svoje početno stanje. U mehanici se inercijom naziva svojstvo materijalnih tijela da se opiru promjeni stanja gibanja. Kada na tijelo ne djeluju vanjske sile ili kada su one u međusobnoj ravnoteži, inercija se izražava u tome da tijelo zadržava svoje stanje mirovanja ili stanje jednolikog gibanja po pravcu. Kad na tijelo djeluju neuravnotežene vanjske sile, inercija se izražava u tome da se promjena stanja mirovanja ili jednolikog gibanja zbiva postupno, a ne trenutačno. Ta promjena je to polaganija što je inercija tijela veća. Mjera za inerciju je masa tijela. Premda se inercija suprotstavlja svim promjenama, proces uvijek završava novom ravnotežom tijela koja odgovara novim uvjetima u kojima će se tijelo naći.

Kada se neko materijalno tijelo nalazi u toplinskoj ravnoteži, njegova temperatura je konstantna, a izmjene topline vođenjem, strujanjem i zračenjem između tijela i njegova okoliša su uravnotežene. Koliko topline tijelo primi iz svog okoliša, toliko topline ono i preda tom okolišu. **Toplinska inercija** (toplinska tromost) je sklonost navedenog tijela da kroz određeno vrijeme sačuva svoju početnu temperaturu kada dođe do poremećaja njegove toplinske ravnoteže. Ako taj poremećaj vodi ka novoj toplinskoj ravnoteži, toplinska inercija predstavlja „sporost“ s kojom se dostigne ta nova točka ravnoteže. Za toplinski vrlo inertno tijelo ta ravnoteža će se dosegnuti nakon duljeg vremena. Ako je, pak, materijal tijela slabo

toplinski inertan, ta ravnoteža će se dosegnuti nakon kratkog vremena. Trajanje ovog karakterističnog vremena ovisi kako o toplinskoj inerciji materijala tako i o razlici između dviju ravnotežnih temperatura.

Može se dakle reći, da je toplinska inercija brzina kojom građevni dio ili zgrada reagira na temperaturne poremećaje. Ona predstavlja otpor koji će neki materijal (građevni dio zgrade) pokazati kako u promjeni njegove vlastite temperature za vrijeme promjene temperature u njegovu okolišu, tako i u brzini s kojom se ostvaruje ta promjena. Toplinska inercija nekog građevnog materijala je njegova fizikalna sposobnost da sačuva svoju početnu temperaturu, odnosno da je polagano mijenja u skladu s temperaturom svog okoliša. Toplinska inercija zgrade označava brzinu s kojom se prostor zgrade zagrijava ili hladi. Što je inercija značajnija zgrada treba više vremena da se zagrije ili ohladi. Dobrom toplinskom inercijom zgrade ublažavaju se promjene temperature u prostoru zgrade. Toplinska inercija značajna je, dakle, za osiguranje ugodnog toplinskog ambijenta u prostoru zgrade za njene korisnike. Jako inertna zgrada vrlo polagano slijedi promjene vanjske temperature. Prostor u zgradi ostati će svjež i tijekom nekoliko izrazito vrućih ljetnih dana. Isto tako sačuvati će ugodnu temperaturu za vrijeme prvih jesenskih hladnoća. Kod toplinski inertnih zgrada temperatura zraka u prostoru zgrade vrlo se malo mijenja između dana i noći. Toplinskom inercijom zgrade sprječava se, dakle, pregrijavanje prostora zgrade i nagli pad temperature.

Gornji opis pojma toplinske inercije upućuje na promjenu toplinskog stanja. Toplinska inercija dolazi do izražaja tek tijekom promjene stanja, tj. kad postoji toplinski tok koji može mijenjati toplinsko stanje. Toplinska inercija suprotstavlja se tom toku, tj. promjeni stanja. Toplinska inercija se očituje, dakle, samo u nestacionarnim uvjetima.

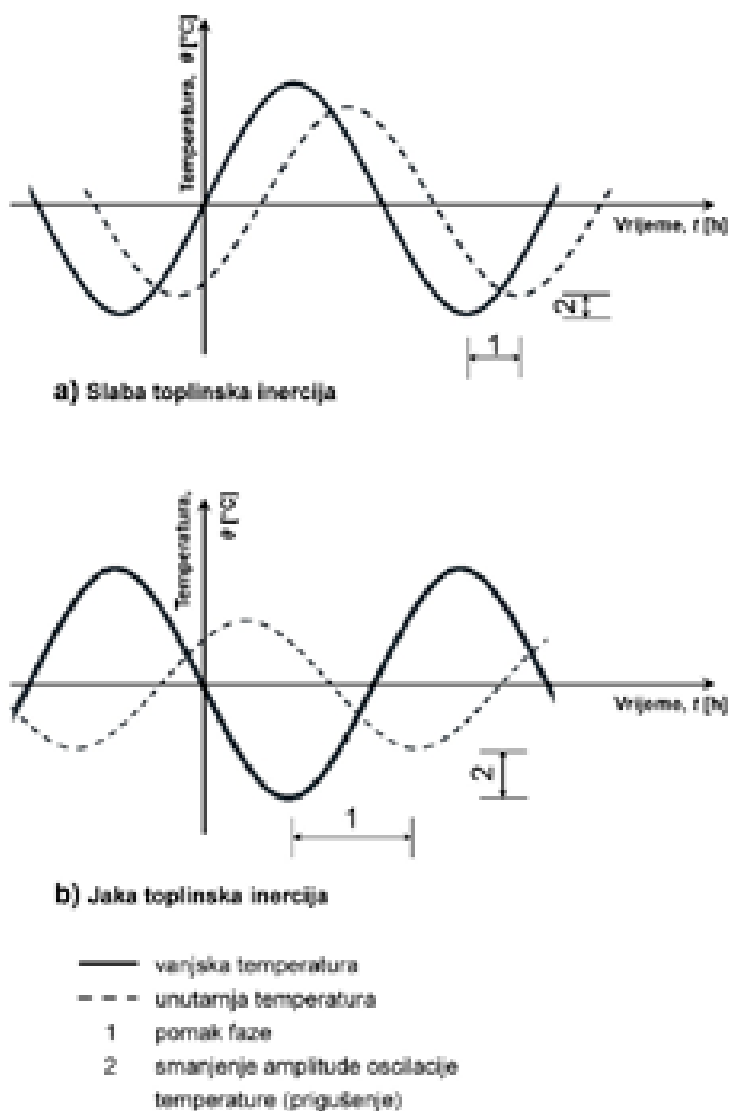
Pojam toplinske inercije je relativno složen. U stvari postoje dva tipa toplinske inercije: toplinska inercije transmisije i toplinska inercija apsorpcije [79]. Oba tipa inercije djeluju paralelno, ali na fizikalno različit način. U konačnici oba doprinose održavanju toplinske ugodnosti u prostoru zgrade.

Toplinska inercija transmisije

Vanjski građevni dio zgrade suprotstavlja se prijenosu vanjskih klimatskih promjena u prostor zgrade svojim svojstvom toplinske izolacije (toplinskim otporom), ali i uz pomoć svojeg svojstva **toplinske inercije transmisije**. Toplinska izolacija djeluje uvijek, neovisno o temperaturnim uvjetima, dok toplinska inercija transmisije dolazi do izražaja samo u dinamičkim uvjetima tj. kod značajnijih promjena temperature. To je posebno izraženo ljeti kada se porastu temperature vanjskog zraka pribraja i zagrijavanje vanjske površine ovojnice zgrade uslijed izravnog Sunčevog zračenja. U tim uvjetima, kod prolaska toplinskog vala kroz vanjski građevni dio zgrade, toplinska inercija transmisije smanjuje brzinu njegova prijenosa transmisijom i njegovu amplitudu. Zbog tog usporavanja prijenosa topline, toplina stigne na unutarnju površinu vanjskog građevnog dijela s vremenskim zaostatom u odnosu na vrijeme kada je vanjska površina građevnog dijela bila izložena najjačem Sunčevom zračenju. Taj vremenski razmak između trenutka kad je temperatura vanjske površine građevnog dijela bila najveća i trenutka kad je temperatura unutarnje površine građevnog dijela postala najveća nazivamo **pomak faze**. Poželjno je da pomak faze bude toliki da toplina stigne na unutarnju površinu vanjskog građevnog dijela tek tijekom noći kad je temperatura zraka niža i kada je moguće jakom ventilacijom odvesti tu toplinu izvan zgrade tako da ona značajnije ne utječe na klimatske uvjete u prostoru zgrade. Tijekom prolaska toplinskog vala kroz građevni dio zgrade postupno se smanjuje i amplituda oscilacija temperature. To **prigušenje amplitude** je posljedica činjenice da, najprije smanjenjem, a zatim i potpunim prestankom Sunčeva zračenja, jedan dio topline iz građevnog dijela ponovno odlazi prema vanjskom prostoru. Toplinska inercija transmisije smanjuje, dakle, utjecaj Sunčeva zračenja, kojeg prima neprozirni dio ovojnice zgrade, na unutarnju temperaturu zgrade. Navedenim procesima toplinska inercija transmisije može bitno doprinijeti poboljšanju toplinske

ugodnosti tijekom ljeta, bez korištenja sustava mehaničke ventilacije. Pretpostavka za to je mogućnost jake prirodne noćne ventilacije prostora zgrade.

Toplinska inercija transmisije može se, dakle, karakterizirati pomakom faze i prigušenjem amplitude oscilacija temperature (vidjeti sliku 4.51).



Slika 4.51 Karakteristike toplinske inercije transmisije

Toplinska inercija apsorpcije

Uloga **toplinske inercije apsorpcije** je bitno različita od uloge toplinske inercije transmisije. Unutarnji slojevi vanjskih građevnih dijelova te unutarnji pregradni vertikalni i horizontalni građevni dijelovi zgrade, zahvaljujući svojem svojstvu toplinske inercije apsorpcije, suprotstavljaju se brzim promjenama unutarnje temperature u zgradi. Toplinska inercija apsorpcije dolazi do izražaja samo kod promjene unutarnje temperature, koja se mijenja bilo zbog toplinskih tokova iz okoliša zgrade bilo zbog toplinskih izvora ili ponora unutar zgrade. Toplinska inercija apsorpcije tiče se akumulacije topline u građevnim dijelovima zgrade koji su u dodiru sa zrakom u prostoru zgrade. Ona je određena toplinskim kapacitetom zgrade. Kad temperatura zraka u prostoru zgrade poraste, građevni dijelovi zgrade, tijekom određenog više ili manje dugog vremena, apsorbiraju dio topline tako da se uspostavi nova toplinska ravnoteža sa zrakom. I obrnuto, kada se unutarnja temperatura smanjuje građevni dijelovi, brže ili sporije, otpuštaju akumuliranu toplinu dok se ne postigne nova toplinska

ravnoteža. Toplinska inercija apsorpcije suprotstavlja se dakle promjenama unutarnje temperature na način da se ponaša kao „toplinska spužva“.

Toplinska inercija apsorpcije prigušuje amplitudu promjene temperature u prostoru zgrade. Ona je učinkovita za zgrade koje su stalno u uporabi. U slučaju povremenog korištenja zgrade, toplinska inercija apsorpcije može biti faktor pogoršanja toplinske ugodnosti i povećanja potrebne energije zbog činjenice da je vrijeme grijanja ili hlađenja duže.

4.6.4 Dinamičke toplinske karakteristike građevnih materijala

Toplinska inercija zgrade može se definirati kao brzina s kojom zgrada reagira na vanjske temperaturne poremećaje. Odgovor zgrade na tu toplinsku pobudu ovisi velikim dijelom o toplinskim svojstvima građevnih materijala od kojih su izgrađeni građevni dijelovi zgrade. Prema njihovim sposobnostima da pohrane i da prenesu toplinu, zgrada će reagirati različito. Zbog toga je bilo nužno, za karakteriziranje građevnih materijala u nestacionarnim rubnim uvjetima, uvesti dvije nove fizikalne veličine: toplinsku difuzivnost i toplinsku prodornost. Toplinska inercija građevnih materijala ovisna je o vrijednostima tih dviju veličina. Toplinska difuzivnost (temperaturna vodljivost) materijala označava se simbolom a , a mjeri se u m^2/s . Toplinska prodornost (toplinska efuzivnost) materijala označava se simbolom b , a mjeri u $\text{J}/(\text{m}^2 \times \text{K} \times \text{s}^{1/2})$.

Toplinska difuzivnost, a , i toplinska prodornost, b , koriste se za ocjenu toplinskog ponašanja materijala pod nestacionarnim temperaturnim graničnim uvjetima [23].

Toplinska difuzivnost materijala, a

Toplinska difuzivnost, a , karakterizira sposobnost građevnog materijala da prenese temperaturni signal s jedne točke materijala na neku drugu točku tog materijala. Ona karakterizira brzinu s kojom se širi promjena temperature u materijalu. Toplinska difuzivnost predstavlja sklonost materijala da podupire prijenos (difuziju) topline. Temperaturni val se brže širi u materijalima s većom vrijednosti veličine a . O vrijednosti toplinske difuzivnosti materijala, a , ovisi toplinska inercija transmisije. Veća toplinska difuzivnost znači slabiju toplinsku inerciju transmisije.

Toplinska difuzivnost, a , u m^2/s , određena je izrazom:

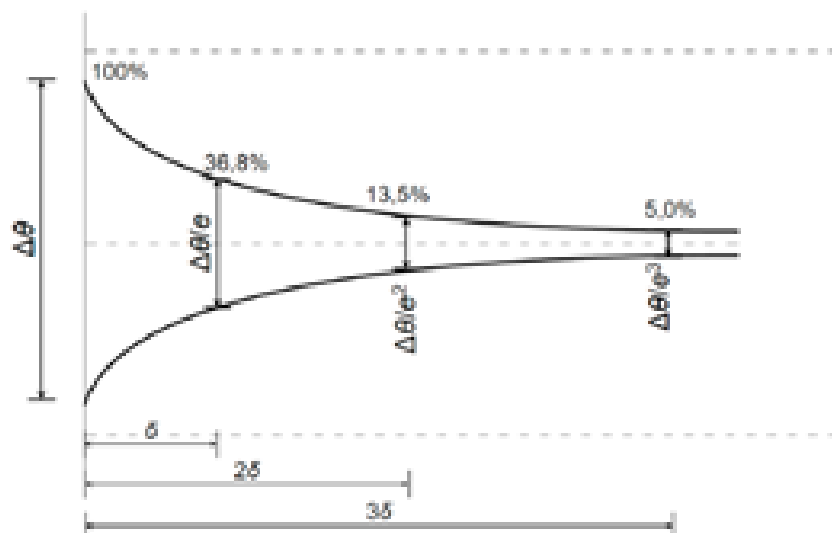
$$a = \frac{\lambda}{(\rho \times c)} \quad (4.186)$$

gdje je:

- λ toplinska vodljivost materijala, u $\text{W}/(\text{m} \times \text{K})$,
- ρ gustoća materijala, u kg/m^3 ,
- c specifični toplinski kapacitet materijala, u $\text{J}/(\text{kg} \times \text{K})$.

Toplinska difuzivnost opisuje brzinu kretanja topline kroz materijal. Iz nižih vrijednosti veličine a slijedi sporije napredovanje temperaturnog vala u nekom materijalu. To znači da su za usporavanje prijenosa topline pogodni materijali koji imaju malu vrijednost toplinske vodljivosti, λ , uz istovremeno što veću vrijednost gustoće materijala, ρ , i specifičnog toplinskog kapaciteta materijala, c . Najpovoljniji toplinsko-izolacijski materijali u tom smislu su materijali na bazi drvene vune.

Ako se temperatura na površini polubeskonačnog homogenog građevnog materijala mijenja po zakonu sinusoide, pomoću toplinske difuzivnosti, a , može se proračunati tzv. periodička dubina prodiranja, δ , toplinskog vala u homogeni materijal. Temperaturni signal na dubini z od površine polubeskonačnog materijala, prigušen je faktorom $e^{-z/\delta}$, gdje je δ periodička dubina prodiranja. **Periodička dubina prodiranja, δ ,** je ona dubina u homogenom materijalu beskonačne debljine na kojoj je amplituda promjene temperature smanjena na $1/e$ vrijednosti amplitude površinske oscilacije temperature (vidjeti sliku 4. 52). $e = 2,718...$ je baza prirodnih logaritama.



δ - periodička dubina prodiranja

$e = 2,718...$ - baza prirodnih logaritama

Slika 4.52 Razvoj temperature unutar debelog sloja homogenog materijala kada temperatura na površini oscilira po zakonu sinusoide

Periodička dubina prodiranja, δ , izražena u metrima, može se proračunati iz izraza:

$$\delta = \left[\frac{\lambda \times T}{(\pi \times \rho \times c)} \right]^{1/2} = \left(\frac{a \times T}{\pi} \right)^{1/2} \quad (4.187)$$

gdje je:

- T period oscilacija temperature, u s,
- λ toplinska vodljivost materijala, u W/(m×K),
- ρ gustoća materijala, u kg/m³,
- c specifični toplinski kapacitet materijala, u J/(kg×K),
- a toplinska difuzivnost materijala, u m²/s.

Dubina prodiranja ovisi o duljini perioda T oscilacija temperature. Kratkotrajni poremećaji temperature prodiru manje duboko u građevni materijal nego dugotrajni poremećaji.

Toplinska prodornost materijala, b

Toplinska prodornost, b , karakterizira sposobnost građevnog materijala da izmjenjuje toplinsku energiju sa svojim okolišem. Ona određuje sposobnost materijala da brzo pohrani ili otpusti veću količinu topline pri stanju promjenjive temperature. Toplinska prodornost, b , karakterizira, dakle, brzinu s kojom materijal apsorbira toplinu. O vrijednosti toplinske prodornosti, b , građevnog materijala ovisi njegova toplinska inercija apsorpcije.

Toplinska prodornost, b , u J/(m²×K×s^{1/2}), određena je izrazom:

$$b = (\lambda \times \rho \times c)^{1/2} \quad (4.188)$$

Toplinska prodornost, b , mjera je sposobnosti akumulacije topline u materijalu. Što je b veći materijal akumulira više topline, a da se pri tome značajnije ne ugrije. Što je b materijala manji, materijal se brže zagrije. Toplinska inercija apsorpcije nekog materijala biti će izraženija što je toplinska prodornost materijala veća.

Između toplinske difuzivnosti, a , i toplinske prodornosti, b , postoji relacija

$$b = \rho \times c \times (a)^{1/2} \quad (4.189)$$

Toplinska prodornost, b , nekog materijala proporcionalna je, dakle, njegovoj difuzivnosti, a . Što neki materijal ima veću toplinsku prodornost, b , to je veća i toplinska difuzivnost, a , tog materijala. Drugim riječima, što je materijal sposobniji da pohrani veću količinu topline (materijali s većom vrijednosti b) to će on i brže prenositi toplinu s jedne svoje površine prema drugoj (materijali s većom vrijednosti a).

Vanjski građevni dio zgrade mora, i u dinamičkim uvjetima vanjske klime, osigurati zadovoljavajuću toplinsku ugodnost u prostoru zgrade. Njegova svojstva toplinske inercije transmisije i toplinske inercije apsorpcije moraju zato biti istovremeno dovoljno velika. Velika inercija transmisije znači malu toplinsku difuzivnost materijala, a . Velika inercija apsorpcije znači veliku toplinsku prodornost materijala, b . Idealan materijal za održavanje zadovoljavajuće toplinske ugodnosti u prostoru zgrade morao bi, dakle, imati što manju toplinsku difuzivnost, a , i istovremeno što veću toplinsku prodornost, b . Materijal takvih svojstava fizikalno je nemoguće dobiti jer su ta dva svojstva materijala, kako je gore pokazano, međusobno proporcionalna. Kad je toplinska prodornost materijala velika, velika je i toplinska difuzivnost tog materijala. Da bi se ipak zadovoljili zahtjevi za toplinskom udobnošću u prostoru zgrade rješenje je u korištenju dva različita materijala tj. u izvedbi dvoslojnih vanjskih građevnih dijelova zgrade. S vanjske strane vanjskog građevnog dijela, koja je izložena promjenjivoj vanjskoj klimi, treba postaviti materijal s velikom toplinskom inercijom transmisije, dakle, materijal slabe difuzivnosti (mala vrijednost a – toplinsko-izolacijski materijal). S unutarnje strane vanjskog građevnog dijela treba postaviti materijal s velikom toplinskom inercijom apsorpcije, dakle, materijal jake toplinske prodornosti (velika vrijednost b – masivan materijal).

Dakle, s gledišta toplinske inercije, u uvjetima promjenjive temperature, naročito tijekom ljeta, najpovoljniji uvjeti toplinske ugodnosti u prostoru zgrade, primjenom samo građevinskih mjera, postižu se izvedbom dvoslojnih vanjskih građevnih dijelova zgrade s toplinsko-izolacijskim slojem s vanjske strane i masivnim slojem s unutarnje strane. Uz to, za postizanje toplinske ugodnosti, trebalo bi osigurati i efikasnu noćnu ventilaciju.

4.5.5 Kratkotrajni događaji prijenosa topline, temperatura dodira

Toplinska prodornost, b , karakterizira i ponašanje materijala kod prijenosa topline koje traje kratko vrijeme, npr. kod kratkotrajnog dodira dvaju materijala. Ako materijalno tijelo temperature θ_1 od materijala koji ima toplinsku prodornost b_1 dođe u dodir s materijalnim tijelom temperature θ_2 koje je od materijala koji ima toplinsku prodornost b_2 , tada će kroz dodirnu ravninu poteći toplinski tok. Pretpostavlja se da se dodiruju ravne, savršeno glatke površine. Uslijed prijenosa topline, toplije tijelo će se ohlađivati, a hladnije tijelo zagrijavati. U ravnini dodira dva tijela uspostaviti će se tzv. temperatura dodira, θ_0 . To očito nije ni temperatura θ_1 ni temperatura θ_2 , a nije ni njihova aritmetička sredina $(\theta_1 + \theta_2)/2$. Temperatura dodira, θ_0 , jednaka je srednjoj vrijednosti temperatura dva tijela ponderiranih respektivno s njihovom toplinskom prodornosti:

$$\theta_0 = \frac{(b_1 \times \theta_1 + b_2 \times \theta_2)}{(b_1 + b_2)} \quad (4.190)$$

Gornja jednakost vrijedi za dodir dva polubeskonačna tijela. Za tijela konačnih dimenzija, npr. za relativno tanki sloj materijala višeslojnog građevnog dijela zgrade, ova jednakost vrijedi samo za odsječak vremena dok prodirući toplinski val ne stigne do druge granice sloja.

Zbog velike vrijednosti toplinske prodornosti, b , metala, kad dodirnemo površinu metala relativno mnogo topline odvoditi će se u unutarnje dijelove metala, zbog čega metal osjećamo hladnim. Dodirna temperatura biti će relativno niska. Materijali s malom vrijednosti toplinske prodornosti, b , npr. podna obloga od tekstilnog tepiha, pluta i sl. kod bosonogog hodanja izvlače iz tabana relativno malo topline i zato ih osjećamo toplima.

Primjer 4.16

Temperatura dlana čovječe ruke je oko $\theta_1 = 37^\circ\text{C}$, a toplinska prodornost kože oko $b_1 = 400 \text{ J}/(\text{m}^2 \times \text{K} \times \text{s}^{1/2})$. Izračunati dodirnu temperaturu na dlanu kad ruku položimo na čelični predmet ($b_2 = 14\,000 \text{ J}/(\text{m}^2 \times \text{K} \times \text{s}^{1/2})$) i zatim na drveni predmet ($b_2 = 400 \text{ J}/(\text{m}^2 \times \text{K} \times \text{s}^{1/2})$). Čelični i drveni predmet imaju jednaku temperaturu $\theta_2 = 20^\circ\text{C}$.

Temperatura koju osjećamo na koži dlana (temperatura dodira) iznosi:

- a) kod dodira čeličnog predmeta

$$\theta_0 = (400 \times 37 + 14\,000 \times 20) / (400 + 14\,000) = 20,5^\circ\text{C}$$

- b) kod dodira drvenog predmeta

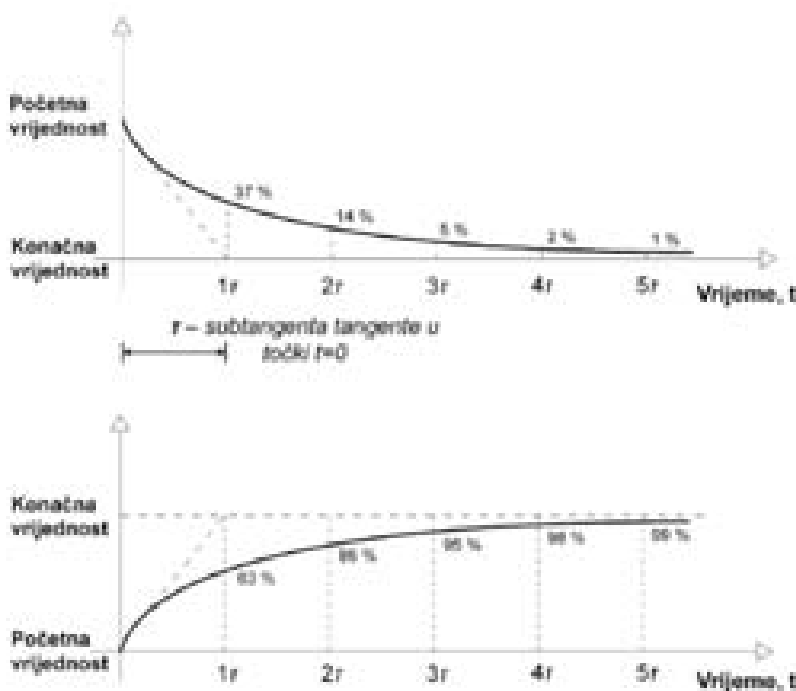
$$\theta_0 = (400 \times 37 + 400 \times 20) / (400 + 400) = 28,5^\circ\text{C}$$

Drveni predmet osjetiti će se kao mnogo topliji (temperatura koju osjeća koža je $28,5^\circ\text{C}$) od čeličnog predmeta (temperatura koju osjeća koža je $20,5^\circ\text{C}$) iako su drveni i čelični predmet jednake temperature 20°C .

4.6.6 Vremenska konstanta

Vrijeme tijekom kojeg se mijenja temperatura između dvije ustaljene (stacionarne) vrijednosti temperature naziva se prijelazno razdoblje (za razliku od ustaljenog razdoblja). Nakon prijelaznog razdoblja sustav postiže novu ustaljenu vrijednost temperature. Tijekom prijelaznog stanja temperatura se mijenja po eksponencijalnoj krivulji. **Vremenska konstanta**, τ , općenito, naznačuje potrebno vrijeme da bi se jedan eksponencijalno opadajući proces spustio na $1/e$ (na oko 36,8 %) njene početne vrijednosti. Eksponencijalno rastući proces raste u tom vremenskom razdoblju na oko 63,2 % konačne vrijednosti. Vremenska konstanta karakterizira, dakle, red veličine potrebnog vremena na kraju kojeg je postignuta nova ravnoteža. Pojednostavnjeno, može se smatrati, da se dosizanje ustaljenog stanja dogodi nakon vremena jednakog trostrukoj vremenskoj konstanti.

Vremenska konstanta geometrijski znači subtangentu na eksponencijalnu krivulju u trenutku $t = 0$ (vidjeti sliku 4.53). Subtangentu je projekcija na apscisu onog dijela tangente na krivulju koji je smješten između krivulje i apscise.



Slika 4.53 Stacionarno stanje i prijelazna pojava

Vremenska konstanta daje predodžbu o toplinskoj inerciji građevnog materijala, građevnog dijela zgrade ili toplinske zone/zgrade. Toplinska inercija može se, dakle, karakterizirati vremenskom konstantom. Duga vremenska konstanta (24 sata ili više) naznačuje sporu promjenu temperature tj. naznačuje veliku toplinsku inerciju. Kratka vremenska konstanta (2 sata ili manje) naznačuje brzu promjenu temperature, tj. naznačuje slabu toplinsku inerciju.

Ako se materijalnom tijelu koje je u toplinskoj ravnoteži na temperaturi θ_1 naglo promjeni temperatura okoliša na temperaturu θ_2 , promjena početne temperature materijalnog tijela u funkciji vremena, $\theta(t)$, kretati će se prema drugoj ravnotežnoj temperaturi θ_2 po eksponencijalnom zakonu:

$$\theta(t) = \Delta\theta \times (1 - e^{-t/\tau}) \quad (4.191)$$

gdje je

$e=2,718...$ baza prirodnih logaritama

$\Delta\theta$ razlika konačne i početne temperature, u °C,

τ vremenska konstanta.

Za $t = \tau$ iz izraza (4.192) dobije se promjena temperature u odnosu na početnu vrijednost:

$$\theta(\tau) = \Delta\theta \times (1 - e^{-1}) = \Delta\theta \times (1 - 0,3678) = \Delta\theta \times 0,632 \quad (4.192)$$

ili u postocima:

$$\theta(\tau) = 63,2 \% \Delta\theta$$

Kod povećanja početne temperature, za jednu vremensku konstantu temperatura poraste za 63,2 % razlike konačne i početne vrijednosti. Kod smanjenja početne temperature, za jednu vremensku konstantu temperatura se smanji na 36,8 % razlike početne i konačne vrijednosti. Za $t = 5\tau$ temperatura postigne 99 % razlike konačne i početne vrijednosti (vidjeti sliku 4.53):

$$\theta(5\tau) = \Delta\theta \times (1 - e^{-5}) = \Delta\theta \times (1 - 0,0067) = \Delta\theta \times 0,9932 \quad (4.193)$$

Toplinska ravnoteža se postiže, teoretski, na kraju beskonačnog vremena.

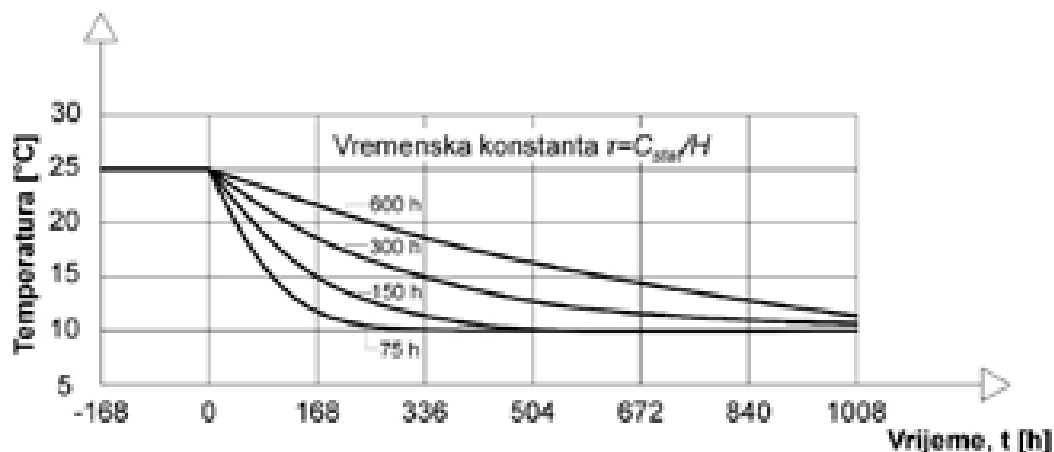
Vremenska konstanta, τ , jednoslojnog građevnog dijela od homogenog materijala opisuje njegovu toplinsku inerciju, što znači njegovu sposobnost da promjenu temperature okoline slijedi brže (mala vremenska konstanta) ili sporije (velika vremenska konstanta). Ona je jednaka umnošku plošnog toplinskog kapaciteta i toplinskog otpora građevnog dijela zgrade:

$$\tau = d \times \rho \times c \times \frac{d}{\lambda} = \frac{d^2}{a} \quad (4.194)$$

Vremenska konstanta, τ , sloja od homogenog materijala proporcionalna je s kvadratom debljine sloja, d , i obrnuto proporcionalna toplinskom difuzivnošću materijala, a .

Vremenska konstanta, τ , zgrade naznačuje vrijeme njenog odgovora (odziva) na naglu promjenu temperature okoliša. Ona opisuje, nakon promjene vanjske ili unutarnje temperature, vremenski razvoj ohlađivanja odnosno zagrijavanja do postizanja nove ravnotežne temperature u prostoru zgrade. Ako se, primjerice, promatra nagli porast vanjske temperature u trenutku $t=0$, vremenska konstanta naznačuje vrijeme tijekom kojeg će 63,2 % skoka vanjske temperature biti prenijeto na unutarnju temperaturu.

Vremenska konstanta zgrade ovisi, s jedne strane, o sposobnosti pohrane topline (toplinskom kapacitetu), i s druge strane, o zbroju koeficijenata ukupnog transmisijskog i ventilacijskog prijenosa topline promatrane zone zgrade. Na slici 4.54, za različite vremenske konstante zgrade, shematski je prikazan vremenski razvoj temperature u prostoriji nakon naglog smanjenja vanjske temperature od 25 °C na 10 °C. S velikom vremenskom konstantom može se početak grijanja zgrade odgoditi za više dana. Isto tako, kod dužih prekida u grijanju neće doći do smanjenja toplinske ugodnosti u prostoru zgrade. Treba međutim imati na umu da velika vremenska konstanta znači dužu fazu zagrijavanja prostora zgrade, ako se temperatura spusti ispod granice toplinske ugodnosti.



Slika 4.54 Shematski prikaz procesa rashlađivanja zgrade nakon smanjenja vanjske temperature za 15 °C

U gornjem slučaju, vremenska konstanta zgrade, τ , određuje se iz izraza:

$$\tau = \frac{C_{st}}{H} \quad (4.195)$$

gdje je:

C_{st} statički toplinski kapacitet zone zgrade, u J/K,

H ukupni koeficijent prijenosa topline zgrade, u W/K (vidjeti poglavlje 6.).

Vremenska konstanta zgrade, τ , jednaka je odnosu ukupne topline pohranjene u tijelu zgrade, C_{st} , i zbroja toplinskih tokova transmisijom i ventilacijom, H , iz prostora zgrade prema vanjskom prostoru, sve za razliku unutarnje i vanjske temperature 1 K.

4.6.7 Dinamičke toplinske karakteristike građevnog dijela zgrade uz sinusne rubne uvjete

4.6.7.1 Uvod

Toplinska difuzivnost materijala, a , i toplinska prodornost materijala, b , su karakteristike materijala koje govore o prijenosu topline kroz taj materijal kod nestacionarnih rubnih uvjeta. Kod višeslojnih građevnih dijelova zgrade veliki utjecaj na dinamički prijenos topline ima i redoslijed slojeva različitih materijala. Zato se za karakteriziranje njihovih svojstava u nestacionarnim uvjetima uvode drugi parametri.

Dinamičke toplinske karakteristike građevnog dijela zgrade opisuju toplinsko ponašanje građevnog dijela kada se on nalazi u promjenjivim rubnim uvjetima tj. promjenjivoj temperaturi ili promjenjivom toplinskom toku na jednoj ili obje svoje granice. U nastavku će se analizirati građevni dijelovi izloženi na svojim granicama sinusnim promjenama temperature i toplinskog toka prema HRN EN ISO 13786 [80].

Dinamičke toplinske karakteristike svakog građevnog dijela zgrade su četiri periodička koeficijenta toplinske veze, $L_{m,n}$ i dva periodička toplinska kapaciteta, C_m .

Vrijednosti dinamičkih toplinskih karakteristika građevnog dijela zgrade ovise o periodu toplinskih promjena. Za građevinsku praksu interesantni vremenski periodi su:

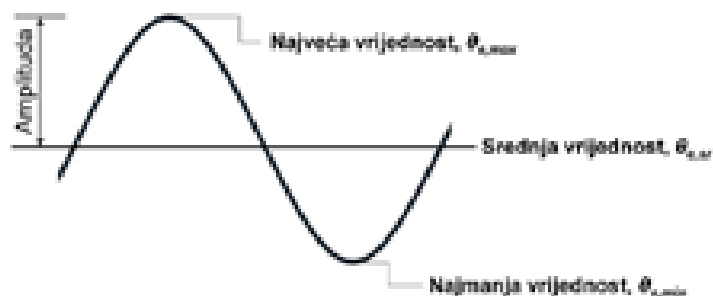
- jedan dan (86 400 sekundi) koji odgovara dnevnim meteorološkim promjenama u okolišu zgrade i promjenama unutarnje postavne temperature,
- jedna godina (31 536 000 sekundi) koji odgovara za analizu prijenosa topline kroz tlo.

U nastavku dane definicije dinamičkih toplinskih karakteristika građevnog dijela zgrade i matematički izrazi za njihov proračun vrijede za sve periode toplinskih promjena.

4.6.7.2 Sinusni rubni uvjeti

Rubni uvjeti sinusne promjene temperatura s obje strane građevnog dijela zgrade prikazani su na slici 4.56. Prema načelu superpozicije, za linearne sustave, ukupni odgovor na neki podražaj koji je izazvalo više uzroka jednak je zbroju odgovora koje bi izazvali isti podražaji da su djelovali pojedinačno.

Koristeći načelo superpozicije, prikaz dnevne oscilacije vanjske ili unutarnje temperature može se pojednostavniti rastavljajući je na dva dijela: srednju temperaturu oko koje nastaju oscilacije i same oscilacije temperature karakterizirane amplitudom oscilacija (vidjeti sliku 4.55), [80].



Slika 4.55 Prikaz harmonijske oscilacije temperature (sinusoidni titraj) vanjskog zraka

U nekom trenutku t temperatura vanjskog zraka, $\theta_e(t)$, ovisi o njenoj srednjoj vrijednosti, $\theta_{e,sr}$ i njenoj amplitudi $\theta_{e,amp} = (\theta_{e,max} - \theta_{e,sr})$ ili $\theta_{e,amp} = (\theta_{e,sr} - \theta_{e,min})$.

Uporabom kompleksnih brojeva, temperatura u zoni zgrade n može se opisati jednadžbom:

$$\theta_n(t) = \theta_{n,sr} + |\theta_{n,amp}| \times \cos(\omega t + \psi) = \theta_{n,sr} + 0,5 \times [\theta_{+n,amp} \times e^{j\omega t} + \theta_{-n,amp} \times e^{-j\omega t}] \quad (4.196)$$

Toplinski tok u zoni zgrade n može se opisati jednadžbom:

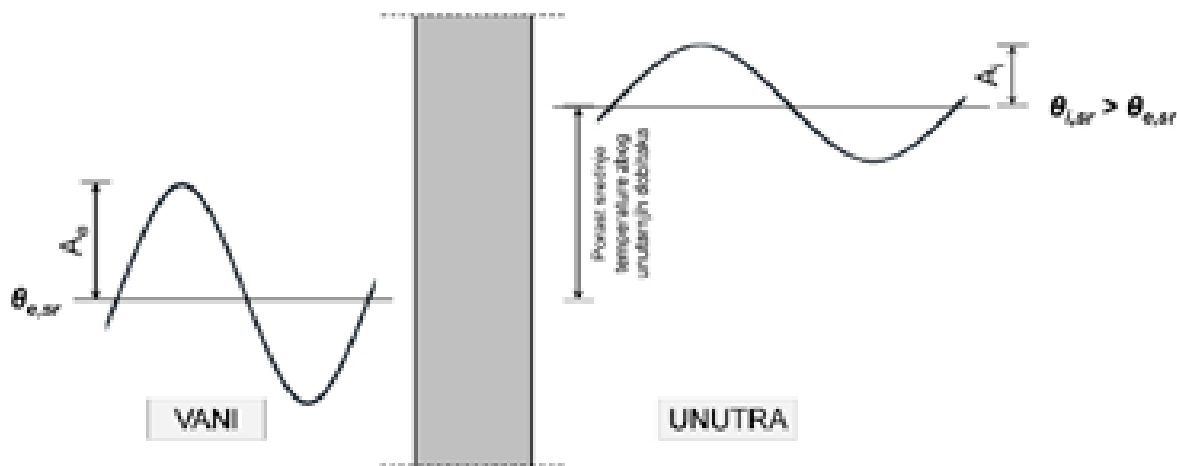
$$\phi_n(t) = \phi_{n,sr} + |\phi_{n,amp}| \times \cos(\omega t + \varphi) = \phi_{n,sr} + 0,5 \times [\phi_{+n,amp} \times e^{j\omega t} + \phi_{-n,amp} \times e^{-j\omega t}] \quad (4.197)$$

gdje je:

t	vrijeme, u s,
$\theta_{n,sr}$	srednja vrijednost temperature u zoni n , u °C,
$ \theta_{n,amp} $	modul kompleksne amplitude oscilacija temperature u zoni n , u °C,
$\phi_{n,sr}$	srednja vrijednost toplinskog toka u zoni n , u W,
$ \phi_{n,amp} $	modul kompleksne amplitude oscilacija toplinskog toka u zoni n , u W,
$\omega = 2\pi / T$	kutna frekvencija (kružna frekvencija), u rad/s,
T	period oscilacija, u s,
ψ i φ	fazne razlike, u rad,
$e = 2,718...$	baza prirodnih logaritama,
$j = (-1)^{1/2}$	imaginarna jedinica,

$\theta_{\pm n,amp} = |\theta_{n,amp}| \times e^{\pm j\psi}$ kompleksna amplituda oscilacija temperature u zoni n , u °C,

$\phi_{\pm n,amp} = |\phi_{n,amp}| \times e^{\pm j\varphi}$ kompleksna amplituda oscilacija toplinskog toka u zoni n , u W.



Slika 4.56 Oscilacija temperatura s obje strane vanjskog građevnog dijela zgrade

4.6.7.3 Periodički koeficijent toplinske veze

Dinamičke toplinske karakteristike svakog građevnog dijela su četiri periodička koeficijenta toplinske veze, L_{mn} . **Periodički koeficijent toplinske veze** (eng.: periodic thermal conductance), L_{mn} , je kompleksan broj koji povezuje periodički toplinski tok koji ulazi u građevni dio zgrade i periodičke temperature s njegove obje strane pod sinusnim uvjetima. Vrijedi izraz:

$$\phi_{m,amp} = L_{mm} \times \theta_{m,amp} - L_{mn} \times \theta_{n,amp} \quad (4.198)$$

Indeks *amp* označava kompleksnu amplitudu. *m* i *n* su različite toplinske zone zgrade ili dijelovi iste zone, odvojene promatranim građevnim dijelom zgrade. Vanjski prostor također se smatra toplinskom zonom.

$\theta_{m,amp}$ i $\theta_{n,amp}$ su kompleksne amplitude oscilacija temperature zraka u prostoriji / zoni *m*, odnosno *n*. $\phi_{m,amp}$ je kompleksna amplituda toplinskog toka koji se prenosi iz prostorije / zone *m* u susjednu prostoriju / zonu *n* tj. to je gubitak topline prostorije / zone *m*. $L_{mm} \times \theta_{m,amp}$ je toplinski tok iz prostorije / zone *m* koji ulazi u promatrani građevni dio. $L_{mn} \times \theta_{n,amp}$ je toplinski tok koji iz prostorije / zone *n* dolazi u prostoriju / zonu *m*.

Toplinski tok iz prostorije / zone *m* proporcionalan je temperaturi zraka u prostorijama / zonama *m* i *n*. Faktori proporcionalnosti su L_{mm} i L_{mn} , nazvani periodički koeficijenti toplinske veze. L_{mn} povezuje periodički toplinski tok na strani *m* s periodičkom promjenom temperature na strani *n*, kad je amplituda temperature na strani *m* jednaka nuli. L_{mm} povezuje periodički toplinski tok na strani *m* s periodičkom temperaturom na istoj strani *m* kad je amplituda temperature na strani *n* jednaka nuli.

Dogovorno se uzima da je toplinski tok pozitivan kad ulazi u građevni dio.

Ako je više građevnih dijelova povezano na istu zonu zgrade *j*, tada je:

$$\phi_{j,amp} = \sum_k (L_{11,k} \times \theta_{j,amp} - L_{12,k} \times \theta_{k,amp}) \quad (4.199)$$

gdje se zbrajanje odnosi na sve zone *k* koje su toplinski spojene s promatranom zonom *j*.

Periodičke toplinske karakteristike L_{mm} i L_{mn} su karakteristike promatranog građevnog dijela zgrade. Za neravninske građevne dijelove i građevne dijelove koji sadrže značajne toplinske mostove, njihove vrijednosti se mogu utvrditi samo rješavanjem diferencijalne jednačbe prijenosa topline uz periodične rubne uvjete. U tu svrhu koriste se numeričke metode kao što su metoda konačnih elemenata i metoda konačnih razlika, što znači nužnost uporabe odgovarajućih računalnih programa.

4.6.7.4 Periodički toplinski kapacitet [80], [81]

Povećanje temperature materijalnog tijela za $\Delta\theta$ uzrokuje povećanje pohranjene topline (unutarnje energije) u tom tijelu za ΔQ . Pri tome, uz pretpostavku jednakomjernog zagrijavanja ili ohlađivanja tijela, vrijedi izraz:

$$\Delta Q = C \times \Delta\theta \quad (4.200)$$

gdje je C statički toplinski kapacitet tijela. Izraz (4.200) vrijedi za bilo koji vremenski interval tako da se izraz (4.201) može napisati u obliku:

$$\frac{dQ}{dt} = C \times \left(\frac{d\theta}{dt} \right) \quad (4.201)$$

Lijeva strana jednadžbe (4.201) je toplinski tok Φ doveden tijelu (ili odveden iz tijela), pa se jednadžba (4.201) može pisati kao:

$$\phi = C \times \left(\frac{d\theta}{dt} \right) \quad (4.202)$$

Tijelu dovedeni ili iz tijela odvedeni toplinski tok Φ proporcionalan je vremenski promjenjivoj temperaturi okoliša. Neka temperatura okoliša vremenski oscilira po sinusnom zakonu:

$$\theta(t) = \theta_{\text{amp}} \times \sin \left(\left(\frac{2 \times \pi}{T} \right) \times t \right) \quad (4.203)$$

gdje je θ_{amp} amplituda oscilacije temperature okoliša, a T je period tih oscilacija. Zbog oscilacija temperature (kao uzroka) dolazi do oscilacija toplinskog toka (kao posljedice). Taj promjenjivi toplinski tok dobije se uvrštavanjem derivacije izraza (4.203) u izraz (4.202):

$$\phi(t) = C \times \theta_{\text{amp}} \times \left(\frac{2 \times \pi}{T} \right) \times \cos \left(\left(\frac{2 \times \pi}{T} \right) \times t \right) \quad (4.204)$$

Prema jednadžbi (4.203) promjena temperature zraka u prostoriji / zoni m , $\theta(t)$, opisana je kompleksnom amplitudom oscilacija temperature, θ_{amp} . Time uzrokovana amplituda oscilacije toplinskog toka, $|\Phi_{\text{amp}}|$ je:

$$|\phi(\text{amp})| = C \times |\theta_{\text{amp}}| \times \left(\frac{2 \times \pi}{T} \right) \quad (4.205)$$

Iz jednadžbe (4.205) toplinski kapacitet iznosi:

$$C = \left(\frac{T}{2\pi} \right) \times \frac{|\phi_{\text{amp}}|}{|\theta_{\text{amp}}|} \quad (4.206)$$

Jednadžba (4.206) može se koristiti za definiciju dinamičkog toplinskog kapaciteta. Za građevni dio zgrade koji ograđuje prostoriju / zonu m dinamički toplinski kapacitet biti će:

$$C_m = \left(\frac{T}{2\pi} \right) \times \frac{|\phi_{m,\text{amp}}|}{|\theta_{m,\text{amp}}|} \quad (4.207)$$

Toplinski kapacitet ovisi o amplitudi oscilacija temperature zraka $|\theta_{m,\text{amp}}|$ i o amplitudi oscilacija toplinskog toka koji ulazi u građevni dio $|\phi_{m,\text{amp}}|$. Jedan dio topline koji u prostoriji / zoni m ulazi u promatrani građevni dio zgrade prenosi se s druge strane građevnog dijela u susjednu zonu n . Za određivanje toplinskog kapaciteta treba odrediti dio topline koji ostaje unutar građevnog dijela tj. toplinski tok koji prelazi u susjednu prostoriju / zonu n treba odbiti od toplinskog toka koji u prostoriji / zoni m ulazi u promatrani građevni dio. Vrijedi, dakle:

$$\phi_{m,\text{amp}} = L_{mm} \times \theta_{m,\text{amp}} - L_{mn} \times \theta_{m,\text{amp}} \quad (4.208)$$

odnosno

$$\phi_{m,amp} = \theta_{m,amp} \times (L_{mm} - L_{mn}) \quad (4.209)$$

Uvrštavanjem izraza (4.210) u izraz (4.207) dobije se konačni izraz za periodički toplinski kapacitet u obliku:

$$C_m = \left(\frac{T}{2\pi} \right) \times |L_{mm} - L_{mn}| \quad (4.210)$$

odnosno

$$C_m = \frac{|L_{mm} - L_{mn}|}{\omega} \quad (4.211)$$

gdje je $\omega = 2\pi/T$ kružna frekvencija.

Izraz (4.211) prihvaćen je kao definicijska jednadžba periodičkog toplinskog kapaciteta.

Na razini prostorije, toplinski kapacitet, C_m , odnosi se na sve površine građevnih dijelova koje su okrenute prema promatranjoj prostoriji s indeksom m . Koeficijent periodičke toplinske veze, L_{mn} , opisuje nestacionarnu toplinsku vezu prostorija s indeksima m i n , kod čega broj prostorija n nije ograničen.

Na razini svakog građevnog dijela zgrade postoje dva toplinska kapaciteta, C_m , u J/K, po jedan za svaku stranu građevnog dijela. Oni, pored četiri dinamička koeficijenta toplinske veze, predstavljaju dodatne dinamičke toplinske karakteristike građevnog dijela zgrade. **Periodički toplinski kapacitet** (eng.: periodic heat capacity) daje količinu topline koja se može spremiti (akumulirati) u građevnom dijelu tijekom polovice perioda oscilacija, kad se amplituda temperatura na odgovarajućoj strani građevnog dijela mijenja za 1 °C. Periodički toplinski kapaciteti, općenito, nisu jednaki na obje strane građevnog dijela.

Dinamički toplinski kapacitet uz periodičke rubne uvjete manji je od stacionarnog toplinskog kapaciteta.

4.6.7.5 Vremenski pomak

Vremenski pomak, Δt , je vrijeme između najveće amplitude uzroka i najveće amplitude njegova učinka. Vremenski pomak znači vremensku prednost (ako je pozitivan) ili vremenski zaostatak (ako je negativan).

4.6.7.6 Matrica prijenosa topline za građevni dio koji se sastoji od ravnih slojeva od homogenog materijala

Ravni građevni dio je građevni dio zgrade za koji je najmanji polumjer zakrivljenosti jednak ili veći od njegove peterostruke debljine. Homogeni sloj materijala je sloj materijala u kojem najveće nehomogenosti ne premašuju petinu debljine sloja. Za ravne (pločaste) građevne dijelove koji se sastoje od međusobno paralelnih ravnih slojeva od homogenog materijala može se koristiti pojednostavnjena metoda proračuna periodičkih koeficijenata toplinske veze i toplinskih kapaciteta. Uobičajeni toplinski mostovi u ovakvim građevnim dijelovima obično nemaju veći utjecaj na dinamičke toplinske karakteristike pa se zato mogu zanemariti.

Uz pravilne sinusne rubne uvjete i jednodimenzionalni toplinski tok, na svakom mjestu, x , po dubini građevnog dijela ($0 < x < d$, gdje je d debljina homogenog sloja), promjena temperature s vremenom može se modelirati izrazom [80]:

$$\theta_n(x, t) = \theta_{sr}(x) + 0,5 \times [\theta_{+n,amp}(x) \times e^{j\omega t} + \theta_{-n,amp}(x) \times e^{-j\omega t}] \quad (4.212)$$

a promjene gustoće toplinskog toka izrazom:

$$q_n(x, t) = q_{sr}(x) + 0,5 \times [q_{+n,amp}(x) \times e^{j\omega t} + q_{-n,amp}(x) \times e^{-j\omega t}] \quad (4.213)$$

gdje je:

$$\theta_{\pm, \text{amp}}(x) = |\theta_{\text{amp}}(x)| \times e^{\pm j\psi}$$

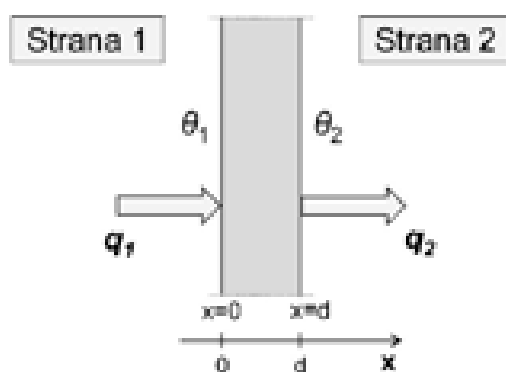
$$q_{\pm, \text{amp}}(x) = |q_{\text{amp}}(x)| \times e^{\pm j\varphi}$$

$$\omega = 2\pi/T$$

T

ψ i φ

kompleksna amplituda oscilacija temperature, u °C,
kompleksna amplituda oscilacija gustoće toplinskog toka, u W/m²,
kružna frekvencija u rad/s,
period oscilacija, u s,
fazne razlike, u rad.



Slika 4.57 Model sloja građevnog dijela zgrade od homogenog materijala, s rubnim uvjetima

Oscilacije temperature i gustoće toplinskog toka su oscilacije oko srednjih vrijednosti θ_{sr} i q_{sr} tih varijabli, koje su međusobno povezane izrazom:

$$q_{sr} = U \times (\theta_{i, sr} - \theta_{e, sr}) \quad (4.214)$$

Ovdje je U statički koeficijent prolaska topline građevnog dijela zgrade, u W/(m²×K). $\theta_{i, sr}$ je srednja temperatura unutarnjeg zraka, a $\theta_{e, sr}$ je srednja temperatura vanjskog zraka.

Jednodimenzionalna jednadžba vođenja topline može se riješiti za građevni dio koji se sastoji od ravnih slojeva od homogenog materijala uz sinusne rubne uvjete [83]. Rješenje je sustav linearnih jednadžbi:

$$\begin{aligned} \theta_{2, \text{amp}} &= Z_{11} \times \theta_{1, \text{amp}} + Z_{12} \times q_{1, \text{amp}} \\ q_{2, \text{amp}} &= Z_{21} \times \theta_{1, \text{amp}} + Z_{22} \times q_{1, \text{amp}} \end{aligned} \quad (4.215)$$

Ovo rješenje može se kraće predstaviti matričnom jednadžbom:

$$\begin{bmatrix} \theta_{2, \text{amp}} \\ q_{2, \text{amp}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \theta_{1, \text{amp}} \\ q_{1, \text{amp}} \end{bmatrix} \quad (4.216)$$

Matrica prijenosa topline

U matričnoj jednadžbi (4.217) promatrani građevni dio je predstavljen matricom:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \quad (4.217)$$

koja se naziva **matrica prijenosa topline**. Ta matrica povezuje kompleksne amplitude temperature i gustoće toplinskog toka na jednoj strani građevnog dijela zgrade s kompleksnim amplitudama temperature i gustoće toplinskog toka na drugoj strani. Matrica prijenosa topline, $\mathbf{Z}$, predstavlja građevni dio zgrade. Ona omogućava da se proračunaju promjene temperature, θ_2 , i gustoće toplinskog toka, q_2 , na jednoj strani građevnog dijela kada su poznate temperatura, θ_1 , i gustoća toplinskog toka, q_1 , na drugoj strani građevnog dijela.

Elementi matrice $\mathbf{Z}$ su kompleksni brojevi. Postupak proračuna elemenata matrice $\mathbf{Z}$ je slijedeći:

- 1 utvrditi dimenzije i sastav građevnog dijela te za svaki predviđeni građevni materijal utvrditi projektne vrijednosti toplinske vodljivosti, λ , gustoće, ρ , i specifičnog toplinskog kapaciteta, c . Slojeve višeslojnog građevnog dijela numerirati po redu njihova položaja u sastavu građevnog dijela, tako da prvi sloj bude onaj s unutarnje strane građevnog dijela (strana 1),
- 2 odrediti period oscilacija na graničnim površinama građevnog dijela. U pravilu je to vremenski period od jednog dana (86 400 s), koji odgovara dnevnim meteorološkim promjenama i dnevnim promjenama unutarnje temperature,
- 3 za materijal svakog sloja građevnog dijela treba proračunati periodičku dubinu prodiranja toplinskog vala, δ , i zatim omjer, ξ , debljine sloja i periodičke dubine prodiranja za taj sloj, $\xi = d / \delta$,
- 4 zatim se za svaki sloj građevnog dijela odrede elementi matrice prijenosa topline prema jednadžbama (4.218),
- 5 množenjem elemenata matrice prijenosa topline različitih slojeva građevnog dijela prema jednadžbama (4.220) i (4.221), dobije se matrica prijenosa topline čitavog građevnog dijela zgrade.

Elementi matrice, Z_{mn} , proračunaju se za svaki homogeni sloj pomoću slijedećih izraza:

$$Z_{11} = Z_{22} = \cosh(\xi)\cos(\xi) + j \sinh(\xi)\sin(\xi) \quad (4.218)$$

$$Z_{12} = - [\delta/(2 \times \lambda)] \times \{ \sinh(\xi)\cos(\xi) + \cosh(\xi)\sin(\xi) + j [\cosh(\xi)\sin(\xi) - \sinh(\xi)\cos(\xi)] \}$$

$$Z_{21} = - (\lambda/\delta) \times \{ \sinh(\xi)\cos(\xi) - \cosh(\xi)\sin(\xi) + j [\sinh(\xi)\cos(\xi) + \cosh(\xi)\sin(\xi)] \}$$

gdje je:

δ	periodička dubina prodiranja toplinskog vala u materijal, prema izrazu (4.187), u m,
d	debljina sloja građevnog dijela zgrade, u m,
$j = +(-1)^{1/2}$	imaginarna jedinica,
$\xi = d/\delta$	omjer debljine sloja i periodičke dubine prodiranja; broj bez dimenzije,
$\sinh$	sinus hiperbolni,
$\cosh$	kosinus hiperbolni.

Za ravne zračne šupljine zanemaruje se specifični toplinski kapacitet, pa matrica prijenosa za mirni sloj zraka glasi:

$$\mathbf{Z}_a = \begin{vmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 - R_a & \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.219)$$

Ovdje je R_a toplinski otpor sloja zraka, koji uključuje prijenos topline vođenjem, strujanjem i zračenjem. Jednaka matrica može se koristiti i za slojeve toplinsko-izolacijskog materijala male mase.

Matrica prijenosa topline višeslojnog građevnog dijela zgrade, koji se sastoji od N slojeva, od jedne do druge njegove površine je:

$$\mathbf{Z} = \begin{vmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{vmatrix} = \mathbf{Z}_N \mathbf{Z}_{N-1} \dots \mathbf{Z}_3 \mathbf{Z}_2 \mathbf{Z}_1 \quad (4.220)$$

gdje su $\mathbf{Z}_1, \mathbf{Z}_2, \mathbf{Z}_3, \dots, \mathbf{Z}_N$ matrice prijenosa topline pojedinih slojeva građevnog dijela zgrade, koji se numeriraju počevši od sloja 1 na strani 1. Dogovorno se, dakle, u višeslojnim građevnim dijelovima ovojnice zgrade za sloj 1 uzima prvi sloj s unutarnje strane.

Matrica prijenosa topline iz okoliša u okoliš (iz prostora zgrade u vanjski prostor) kroz građevni dio je:

$$\mathbf{Z}_{ee} = \mathbf{Z}_{s2} \mathbf{Z} \mathbf{Z}_{s1} \quad (4.221)$$

Ovdje su $\mathbf{Z}_{s2}$ i $\mathbf{Z}_{s1}$ matrice prijenosa topline graničnih slojeva tj. prijelaza topline:

$$\mathbf{Z}_s = \begin{vmatrix} 1 & -R_s \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (4.222)$$

U izrazu (4.222) R_s je toplinski otpor graničnog sloja koji uključuje strujanje i zračenje (vidjeti tablicu 4.3). Matrica prijenosa topline i dinamičke toplinske karakteristike građevnog dijela zgrade moraju se proračunati s vrijednostima otpora prijelaza topline u skladu s orijentacijom promatranog građevnog dijela. Ako orijentacija građevnog dijela nije poznata, proračun se mora provesti za vertikalnu orijentaciju (horizontalni toplinski tok).

Ako vanjski prostor, kako je to uobičajeno, označimo indeksom e , a unutarnji prostor indeksom i , matricni izraz (4.221) poprima oblik:

$$\mathbf{Z}_{ei} = \mathbf{Z}_{se} \mathbf{Z} \mathbf{Z}_{si} \quad (4.223)$$

a matricna jednadžba (4.216) tada glasi:

$$\begin{vmatrix} \theta_{e,amp} \\ q_{e,amp} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \theta_{i,amp} \\ q_{i,amp} \end{vmatrix} \quad (4.224)$$

Parovi varijabli $(\theta_{e,amp}, q_{e,amp})$ i $(\theta_{i,amp}, q_{i,amp})$ su varijable stanja uz vanjsku i unutarnju površinu promatranog građevnog dijela zgrade.

Svaki element Z_{mn} matrice prijenosa topline $\mathbf{Z}$ je kompleksni broj koji se može prikazati svojim modulom, $|Z_{mn}|$, i svojim argumentom, $\varphi_{mn} = \arg(Z_{mn})$ u kutnim jedinicama. Argumenti se smiju pretvoriti u odgovarajuće vremenske pomake. Fizikalna interpretacija elemenata matrice prijenosa topline je slijedeća:

- $|Z_{11}|$ je faktor amplitude temperature, tj. amplituda promjena temperature na strani 2 građevnog dijela koja je rezultat amplitude od 1 K na strani 1, kada nema promjene toplinskog toka na strani 1 („ulaz“), tj. $q_{1,amp} = 0$,
- φ_{11} je pomak faze između temperatura na dvjema stranama građevnog dijela zgrade,
- $|Z_{12}|$ daje amplitudu temperature na strani 2 građevnog dijela kad je strana 1 izložena periodičkoj promjeni gustoće toplinskog toka s amplitudom od 1 W/m², kada nema oscilacija temperature na strani 1 tj. $\theta_{1,amp} = 0$,
- φ_{12} je pomak faze između temperature na strani 2 i gustoće toplinskog toka strane 1 građevnog dijela zgrade,
- $|Z_{21}|$ daje amplitudu gustoće toplinskog toka na strani 2 građevnog dijela („izlaz“) koja je rezultat periodičke promjene temperature s amplitudom od 1 K na strani 1 („ulaz“), kada nema promjene toplinskog toka na strani 1 tj. $q_{1,amp} = 0$,
- φ_{21} je pomak faze između gustoće toplinskog toka na strani 2 i temperature strane 1 građevnog dijela zgrade,
- $|Z_{22}|$ je faktor amplitude toplinskog toka, tj. amplituda promjena gustoće toplinskog toka na strani 2 građevnog dijela koja je rezultat amplitude gustoće toplinskog toka od 1 W/m² na strani 1, kada nema oscilacija temperature na strani 1 tj. $\theta_{1,amp} = 0$,
- φ_{22} je pomak faze između gustoće toplinskog toka na dvjema stranama građevnog dijela zgrade.

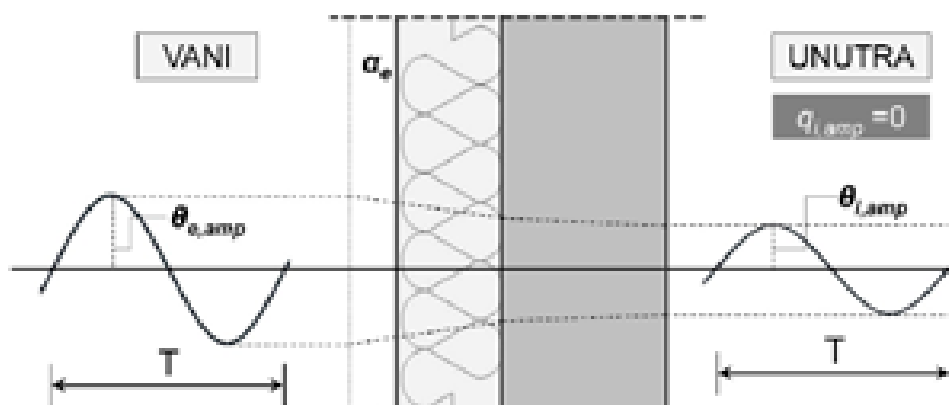
Vremenski zaostatak između najvećeg učinka i najvećeg odgovarajućeg uzroka može se proračunati iz pomaka faze elemenata matrice prijenosa topline, Z_{ij} , na slijedeći način:

$$\Delta t_{ij} = \left[\frac{T}{(2 \times \pi)} \right] \times \varphi_{ij} = \left[\frac{T}{(2 \times \pi)} \right] \times \arg(Z_{ij}) \quad (4.225)$$

Primjer 4.17

Ocijeniti sposobnost prigušenja amplitude oscilacija temperature vanjskog zraka i pomak faze oscilacija za vanjski građevni dio zgrade, kod konstantnog toplinskog toka na unutarnjoj strani građevnog dijela.

Rubni uvjeti prikazani su grafički na slici 4.58. Radi se o ocjeni utjecaja amplitude oscilacija temperature vanjskog zraka građevnog dijela zgrade na oscilaciju temperature unutarnje površine građevnog dijela, kod konstantne unutarnje gustoće toplinskog toka. Konstantnu unutarnju gustoću toplinskog toka imamo primjerice u zgradi s konstantnim grijanjem ili hlađenjem, odnosno kod zgrade s unutarnjim građevnim dijelovima zanemarive mase.



Slika 4.58 Toplinsko opterećenje izvana; konstantna unutarnja gustoća toplinskog toka

Faktor prigušenja amplitude dan je izrazom

$$\frac{\theta_{e,amp}}{\theta_{i,amp}} = Z_{11}$$

Vremenski pomak (pomak faze) između amplitude oscilacija temperature vanjskog zraka i amplitude oscilacija temperature unutarnje površine građevnog dijela iznosi

$$\Delta t = \left(\frac{T}{2\pi} \right) \times \arg(Z_{11})$$

gdje je $T = 86\,400$ s period oscilacija temperature.

Z_{11} je element matrice $\mathbf{Z}$ prijenosa topline, koja karakterizira građevni dio zgrade.

Matrica $\mathbf{Z}$ povezuje rubne uvjete na jednoj strani s temperaturom i toplinskim tokom na drugoj strani građevnog dijela (jednadžba (4.216)). Prikazani model proračuna može se koristiti kod dnevnih oscilacija vanjske temperature. Primjerice za vanjski zid unutarnja temperatura može se smatrati približno konstantnom i model koristiti za proračun promjene toplinskog toka. Kod istog zida, za promjenu unutarnje temperature po sinusnom zakonu, model omogućava proračun amplitude oscilacija unutarnje temperature prouzročenih promjenama vanjske temperature, kada sustav grijanja ili hlađenja nije u pogonu.

Rješavanjem sustava jednadžbi:

$$\begin{aligned} \theta_{2,amp} &= Z_{11} \times \theta_{1,amp} + Z_{12} \times q_{1,amp} \\ q_{2,amp} &= Z_{21} \times \theta_{1,amp} + Z_{22} \times q_{1,amp} \end{aligned} \quad (4.226)$$

po $q_{1,amp}$ i $q_{2,amp}$, mogu se iz promjena temperatura izračunati promjene toplinskog toka koji ulazi u građevni dio s obje strane:

$$\begin{aligned} q_{1,amp} &= (-Z_{11}/Z_{12}) \times \theta_{1,amp} + (1/Z_{12}) \times \theta_{2,amp} \\ -q_{2,amp} &= (1/Z_{12}) \times \theta_{1,amp} - (Z_{22}/Z_{12}) \times \theta_{2,amp} \end{aligned} \quad (4.227)$$

Kraći zapis sustava jednadžbi (4.228) je u obliku matrične jednadžbe:

$$\begin{bmatrix} q_{1,amp} \\ -q_{2,amp} \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_{12}} \begin{bmatrix} -Z_{11} & 1 \\ 1 & -Z_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \theta_{1,amp} \\ \theta_{2,amp} \end{bmatrix} \quad (4.228)$$

Predznak za $q_{2,amp}$ promijenjen je jer pozitivan smjer ide iz građevnog dijela na strani 2.

4.6.7.7 Dinamičke toplinske karakteristike građevnog dijela zgrade od ravnih i homogenih slojeva (jednodimenzionalni toplinski tok)

U slučaju jednodimenzionalnog toplinskog toka obično se sve karakteristike građevnog dijela zgrade svedu na jedinicu ploštine građevnog dijela. Tako se umjesto periodičkih koeficijenata toplinske veze, L , koriste odgovarajući koeficijenti Y , dani izrazom:

$$Y = \frac{L}{A} \quad (4.229)$$

gdje je A ploština promatranog građevnog dijela zgrade.

Promatrana dinamička svojstva, za građevne dijelove od ravnih i homogenih slojeva, su upijanje topline (eng.: thermal admittance) i dinamička svojstva prijenosa topline (eng.: thermal dynamic transfer properties). Ona povezuju periodičke promjene toplinskog toka s periodičkim promjenama temperature. Upijanje topline povezuje promjene toplinskog toka s promjenama temperature na istoj strani građevnog dijela. Dinamička svojstva prijenosa topline povezuju promjene temperature i toplinskog toka s jedne strane građevnog dijela s onima na drugoj strani. Iz navedenih svojstava može se definirati toplinski kapacitet promatranog građevnog dijela zgrade koji kvantificira svojstvo pohrane topline tog građevnog dijela.

Upijanje topline

Upijanje topline (eng.: thermal admittance), Y_{mm} , je kompleksna veličina definirana kao kompleksna amplituda gustoće toplinskog toka koji prolazi kroz površinu građevnog dijela uz zonu m , podijeljena s kompleksnom amplitudom temperature u istoj zoni, kad se temperatura na drugoj strani drži konstantnom (to znači da je amplituda nula):

$$Y_{mm} = \frac{q_{m,amp}}{\theta_{m,amp}} \text{ za } \theta_{n,amp} = 0 \quad (4.230)$$

Upijanje topline je, dakle, amplituda promjene gustoće toplinskog toka na jednoj strani kao posljedica jedinične amplitude promjene temperature na istoj strani, kada je amplituda promjene temperature na drugoj strani nula:

$$Y_{11} = \frac{q_{1,amp}}{\theta_{1,amp}} \text{ za } \theta_{2,amp} = 0 \quad (4.231)$$

Upijanje topline karakterizira toplinsku inerciju zgrade kod periodičke toplinske pobude. To je mjera sposobnosti građevnog dijela zgrade da pohrani i otpusti toplinu u dnevnom periodu oscilacija temperature.

Iz jednadžbe (4.228) slijedi:

$$Y_{11} = \frac{Z_{11}}{Z_{12}} \quad (4.232)$$

Za drugu stranu je $Y_{22} = -q_{2,amp} / \theta_{2,amp}$ za $\theta_{1,amp} = 0$, pa je iz jednačbe (4.228):

$$Y_{22} = \frac{-Z_{22}}{Z_{12}} \quad (4.233)$$

Y_{11} odnosi se na unutarnju stranu, a Y_{22} karakterizira vanjsku stranu građevnog dijela zgrade. Y_{22} je općenito različit od Y_{11} . Toplinski tok koji ulazi u građevni dio smatra se pozitivnim.

Periodički koeficijenti toplinske veze su:

$$\begin{aligned} L_{11} &= A \times Y_{11} \\ L_{22} &= A \times Y_{22} \end{aligned} \quad (4.234)$$

gdje je A ploština površine promatranog građevnog dijela zgrade.

Unutarnja površina građevnog dijela zgrade izložena unutarnjem zraku, koja je načinjena od masivnog materijala (npr. beton, opeka, kamen,...) ima značajnu sposobnost pohraniti periodičke toplinske tokove. Upijanje topline, Y_{mm} , tog sloja je veliko, a kao posljedica toga promjene temperature u prostoriji su smanjene.

Vremenski pomak upijanja topline je:

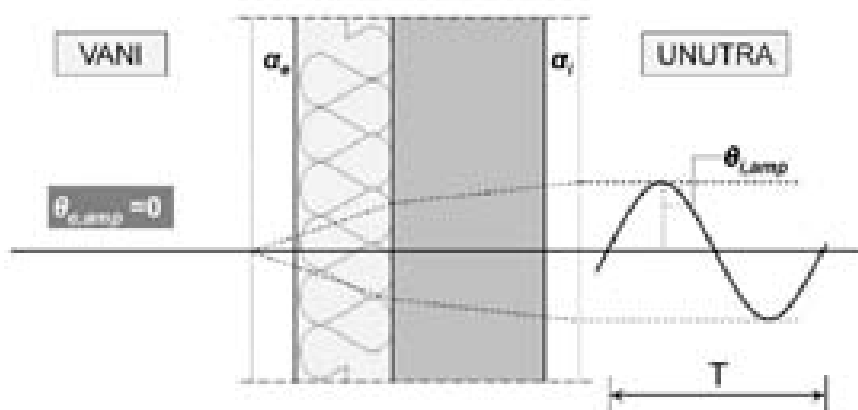
$$\Delta t_Y = \left[\frac{T}{(2 \times \pi)} \right] \times \arg(Y_{mm}) \quad (4.235)$$

pri čemu se argument određuje u rasponu od 0 do 2π .

Primjer 4.18

Ocijeniti sposobnost pohrane topline (upijanje topline) sa strane prostorije za periodičku promjenu temperature sa strane prostorije (strana 1). S vanjske strane (strana 2) je konstantna temperatura.

Rubni uvjeti prikazani su grafički na slici 4.59. Radi se o oscilaciji temperature sa strane prostorije uslijed opterećenja toplinom u prostoriji. Toplinski tok može potjecati od unutarnjih izvora (npr. metabolizma ljudi, rasvjete,...) ili od dozračene topline kroz prozirne dijelove u ovojnici zgrade.



Slika 4.59 Rubni uvjeti za ocjenu dinamičkih toplinskih karakteristika građevnog dijela zgrade.

Prema jednačbi (4.231) i jednačbi (4.232) upijanje topline s unutarnje strane građevnog dijela zgrade iznosi

$$Y_{11} = \frac{q_{1,amp}}{\theta_{1,amp}} = \frac{q_{i,amp}}{\theta_{i,amp}} = \frac{-Z_{11}}{Z_{12}}$$

Z_{11} i Z_{12} su elementi matrice $\mathbf{Z}$ prijenosa topline, koja karakterizira građevni dio zgrade.

Za unutarnje građevne dijelove zgrade, kad su promjene temperature s obje strane građevnog dijela iste, periodički toplinski tok povezan je s periodičkim promjenama temperature izmijenjenim upijanjem topline Y_{mn}^* koji iznosi:

$$Y_{mn}^* = Y_{mm} - Y_{mn} \quad (4.236)$$

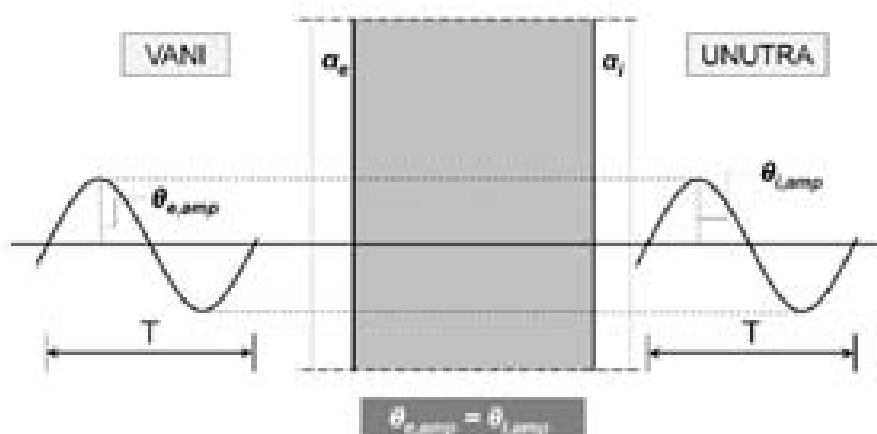
gdje je Y_{mn} periodički koeficijent prolaska topline (toplinske veze).

Za svaki građevni dio zgrade koji odvaja dvije zone zgrade postoje dva upijanja topline. Ona ovise o periodu toplinskih promjena, a opisana su svojim modulima i argumentima.

Primjer 4.19

Ocijeniti sposobnost pohrane topline (upijanja topline) kad građevni dio odjeljuje dvije prostorije / zone u kojima dolazi do jednakih oscilacija temperature uslijed toplinskog toka u prostorijama, npr. unutarnjih izvora (primjerice metabolizma ljudi, rasvjete,...) ili od dozračene topline kroz prozirne dijelove u ovojnici zgrade.

Rubni uvjeti prikazani su grafički na slici 4.60. Potrebno je odrediti upijanje topline od strane građevnog dijela.



Slika 4.60 Rubni uvjeti za građevni dio koji graniči s prostorijama jednake klime (jednake amplitude oscilacija temperature)

Prema izrazu (4.236) te jednačbama (4.232) i (4.239) je

$$Y_{11}^* = Y_{11} - Y_{12} = \frac{q_{i,amp}}{\theta_{i,amp}} = \frac{-Z_{11}}{Z_{12}} - \left(\frac{-1}{Z_{12}} \right) = \frac{(1 - Z_{11})}{Z_{12}}$$

Z_{11} i Z_{12} su elementi matrice $\mathbf{Z}$ prijenosa topline, koja karakterizira građevni dio zgrade.

Periodički koeficijent prolaska topline

Periodički koeficijent prolaska topline (eng.: periodic thermal transmittance), Y_{mn} , je kompleksna veličina definirana kao kompleksna amplituda gustoće toplinskog toka kroz površinu građevnog dijela uz zonu m , podijeljena s kompleksnom amplitudom temperature u zoni n , kad se temperatura u zoni m drži konstantnom (a to znači da je amplituda nula):

$$Y_{mn} = \frac{q_{m,amp}}{\theta_{n,amp}} \text{ za } \theta_{m,amp} = 0 \quad (4.237)$$

Periodički koeficijent prolaska topline je, dakle, amplituda promjene gustoće toplinskog toka na jednoj strani kada je amplituda promjene temperature na istoj toj strani nula i kad je jedinična amplituda promjene temperature na drugoj strani:

$$Y_{12} = \frac{q_{2,\text{amp}}}{\theta_{1,\text{amp}}} \text{ za } \theta_{2,\text{amp}} = 0 \quad (4.238)$$

Iz jednadžbe (4.228) slijedi:

$$Y_{12} = \frac{-1}{Z_{12}} \quad (4.239)$$

Uvijek je $Y_{21} = Y_{12}$.

Vremenski pomak periodičkog koeficijenta prolaska topline je:

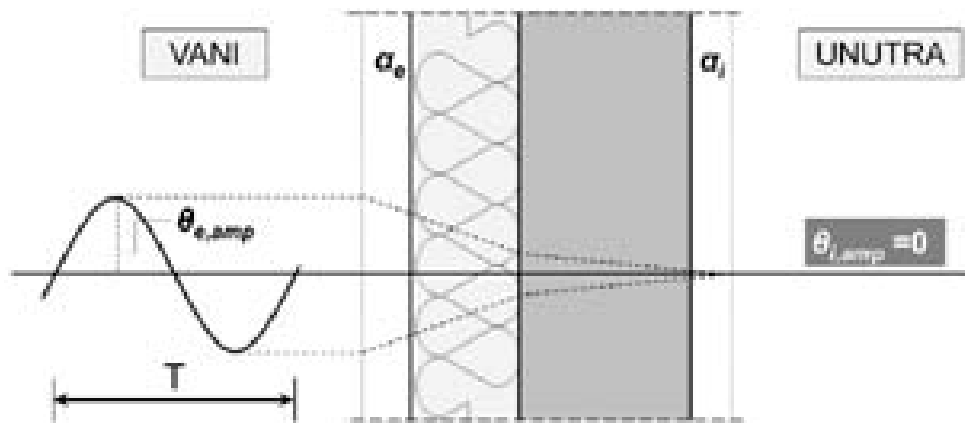
$$\Delta t_Y = \left[\frac{T}{(2 \times \pi)} \right] \times \arg(Z_{12}) \quad (4.240)$$

pri čemu je argument određen u rasponu od -2π do 0 .

Primjer 4.20

Ocijeniti utjecaj amplitude promjene temperature vanjskog zraka na amplitudu promjene toplinskog toka s unutarnje strane građevnog dijela zgrade kad je temperatura unutarnjeg zraka konstantna.

Rubni uvjeti prikazani su grafički na slici 4.61. Radi se o oscilaciji temperature s vanjske strane građevnog dijela uslijed promjenjivih klimatskih uvjeta. Unutarnji prostor je klimatiziran (temperatura unutarnjeg zraka je konstantna) ili se radi o zgradi s vrlo masivnim građevnim dijelovima.



Slika 4.61 Toplinsko opterećenje izvana; unutarnja temperatura konstantna

Potrebno je odrediti periodički koeficijent prolaska topline, Y_{21} . Prema jednadžbi (4.239) je

$$Y_{21} = \frac{q_{2,\text{amp}}}{\theta_{1,\text{amp}}} = \frac{1}{Z_{21}}$$

Z_{21} je element matrice $\mathbf{Z}$ prijenosa topline, koja karakterizira građevni dio zgrade.

Faktor prigušenja

Faktor prigušenja (slabljenja), f , omjer je modula periodičkog koeficijenta prolaska topline, $|Y_{mn}|$, i stacionarnog koeficijenta prolaska topline, U :

$$f = \frac{|Y_{mn}|}{U} = \frac{q_{m,\text{amp}}}{(\theta_{n,\text{amp}} \times U)} \quad (4.241)$$

gdje su zone m i n različite.

Za ravne građevne dijelove od paralelnih homogenih slojeva vrijedi:

$$f = \frac{|Y_{12}|}{U} = \frac{1}{(|Z_{12}| \times U)} \quad (4.242)$$

gdje se stacionarni koeficijent prolaska topline U proračuna u skladu s točkom 4.2 zanemarujući toplinske mostove.

Vrijednost faktora prigušenja, f , uvijek je manja od 1.

Plošni toplinski kapacitet

Plošni toplinski kapacitet (eng.: areal heat capacity), κ_m , građevnog dijela zgrade, u $J/(m^2 \times K)$, je toplinski kapacitet građevnog dijela, C_m , podijeljen ploštinom, A , površine građevnog dijela, što prema definicijskoj jednadžbi za toplinski kapacitet (4.211) daje:

$$\kappa_m = \frac{C_m}{A} = \frac{|\frac{L_{mm}}{A} - \frac{L_{mn}}{A}|}{\omega} = \frac{|Y_{mm} - Y_{mn}|}{\omega} \quad (4.243)$$

Definicija plošnog toplinskog kapaciteta ima smisla samo za ravne građevne dijelove od paralelnih slojeva od homogenog materijala.

Pomoću jednadžbe (4.243) izračuna se toplinski kapacitet građevnog dijela, C_m , u J/K:

$$C_m = A \times \kappa_m \quad (4.244)$$

Za građevni dio koji odvaja dvije zone postoje dva toplinska kapaciteta, a njihove vrijednosti ovise o periodu temperaturnih oscilacija. Uvrštavanjem izraza (4.232) i (4.239) u izraz (4.243), dobiju se izrazi za plošne toplinske kapacitete:

$$\kappa_1 = \left(\frac{T}{2\pi} \right) \times \left| \frac{(Z_{11} - 1)}{Z_{12}} \right| \quad (4.245)$$

$$\kappa_2 = \left(\frac{T}{2\pi} \right) \times \left| \frac{(Z_{22} - 1)}{Z_{12}} \right| \quad (4.246)$$

Jednadžbe (4.245) i (4.246) odnose se na vanjske i unutarnje građevne dijelove zgrade.

Toplinski kapaciteti predstavljaju sposobnost građevnog dijela zgrade da pohrani toplinu s bilo koje strane građevnog dijela kad se odgovarajuća temperatura periodički mijenja. Dok prijenos topline kroz građevni dio zgrade u stacionarnom režimu ne ovisi o redosljedu slojeva, dinamičke toplinske karakteristike bitno ovise o tom redosljedu. Dvoslojni vanjski zid s masivnim slojem iznutra i toplinsko izolacijskim slojem izvana ima mnogo veći faktor prigušenja i unutarnji toplinski kapacitet nego kad se toplinsko izolacijski sloj nalazi s unutarnje strane.

Građevni dio zgrade koji ima toplinski kapacitet C_1 na jednoj strani pohraniti će na toj strani količinu topline jednaku:

$$Q = 2 \times C_1 \times |\theta_{1,amp}| \quad (4.247)$$

Ova akumulirana količina topline Q rezultat je periodičke promjene temperature na strani 1 od $-|\theta_{1,amp}|$ do $+|\theta_{1,amp}|$ tijekom poluperioda. Isto se odnosi i na stranu 2.

Primjer 4.21

Hladna komora, izgrađena kao slobodno stojeća zgrada na otvorenom prostoru, sastoji se od dva tipa građevnih dijelova: vanjskih zidova i krova. Prosječna dnevna snaga za hlađenje, $\phi_{i,sr}$, zahtijevana za održavanje stalne unutarnje temperature, θ_i , ako je prosječna dnevna vanjska temperatura, $\theta_{e,sr}$, iznosi:

$$\phi_{i,sr} = (A_w \times U_w + A_r \times U_r) \times (\theta_{e,sr} - \theta_i) \quad (4.248)$$

gdje je:

A_r ploština krova, u m^2 ,
 U_r stacionarni koeficijent prolaska topline krova, u $W/(m^2 \times K)$,
 A_w ploština zidova, u m^2 ,
 U_w stacionarni koeficijent prolaska topline zidova, u $W/(m^2 \times K)$,

Negativna snaga za hlađenje znači snagu za grijanje.

Za održavanje konstantne unutarnje temperature potrebna je dodatna snaga zbog dnevne promjene vanjske temperature. Ako se pretpostavi sinusna promjena s amplitudom $\theta_{e,amp}$, dodatna amplituda snage iznositi će:

$$\phi_{i,amp} = A_w \times Y_{12,w} + A_r \times Y_{12,r} \times \theta_{e,amp} \quad (4.249)$$

Ovdje je Y_{12} proračunat za period od 24 sata s unutarnjim slojem kao prvim. Ukupna potrebna vršna snaga, Φ_p , iznositi će:

$$\phi_p = \phi_{i,sr} + \phi_{i,amp} \quad (4.250)$$

Primjer 4.22

Proračunati elemente matrice prijenosa topline Z i dinamičke toplinske karakteristike vanjskog zida od armiranog betona s toplinsko-izolacijskim slojem od ekspaniranog polistirena s vanjske strane. Točan sastav zida i svojstva pojedinih materijala dani su u tablici 4.37.

Tablica 4.37 Sastav i toplinske karakteristike vanjskog zida zgrade

Broj sloja	Materijal sloja	d m	Λ (W/(m×K))	ρ kg/m ³	C J/(kg×K)
	Unutarnji prijelaz topline				
1	Armirani beton	0,20	2,600	2500	1000
2	Ekspanirani polistiren	0,10	0,040	30	1450
3	Armirana žbuka	0,004	0,700	1100	1000
	Vanjski prijelaz topline				

Numeriranje slojeva vanjskog zida provedeno je gledajući iz prostora zgrade prema vanjskom prostoru.

Za svaki sloj vanjskog zida odrediti će se periodička dubina prodiranja, δ , zatim parametar $\xi = d/\delta$ i potom matrica prijenosa topline sloja, Z .

Sloj 1

$$\delta_1 = [(\lambda \times T) / (\pi \times \rho \times c)]^{0,5} = [(2,60 \times 86400)] / (\pi \times 2500 \times 1000)]^{0,5} = 0,169 \text{ m}$$

$$\xi_1 = d_1 / \delta_1 = 0,20 / 0,169 = 1,183$$

Prema jednadžbama (4.61), elementi Z_{ij} matrice prijenosa topline prvog sloja, Z_1 , su:

$$Z_{11} = 0,6755 + 1,3682j$$

$$Z_{12} = -0,0719 - 0,0355j$$

$$Z_{21} = 16,7930 - 33,9971j$$

$$Z_{22} = 0,6755 + 1,3682j$$

Sloj 2

$$\delta_2 = [(\lambda \times T) / (\pi \times \rho \times c)]^{0,5} = [(0,040 \times 86400)] / (\pi \times 30 \times 1450)]^{0,5} = 0,159 \text{ m}$$

$$\xi_2 = d_2 / \delta_2 = 0,10 / 0,159 = 0,629$$

Prema jednadžbama (4.61), elementi Z_{ij} matrice prijenosa topline drugog sloja, Z_2 , su:

$$Z_{11} = 0,9740 + 0,3947j$$

$$Z_{12} = -2,4869 - 0,3292j$$

$$Z_{21} = 0,0416 - 0,3146j$$

$$Z_{22} = 0,9740 + 0,3947j$$

Sloj 3

$$\delta_3 = [(\lambda \times T) / (\pi \times \rho \times c)]^{0,5} = [(0,70 \times 86400)] / (\pi \times 1100 \times 1000)]^{0,5} = 0,132 \text{ m}$$

$$\xi_3 = d_3 / \delta_3 = 0,004 / 0,132 = 0,030$$

Prema jednađbama (4.61), elementi Z_{ij} matrice prijenosa topline trećeg sloja, Z_3 , su:

$$Z_{11} = 0,9999 + 0,0009j$$

$$Z_{12} = -0,0057 - 0,0000j$$

$$Z_{21} = 0,0001 - 0,3195j$$

$$Z_{22} = 0,9999 + 0,0009j$$

Elementi Z_{ij} matrice prijenosa topline zida od jedne do druge njegove površine, $Z = Z_3 Z_2 Z_1$, su

$$Z_{11} = -53,0785 + 80,7174j$$

$$Z_{12} = -1,2828 - 3,6980j$$

$$Z_{21} = 56,0062 - 9,7209j$$

$$Z_{22} = -1,0761 + 2,0307j$$

Uzimajući u obzir otpore prijelaza topline, $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2 \times \text{K/W}$ i $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2 \times \text{K/W}$, elementi Z_{ij} matrice prijenosa topline vanjskog zida iz okoliša u okoliš tj. iz prostora zgrade prema vanjskom prostoru, $Z_{ee} = Z_{s2} Z Z_{s1}$, su:

$$Z_{11} = -55,3189 + 80,3286j$$

$$Z_{12} = 5,9517 - 14,2230j$$

$$Z_{21} = 56,0062 - 9,7209j$$

$$Z_{22} = -8,3569 + 3,2944j$$

Vrijednosti modula i vremenskih pomaka za elemente Z_{ij} matrice prijenosa topline vanjskog zida iz okoliša u okoliš, Z_{ee} , dani su u tablici 4.38 a dinamičke toplinske karakteristike zida u tablici 4.39.

Tablica 4.38 Moduli i vremenski pomaci elemenata matrice prijenosa topline, Z_{ee}

Element matrice prijenosa	Modul	Vremenski pomak (sati)
Z_{11}	97,53	8,30
Z_{12}	15,42 $\text{m}^2 \times \text{K/W}$	19,51
Z_{21}	56,84 $\text{W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$	-0,66
Z_{22}	8,98	-1,43

Tablica 4.39 Dinamičke toplinske karakteristike vanjskog zida

Svojstvo	Modul	Vremenski pomak (sati)
Unutarnje upijanje topline, Y_{11}	6,33 $\text{W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$	0,79
Periodički koeficijent prolaska topline, Y_{12}	0,065 $\text{W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$	10,49
Unutarnji plošni toplinski kapacitet, κ_1	87,5 $\text{kJ}/(\text{m}^2 \times \text{K})$	-
Statički koeficijent prolaska topline, U	0,363 $\text{W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$	-
Faktor prigušenja, f	0,179	.

5 IZMJENA ZRAKA U PROSTORU ZGRADE

5.1 Uvod

Projektnim rješenjem zgrade potrebno je osigurati i odgovarajuću razinu kvalitete unutarnjeg zraka radi sigurnog, zdravog i ugodnog boravka ljudi u prostoru zgrade. **Kvaliteta zraka** je svojstvo zraka kojim se iskazuje značajnost u njemu postojećih razina onečišćenosti. Kad se govori o kvaliteti zraka misli se, dakle, ponajprije na sastav zraka, odnosno na postojanje raznih tvari koje onečišćuju zrak i mogu narušiti ljudsko zdravlje i kvalitetu življenja. Kvaliteta unutarnjeg zraka smije se stoga izraziti kao mjera do koje su zadovoljeni ljudski zahtjevi. Zahtjevi korisnika zgrade u pogledu kvalitete unutarnjeg zraka su da rizik za zdravlje kod disanja bude neznatan te da se zrak više osjeća kao svjež i ugodan, a manje kao ustajao, zagušljiv i nadražljiv.

Onečišćujuće tvari u zraku, u bilo kojem obliku, uzrokuju brojne neželjene učinke na čovjeka. Ako se zna da čovjek dnevno udiše oko 16 kg zraka i da je disanje najčešći oblik unošenja štetnih tvari u organizam čovjeka onda iz tih činjenica proizlazi veliki značaj održavanja odgovarajuće kvalitete unutarnjeg zraka.

Ugodan unutarnji zrak s malim rizikom po zdravlje korisnika zgrade postiže se smanjenjem izvora onečišćenja i dovoljnom izmjenom zraka u prostoru zgrade.

Da bi se osigurao dovod potrebne količine svježeg vanjskog zraka u prostor zgrade i odvođenje onečišćenog zraka, koristi se odgovarajući sustav ventilacije. Ventilacija znači zamjenu onečišćenog (istrošenog) zraka u prostoru zgrade s vanjskim svježim zrakom. Cilj ventilacije je održati u prostoru zgrade iste sastavne dijelove prirodnog zraka i u istim međusobnim odnosima. Ventilacijom se, dakle, mora istrošen (loš) zrak osiromašen kisikom i obogaćen ugljikovim dioksidom zamijeniti sa svježim zrakom za disanje. S druge strane moraju se ukloniti iz prostora zgrade neugodni mirisi, dim od pušenja, razne štetne tvari oslobođene iz građevnih materijala zgrade i namještaja te vodena para koju disanjem i raznim aktivnostima unosimo u unutarnji zrak, a koja može biti uzrokom raznih oštećenja tijela zgrade i razvoja štetnih mikroorganizama.

Zamjena kondicioniranog zraka iz prostora zgrade s vanjskim zrakom znači međutim i dodatnu potrošnju toplinske energije. Uneseni vanjski zrak mora se zagrijati ili ohladiti kako bi se doveo na ugodnu temperaturu unutarnjeg zraka. Veliki protok zraka za ventilaciju ima za posljedicu povećanu potrošnju toplinske energije, ali i smanjenje toplinske ugodnosti i osjećaj propuha. Potrebno je stoga protok zraka za ventilaciju u zgradama smanjiti na neophodnu mjeru kako bi se postigla prihvatljiva ravnoteža između higijenske izmjene zraka i ventilacijskih toplinskih gubitaka. Trajna i kontrolirana ventilacija treba osigurati, dakle, ne samo ugodan i zdrav okoliš u prostoru zgrade već i racionalno korištenje energije za grijanje i / ili hlađenje prostora.

5.2 Kvaliteta unutarnjeg zraka

5.2.1 Sastav zraka

Zrak je smjesa plinova od kojih se sastoji Zemljina atmosfera. Udio pojedinih plinova u čistom suhom zraku dan je u tablici 5.1.

Tablica 5.1 Sastav prirodnog, suhog, čistog zraka (prema [18])

Plin	Simbol	Maseni udio, %	Obujamski udio, %
Dušik	N ₂	75,01	78,09
Kisik	O ₂	23,01	20,95

Helij	He	7×10^{-5}	$4,6 \times 10^{-4}$
Neon	Ne	$1,2 \times 10^{-3}$	$1,61 \times 10^{-3}$
Argon	Ar	1,29	0,933
Kripton	Kr	3×10^{-4}	1×10^{-4}
Ksenon	Xe	8×10^{-6}	4×10^{-5}
Ugljikov dioksid	CO ₂	4×10^{-2}	$3,3 \times 10^{-2}$
Vodik	H ₂	4×10^{-6}	5×10^{-5}

Zrak u prostoru zgrade nikada nije u potpunosti čist. Postoje tisuće različitih tvari koje mogu onečistiti zrak. Pod onečišćujućim tvarima podrazumijevaju se tvari u zraku koje mogu imati štetan učinak na ljudsko zdravlje i ugodnost boravka u zgradi.

Zrak nikad nije ni potpuno suh već uvijek u sebi sadrži veću ili manju količinu vlage. Vlažnost unutarnjeg zraka može neposredno i posredno utjecati na korisnike zgrade. Većina nepovoljnih utjecaja na ljude i građevinske štete u zgradama povezani su s vlažnošću (kondenzacija, razvoj mikroorganizama). Velika vlažnost zraka može poticati rast raznih plijesni i gljivica, koje mogu uzrokovati alergiju i osjećaj smrada. Povećana vlažnost također može pojačati emisiju pojedinih kemikalija kao što je formaldehid iz građevnih materijala i namještaja. Mala vlažnost može pak kod nekih korisnika zgrade uzrokovati osjećaj suhe i nadražene kože i sluznica.

Onečišćujuće tvari u zraku mogu biti u čvrstom, tekućem ili plinovitom agregatnom stanju. Kvantitativni sastav zraka, uključivo onečišćujuće tvari, može se izraziti ili koncentracijom ili udjelom pojedinog sastojka u zraku.

Koncentracija je fizikalna veličina koja karakterizira sastav smjese u odnosu na njen obujam.

Masena koncentracija nekog sastojka zraka jednaka je omjeru mase tog sastojka i obujma zraka, dakle:

$$\text{Masena koncentracija} = \frac{\text{Masa sastojka u zraku}}{\text{Obujam zraka}} \quad (5.1)$$

SI jedinica za masenu koncentraciju je kilogram po kubnom metru, oznaka kg/m³, odnosno odgovarajuća decimalna jedinica (mg/m³, µg/m³, ng/m³).

Obujamska koncentracija nekog sastojka u zraku jednaka je omjeru obujma tog sastojka i obujma zraka, dakle:

$$\text{Obujamska koncentracija} = \frac{\text{Obujam sastojka u zraku}}{\text{Obujam zraka}} \quad (5.2)$$

Maseni udio nekog sastojka u zraku je omjer mase tog sastojka i zbroja masa svih sastojaka zraka, dakle:

$$\text{Maseni udio} = \frac{\text{Masa sastojka u zraku}}{\text{Zbroj masa svih sastojaka zraka}} \quad (5.3)$$

Obujamski udio nekog sastojka u zraku je omjer obujma tog sastojka i zbroja obujama svih sastojaka zraka, dakle:

$$\text{Obujamski udio} = \frac{\text{Obujam sastojka u zraku}}{\text{Zbroj obujama svih sastojaka zraka}} \quad (5.4)$$

Obujamska koncentracija, maseni udio i obujamski udio su brojčane, bezdimenzijske veličine i iskazuju se decimalnim brojem ili kao postotak ($\% = 1/100 = 10^{-2}$), promil ($\text{‰} = 1/1\,000 = 10^{-3}$) ili dio na milijun ($\text{ppm} = 1/1\,000\,000 = 10^{-6}$ – parts per milion). ppm nije, dakle, mjerna jedinica već ona zrači „podijeljeno s milijun“, a jednaka je množenju s 10^{-6} .

5.2.2 Izvori onečišćenja zraka

5.2.2.1 Općenito

Pod izvorima onečišćenja zraka podrazumijevaju se proizvodi i procesi koji emitiraju onečišćujuće tvari u atmosferu. Lista izvora onečišćenja zraka u zgradi je vrlo dugačka. Tu se nalaze u prvom redu sami korisnici zgrade i njihove aktivnosti, zatim građevni materijali završnih radova, namještaj, tepisi, razna kemijska sredstva koja se koriste u kućanstvu, te sam sustav ventilacije i klimatizacije zraka. Svi ovi izvori u manjoj ili većoj mjeri doprinose onečišćenju zraka.

Od štetnih plinova u unutarnjem zraku zgrade susreću se ugljikov dioksid, ugljikov monoksid, sumporni dioksid, dušikovi oksidi, ozon, radon, formaldehidi, ugljikovodici,... Tu su zatim čestice teških metala, prašina anorganskih materijala te prašina ili vlakna organskih materijala. U tvari živog porijekla koje onečišćuju zrak ubrajaju se virusi, bakterije, gljivice,... Razni mirisi također imaju veliki utjecaj na kvalitetu zraka. Oni nastaju kao produkt razgradnje organskih tvari. Veliki izvor neugodnih mirisa je i sam čovjek sa svojim biološkim lučenjima.

Navedena onečišćenja unutarnjeg zraka mogu se izraziti kao kemijsko onečišćenje ili kao osjetilno onečišćenje unutarnjeg zraka.

5.2.2.2 Kemijsko onečišćenje zraka

Kemijsko se onečišćenje zraka može izraziti kao emisija pojedinih kemikalija iz izvora onečišćenja. Jakost izvora za neku onečišćujuću tvar je brzina njenog emitiranja u $\mu\text{g/s}$ ili $\mu\text{g}/(\text{s} \times \text{m}^2)$. Kemijsko onečišćenje unutarnjeg zraka u zgradi pojedinom kemikalijom može se tada procijeniti zbrajanjem jakosti pojedinih izvora. Nažalost obično ne raspolažemo s dovoljno podataka o brzini emitiranja pojedinih kemikalija iz mnogih materijala koje koristimo u praksi. Osim toga bilo bi vrlo nepraktično iznalaziti jakost izvora za svaku od stotina ili tisuća kemikalija koje se pojavljuju u unutarnjem zraku. Samo u slučajevima kada se sumnja da su neke kemikalije važan izvor onečišćenja zbog njihova toksičkog potencijala potrebno je procijeniti onečišćenje prostora tom kemikalijom.

U trećem i četvrtom stupcu tablici 5.2 navedeno je kemijsko onečišćenje zraka koje uzrokuju pušači i nepušači, izraženo pomoću ugljikova monoksida i ugljikova dioksida.

Tablica 5.2 Onečišćenje unutarnjeg zraka uzrokovano prisutnim osobama (prema HRN CR 1752 [84])

	Osjetilno onečišćenje olf/osoba	Ugljikov dioksid $\text{l}/(\text{h} \times \text{osoba})$	Ugljikov monoksid ^{b)} $\text{l}/(\text{h} \times \text{osoba})$	Vodena para ^{c)} $\text{g}/(\text{h} \times \text{osoba})$
Sjedeći, 1 – 1,2 met^{a)}				
0 % pušača	1	19		50
20 % pušača^{d)}	2	19	11×10^{-3}	50
40 % pušača^{d)}	3	19	21×10^{-3}	50

Fizička aktivnost				
niske razine, 3 met	4	50		200
srednje razine, 6 met	10	100		430
visoke razine, sportaši, 10 met	20	170		750
Djeca				
dječji vrtić, 3-6 godina, 2,7 met	1,2	18		90
škola, 14-16 godina, 1 – 1,2 met	1,3	19		50
a) met je metabolička jedinica. 1 met = 58,2 W/m² ploštine osobe. Ploština površine prosječne osobe je 1,8 m². 1 met je metabolički učinak osobe koja mirno sjedi (oslobađa ≈100 W). Količina oslobođene topline mijenja se s aktivnošću osobe. b) od duhanskog dima c) primjenjuje se na osobe blizu toplinske neutralnosti (toplina oslobođena metabolizmom jednaka toplinskim gubicima) d) prosječna brzina pušenja 1,2 cigarete na sat po pušaču, emisija CO je 44 ml_{CO} / cigareti				

5.2.2.3 Osjetilno onečišćenje zraka

Osjetilno onečišćenje zraka uzrokovano je onim izvorima onečišćenja zraka koja imaju utjecaj na osjetilnu kvalitetu zraka. Osjetilno onečišćenje zraka sadrži i učinak mnogih kemikalija kako ga osjete ljudska bića.

Ljudi osjećaju zrak osjetom mirisa koji se nalazi u nosu i općim osjetom preko čitave sluznice u nosu i očima, koje su osjetljive na veliki broj onečišćujućih tvari u zraku. Kombinacija ovih dvaju osjeta određuje osjećamo li zrak kao svjež i ugodan ili kao ustajao, zagušljiv i nadražljiv.

Mjerna jedinica za osjetilno onečišćenje zraka je **olf** (od latinskog olfactus = osjet mirisa). Jedan olf je osjetilno onečišćenje zraka koje proizvodi standardni čovjek (odrasla osoba sa standardnom higijenom od 0,7 kupanja po danu) pri aktivnostima u sjedećem položaju (npr. pri čitanju ili pisanju) u toplinskoj neutralnosti. Svako drugo onečišćenje zraka može se izraziti preko odgovarajućeg broja standardnih osoba (olfova) potrebnih da zrak učine toliko neugodnim kao stvarni izvor onečišćenja. Osjetilno opterećenje zraka onečišćujućom tvari može se izraziti i kao olf/m².

U drugom stupcu tablici 5.2 navedena su osjetilna onečišćenja zraka od strane odraslih korisnika zgrade pri različitim aktivnostima, kad su svi korisnici nepušači i za različite postotke pušača među korisnicima. U istoj tablici prikazana su i osjetilna onečišćenja koja proizvode djeca. U stupcu 5 dani su podaci o proizvodnji vodene pare od strane osoba blizu toplinske neutralnosti.

Za primjenu tablice 5.2 treba koristiti predviđenu gustoću zauzetosti prostora po m² ploštine poda iz tablice 5.3. Pomoću gustoće zauzetosti može se proračunati ukupno opterećenje zraka osjetilnim onečišćenjem.

Tablica 5.3 Primjeri zauzetosti prostora (prema HRN CR 1752 [84])

	Osoba/(m ² poda)
Uredi	0,07
Sobe za sastanke	0,5
Dvorane za sastanke, kazališta, predavaonice	1,5
Škole (učionice)	0,5
Dječji vrtići	0,5

Tablica 5.4 sadrži podatke mjerenja osjetilne onečišćenosti zraka uzrokovane građevnim materijalima zgrade, namještajem, tepisima i sustavom ventilacije. Podaci se odnose na zgrade različitih namjena, a mjerenja su provedena na više od 40 mehanički ventiliranih zgrada u Danskoj.

Tablica 5.4 Onečišćenje zraka uzrokovano tijelom zgrade, namještajem, tepisima i sustavom ventilacije (prema HRN CR 1752 [84])

	Osjetilno onečišćenje zraka olf / (m ² poda)	
	Srednje	Raspon
Postojeće zgrade		
Uredi	0,3 ^{a)}	0,02 – 0,95
Škole (učionice)	0,3	0,12 – 0,54
Dječji vrtići	0,4	0,20 – 0,74
Dvorane za sastanke	0,3 ^{a)}	0,13 – 1,32
Nove zgrade (bez duhanskog dima)		
Zgrade s malim onečišćenjem	0,1	
Zgrade koje ne spadaju u grupu zgrada s malim onečišćenjem	0,2	

^{a)} Uključuje onečišćenje ranijim duhanskim dimom

5.2.3 Zdravstveni aspekti kvalitete unutarnjeg zraka

Izloženost kemijski onečišćenom zraku nosi u sebi određene rizike po zdravlje ljudi. Pod razinom onečišćenosti podrazumijeva se koncentracija onečišćujuće tvari u zraku. Štetni učinci za zdravlje mogu nastati kod visokih koncentracija ili kod dugotrajne izloženosti nižim koncentracijama onečišćujuće tvari. Oni mogu biti kratkoročni ili dugoročni. Da bi rizike po zdravlje ljudi ograničili na niskoj razini, za određeni broj kemijskih onečišćujućih tvari utvrđene su najviše dopuštene koncentracije (granične vrijednosti) i odgovarajuća dopuštena vremena izloženosti. Granična vrijednost (GV) je razina onečišćenosti ispod koje, na temelju znanstvenih spoznaja, ne postoji ili je vrlo mali rizik od štetnih učinaka na ljudsko zdravlje i koja se ne smije prekoračiti. Granične vrijednosti služe za vrednovanje značajnosti razina onečišćujućih tvari u zraku i osnova su za ocjenu kemijske kvalitete zraka. U tablici 5.5 navedene su , kao primjer, granične i tolerantne vrijednosti koncentracije nekih kemijskih

onečišćujućih tvari u zraku s obzirom na zdravlje ljudi. Tolerantna vrijednost je granična vrijednost uvećana za granicu tolerancije tj. za postotak granične vrijednosti za koji ona smije biti prekoračena pod određenim uvjetima.

Tablica 5.5 Granične i tolerantne vrijednosti koncentracija onečišćujućih tvari u zraku s obzirom na zdravlje ljudi (prema Uredbi br. 2467 [85])

Onečišćujuća tvar	Vrijeme usrednjavanja	Razina granične vrijednosti (GV)	Učestalost dozvoljenih prekoračenja	Razina tolerantne vrijednosti (TV)
SO₂	1 sat	350 µg/m ³	GV ne smije biti prekoračena više od 24 puta tijekom godine	500 µg/m ³
	24 sata	125 µg/m ³	GV ne smije biti prekoračena više od 3 puta tijekom godine	-
	1 godina	50 µg/m ³	-	-
NO₂	1 sat	200 µg/m ³	GV ne smije biti prekoračena više od 18 puta tijekom godine	300 µg/m ³
	24 sata	80 µg/m ³	GV ne smije biti prekoračena više od 7 puta tijekom godine	-
	1 godina	40 µg/m ³	60 µg/m ³	-
Amonijak	24 sata	100 µg/m ³	GV ne smije biti prekoračena više od 7 puta tijekom godine	-
	1 godina	30 µg/m ³	-	-
Fenoli	24 sata	100 µg/m ³	GV ne smije biti prekoračena više od 7 puta tijekom godine	-
	1 godina	50 µg/m ³	-	-
Klorovodik	24 sata	200 µg/m ³	GV ne smije biti prekoračena više od 7 puta tijekom godine	-
	1 godina	100 µg/m ³	-	-
CO	najveća dnevna osmosatna srednja vrijednost	10 mg/m ³	-	16 mg/m ³

5.2.4 Osjetilna kvaliteta zraka

5.2.4.1 Mjerna jedinica za osjetilnu kvalitetu zraka

Osjetilna kvaliteta zraka smije se izraziti kao postotak nezadovoljnih, PPD (eng. Predicted Percentage of Dissatisfied), tj. % osoba za koje se predviđa da će zrak osjetiti kao neprihvatljiv odmah nakon ulaska u prostoriju. Bitna je početna prosudba osobe kad ulazi u prostor zgrade (prvi dojam). Za vrijeme boravka u prostoriji dolazi u određenoj mjeri do prilagođavanja na neke onečišćujuće tvari u zraku. Ako je malo nezadovoljnih kvaliteta je zraka visoka. Ako je mnogo nezadovoljnih kvaliteta je niska.

Mjerna jedinica za osjetilnu kvalitetu zraka je **decipol** (oznaka dp; „pol“ od latinskog poluttio = onečišćenje). Jedan decipol opisuje osjetilnu kvalitetu zraka koja se osjeća pri ulasku u neku prostoriju s osjetilnim onečišćenjem 1 olf, kad se prostorija ventilira s 10 l/s čistog zraka, dakle

$$1 \text{ dp} = \frac{1 \text{ olf}}{(10 \text{ l/s})} = \frac{0,1 \text{ olf}}{(1/\text{s})} \quad (5.5)$$

Primjer 5.1

S površine građevnih materijala i namještaja u prostoriji nastaje opterećenje zraka onečišćujućim tvarima od 6 olf-a, a prisutne osobe same proizvode onečišćenje od 1 olf. Ventilacijom se u prostoriju dovodi „čisti“ zrak u količini 20 l/s. Osjetilna kvaliteta zraka koja se osjeća u prostoriji iznosi

$$\frac{7 \text{ olf}}{(20 \text{ l/s})} = \frac{0,35 \text{ olf}}{(1/\text{s})} = 0,35 \times 10 \text{ dp} = 3,5 \text{ dp}$$

Za određivanje osjetilne kvalitete zraka u decipolima danas još ne postoji mjerni uređaj. Za to se mogu koristiti samo čovjekov osjet mirisa i osjetljivost sluznica nosa i očiju. U praksi se u tu svrhu primjenjuju dva postupka. Kod prvog postupka grupa prosječnih nepristranih osoba ocjenjuje u kojoj je mjeri kvaliteta zraka u prostoriji prihvatljiva ili nije prihvatljiva. Iz % nezadovoljnih osoba daje se izračunati kvaliteta zraka u decipolima. Kod drugog postupka grupa treniranih „kušača“ direktno procjenjuje kvalitetu zraka u decipolima, uspoređujući mirise i nadražaje koje osjeća u ispitivanom zraku, s točno određenom referentnom vrijednosti (acetone).

5.2.4.2 Kategorije osjetilne kvalitete unutarnjeg zraka

U normama HRN EN 15251:2008 [86] i HRN CR 1752:2004 [84] definirane su kategorije kvalitete unutarnjeg zraka prema razinama osjetilne onečišćenosti zraka, navedene u tablici 5.6. U istoj tablici dan je i opis preporučenih primjenjivosti pojedinih kategorija. Kategorija I odgovara visokoj razini očekivanja, kategorija II srednjoj razini, a kategorija III najmanjoj razini očekivanja. U nekim normama i stručnoj literaturi ove kategorije se nazivaju A, B, C ili 1, 2, 3 ili sl. Navedene kategorije utvrđene su za ljude kao korisnike zgrada. Mogu se primjenjivati za stambene zgrade i nestambene zgrade javne namijene. One nisu primjenjive za nestambene zgrade gospodarske namijene u kojima se obavljaju razni industrijski procesi ili slične aktivnosti koje zahtijevaju posebne uvjete.

Tablica 5.6 Kategorije osjetilne kvalitete unutarnjeg zraka s opisom njihove primjenjivosti (prema HRN EN 15251:2008 [86] i HRN CR 1752:2004 [84])

Kategorija	Osjetilna kvaliteta zraka		Opis primjenjivosti kategorije
	nezadovoljnih [%]	dp	
I	15	1,0	Visoka razina očekivanja. Preporuča se za prostore koje koriste vrlo osjetljive i neotporne osobe s posebnim zahtjevima kao što su invalidi, bolesni, vrlo mala djeca i starije osobe

II	20	1,4	Normalna razina očekivanja. Preporuča se za nove zgrade i rekonstrukciju postojećih.
III	30	2,5	Prihvatljiva, umjerena razina očekivanja. Može se koristiti za postojeće zgrade.
IV	> 30	> 2,5	Vrijednosti izvan gornjih kategorija. Ovu se kategoriju može prihvatiti samo za ograničeni dio godine.

Važno je naglasiti da neke štetne onečišćujuće tvari u zraku čovjek uopće ne osjeća (npr. CO), a osjetilni učinci nekih drugih onečišćujućih tvari nisu kvantitativno povezani s njihovom otrovnošću. Zato osjetilna kvaliteta zraka nije univerzalna mjera štetnih učinaka na čovjekovo zdravlje.

5.2.4.3 Ugljikov dioksid kao pokazatelj ljudskih bioloških izlučina

Ljudi proizvode ugljikov dioksid (CO₂) razmjerno svojoj fizičkoj aktivnosti. U smislu količine to je najvažnija čovjekova biološka izlučina. CO₂ je bezbojan, negoriv plin, bez mirisa. U malim koncentracijama, koje se tipično pojavljuju u prostoriji, CO₂ nije škodljiv i ljudi ga ne osjećaju. Ipak je on dobar pokazatelj koncentracije drugih ljudskih bioloških lučenja koja se osjećaju kao neugodnost. U zgradama s mnogo korisnika (predavaonice, konferencijske dvorane,...) nadziranje CO₂ dobro služi za kontrolu potrebne opskrbe vanjskim zrakom.

Koncentracija CO₂ u vanjskom zraku iznosi približno 330 ppm (0,033 % obujamskog udjela). Preporuča se da sadržaj CO₂ u zraku prostorije ne prekorači 1 000 ppm, a nikako 1 500 ppm. Više ugljikova dioksida u zraku znači manji sadržaj kisika. CO₂ u obujamskoj koncentraciji od 1 % izaziva ubrzano disanje, a pri 5 % izaziva glavobolju, ošamućenost i umor. Pri koncentraciji od 10 % može izazvati i smrt gušenjem.

U tablici 5.7 dane su vrijednosti koncentracije CO₂ iznad razine koncentracije u vanjskom zraku, koje odgovaraju trima kategorijama kvalitete unutarnjeg zraka i koje se (prema HRN EN 15251 [86]) preporučuju za proračun energije. Mjerenjem sadržaja CO₂ u unutarnjem zraku može se, dakle, procijeniti osjetilna kvaliteta zraka.

Tablica 5.7 Razredba kvalitete unutarnjeg zraka na osnovi razine CO₂. Navedene su vrijednosti preporučenih koncentracija CO₂ iznad koncentracije u vanjskom zraku za proračune energije i automatsku regulaciju protoka zraka (prema HRN EN 15251 [86])

Kategorija	Koncentracija CO ₂ , ppm
I	350
II	500
III	800
IV	> 800

Primjer 5.2

Jedna osoba u radu u birou proizvede 18 litara CO₂ na sat. Da bi se zadržala koncentracija CO₂ ispod 1 400 ppm, znajući da je vanjska koncentracija 400 ppm, potreban je protok zraka od

$$\text{Protok vanjskog zraka} = \frac{18 \text{ l/h}}{(1\,400 - 400) \cdot 10^{-6}} = 18\,000 \text{ l/h ili } 18 \text{ m}^3/\text{h}$$

5.2.4.4 Vlažnost zraka

Vlažnost unutarnjeg zraka ima samo mali učinak na osjet topline i opažanje kvalitete zraka u prostorijama sa sjedećim korisnicima, iako će dugotrajna unutarnja vlažnost prouzročiti porast mikroba, a vrlo mala vlažnost (< 15–20 %) prouzročit će suhoću i nadražaj očiju. Osjet presuhog zraka obično je posljedica prašine ili drugih onečišćujućih tvari u zraku, te suviše visoke temperature zraka (> 23 °C), a manje je posljedica niske relativne vlažnosti zraka. Najmanje problema s vlagom javlja se kad je relativna vlažnost zraka između 30 % i 70 %, uz uvjet da ne dolazi do kondenzacije vodene pare na površini i unutar građevnih dijelova zgrade. Osim toga preporuča se apsolutnu vlažnost unutarnjeg zraka ograničiti na 12 g/kg.

Zahtjevi za vlažnošću unutarnjeg zraka utječu na projektiranje sustava za odvlaživanje i sustava za ovlaživanje i to utječe na potrošnju energije. Kriteriji djelomično zavise o zahtjevima za toplinskom ugodnošću i kvalitetom unutarnjeg zraka, a djelomično o fizikalnim zahtjevima koji se odnose na tijelo zgrade (kondenzacija, razvoj plijesni itd.). Za posebne zgrade (muzeje, povijesne zgrade, crkve) u obzir se moraju uzeti dodatni zahtjevi s obzirom na vlažnost. S medicinskog gledišta, za uobičajene uvjete u stambenim i nestambenim zgradama javne namijene, ne postoji potreba za umjetnim ovlaživanjem zraka.

Ako se rabi ovlaživanje ili odvlaživanje, kao projektne vrijednosti preporučuju se vrijednosti u tablici 5.8. Obično je ovlaživanje ili odvlaživanje potrebno samo u posebnim zgradama poput muzeja, nekih ustanova za zdravstvenu skrb, u papirnoj i tekstilnoj industriji i dr.

Tablica 5.8 Preporučeni projektni kriteriji za vlažnost u korištenim prostorima ako su ugrađeni sustavi za ovlaživanje ili odvlaživanje.

Tip zgrada / prostorija	Kategorija	Projektna relativna vlažnost za odvlaživanje %	Projektna relativna vlažnost za ovlaživanje %
Prostori za koje su kriteriji za vlažnost određeni korištenjem ljudi. Posebni prostori (muzeji, crkve,...) smiju imati druga ograničenja.	I	50	30
	II	60	25
	III	70	20
	IV	> 70	< 20

Nekorištene zgrade ne smiju se ovlaživati (uz neke izuzetke kao npr. za muzeje) ali se smiju odvlaživati kako bi se spriječilo dugoročno oštećenje zbog vlage.

5.2.5 Upravljanje kvalitetom unutarnjeg zraka

Kvalitetom unutarnjeg zraka može se upravljati kombinacijom kontrole izvora onečišćenja i odgovarajućom ventilacijom zgrade. Najprije treba nastojati identificirati i smanjiti prisutnost onečišćujućih tvari u unutarnjem zraku, a zatim ventilacijom smanjiti njihovu koncentraciju u prostoru zgrade.

Unutarnji zrak može biti onečišćen izvorima onečišćenja izvan zgrade ili izvorima unutar zgrade. Projektant zgrade ne može direktno djelovati na izvore izvan zgrade (industrijska proizvodnja, promet, radon iz tla,...) već samo predvidjeti arhitektonska i tehnička rješenja kojima će se ograničiti ulazak onečišćujućih tvari u prostor zgrade (odabir mjesta ulaza zraka, ugradnja uređaja za pročišćavanje vanjskog zraka,...). Što se tiče izvora onečišćenja koji se nalaze unutar zgrade (građevni materijali tijela zgrade, pokućstvo, korisnici,...) projektant može odgovarajućim arhitektonsko-građevinskim i tehničkim rješenjima ograničiti te izvore ili ograničiti njihove učinke.



Slika5.1 Shematski prikaz kontrole sadržaja onečišćujućih tvari u unutarnjem zraku

Projektiranje zgrade s malim onečišćenjem zahtjeva pažljiv izbor građevnih materijala te izbor i održavanje sustava ventilacije / klimatizacije i druge opreme. Smatra se da zgrada emitira malo onečišćenje ili vrlo malo onečišćenje, ako većina građevnih materijala završnih radova zadovoljava kriterije za materijale s malim ili vrlo malim onečišćenjem [84].

Zgrada je **zgrada s malim onečišćenjem** ako je izgrađena od materijala od kojih su većina materijali s malim onečišćenjem tj. materijali kod kojih su ispitivanjem utvrđene slijedeće vrijednosti emisije:

- emisija ukupnih halapljivih organskih sastojaka manja od $0,2 \text{ mg}/(\text{m}^2 \times \text{h})$,
- emisija formaldehida (H_2CO) manja od $0,05 \text{ mg}/(\text{m}^2 \times \text{h})$,
- emisija amonijaka (NH_3) je manja od $0,03 \text{ mg}/(\text{m}^2 \times \text{h})$,
- emisija kancerogenih sastojaka (prema kategoriji 1 razredbe IARC-a) manja od $0,005 \text{ mg}/(\text{m}^2 \times \text{h})$,
- materijal je bez mirisa (broj nezadovoljnih s mirisom manji od 15 %).

Zgrada je **zgrada s vrlo malim onečišćenjem** ako je izgrađena samo od materijala s vrlo malim onečišćenjem, a pušenje u zgradi nije dopušteno. Materijali s vrlo malim onečišćenjem su materijali kod kojih su ispitivanjem utvrđene slijedeće vrijednosti emisije:

- emisija ukupnih halapljivih organskih sastojaka manja od $0,1 \text{ mg}/(\text{m}^2 \times \text{h})$,
- emisija formaldehida (H_2CO) manja od $0,02 \text{ mg}/(\text{m}^2 \times \text{h})$,
- emisija amonijaka (NH_3) je manja od $0,01 \text{ mg}/(\text{m}^2 \times \text{h})$,

- emisija kancerogenih sastojaka (prema kategoriji 1 razredbe IARC-a) manja od 0,002 m/(m²×h),
- materijal je bez mirisa (broj nezadovoljnih s mirisom manji od 10 %).

U grupu materijala s vrlo malim onečišćenjem, bez posebnog ispitivanja, spadaju tradicionalni prirodni materijali kao kamen, metali, staklo, koji su poznati kao sigurni s obzirom na emisiju onečišćujućih tvari.

Nove ili postojeće zgrade kod kojih nije načinjen napor pri odabiru građevnih materijala radi ugrađivanja materijala s malom emisijom onečišćujućih tvari, a aktivnosti povezane s emisijom onečišćujućih tvari nisu zabranjene, zovemo **zgradama kod kojih onečišćenje nije malo**.

Kada su izvori onečišćenja unutarnjeg zraka svedeni na mogući minimum, preostalo onečišćenje u zraku prostorije smanjuje se na još prihvatljivu razinu postupkom ventilacije. Protok zraka za ventilaciju potreban za kontrolu rizika za zdravlje od specifičnih kemijskih onečišćujućih tvari treba se vrednovati odvojeno od protoka za ventilaciju potrebnog za postizanje željene osjetilne kvalitete zraka. Veću od ovih vrijednosti trebalo bi koristiti kao projektnu vrijednost za dimenzioniranje sustava ventilacije. Kod stambenih zgrada i nestambenih zgrada javne namijene obično zadovoljenje zahtjeva ugodnosti određuje potrebni protok zraka za ventilaciju.

Potrebni protok zraka za ventilaciju ovisi o željenoj kvaliteti unutarnjeg zraka (biramo između tri kategorije), o izvorima onečišćenja unutarnjeg zraka, o kvaliteti raspoloživog vanjskog zraka i o učinkovitosti ventilacije.

5.2.6 Kvaliteta vanjskog zraka

U tablici 5.9 dani su primjeri karakterističnih razina osjetilne kvalitete vanjskog zraka i sadržaj nekih onečišćujućih tvari tipičnih za vanjski zrak. U slučaju vrlo loše kvalitete vanjskog zraka, da bi ga se učinilo prikladnim za ventilaciju, potrebno ga je prethodno pročišćavati. U tu svrhu koriste se razne vrste filtara kao dijela opreme ventilacijskog sustava. Moderni filtri zadržavaju krute čestice dimenzija većih već od 0,1 µm. Apsorpcijski filtri koriste se za uklanjanje mirisa iz zraka.

Kod ocjene kvalitete vanjskog zraka bitna je kvaliteta vanjskog zraka na mjestu ulaza zraka u zgradu, pa je stoga važno da mjesto ulaza bude ispravno locirano. Ako onečišćenje vanjskog zraka nije jednoliko oko cijele kuće, ulaz za vanjski zrak treba postaviti na mjestima gdje je vanjski zrak najmanje onečišćen.

Tablica 5.9 Primjeri razina kvalitete vanjskog zraka (prema HRN CR 1752 [84])

	Osjetilna kvaliteta zraka dp	Onečišćujuće tvari u zraku				
		Ugljikov dioksid, CO ₂ mg/m ³	Ugljikov monoksid, CO mg/m ³	Dušikov dioksid, NO ₂ µg/m ³	Sumporni dioksid, SO ₂ µg/m ³	Čestice, PM ₁₀ µg/m ³
Izvršno	0	680	0 – 0,2	2	1	< 30
U gradovima, dobra kvaliteta zraka	< 0,1	700	1 – 2	5 – 20	5 – 20	40 – 70
U gradovima, loša kvaliteta zraka	> 0,5	700 – 800	4 – 6	50 – 80	50 – 100	> 100

Napomena: Nema direktne relacije između osjetilne kvalitete zraka i navedenih onečišćujućih tvari. Vrijednosti za osjetilnu kvalitetu zraka tipične su prosječne dnevne vrijednosti. Vrijednosti za četiri navedene onečišćujuće tvari u zraku prosječne su godišnje koncentracije.

Zrak se smatra „čistim“ ako su ispunjeni zahtjevi nacionalnih propisa za granične vrijednosti onečišćujućih tvari u vanjskom zraku. Može se općenito reći da su koncentracije onečišćujućih tvari „velike“ ako prelaze navedene vrijednosti s faktorom do 1,5. One su „vrlo velike“ ako prelaze navedene zahtjeve s faktorom većim od 1,5. Treba uzeti u obzir mogući utjecaj mješavine onečišćujućih tvari, a ne samo pojedinačne tvari.

Uobičajene plinovite onečišćujuće tvari koje treba uzeti u obzir pri vrednovanju vanjskog zraka kod projektiranja sustava ventilaciji ili klimatizacije prostorije su ugljikov monoksid, ugljikov dioksid, sumporni dioksid, oksidi dušika i ishlapljivi organski spojevi.

Pod česticama u vanjskom zraku smatra se ukupna količina krutih ili tekućih čestica u zraku, od uočljive prašine do mikronskih čestica. Većina propisa za vanjski zrak odnosi se na PM₁₀ (eng.: Particulate Matter) što označava čestice aerodinamičnog oblika do 10 µm.

5.2.7 Zona boravka

Kvaliteta unutarnjeg zraka ne mora biti jednaka na svim mjestima ventilirane prostorije. Za korisnike zgrade važna je kvaliteta zraka u području tzv. zone boravka (područje disanja) tj. područja prostorije u kojem korisnici provedu većinu vremena. Zona boravka je dio ventilirane prostorije omeđen vertikalnim i horizontalnim ravninama paralelnim sa zidovima i stropom. Kriteriji za određivanje zone boravka, preporučeni u HRN EN 13779 [87], dani su u tablici 5.10 i shematski prikazani na slici 5.2.

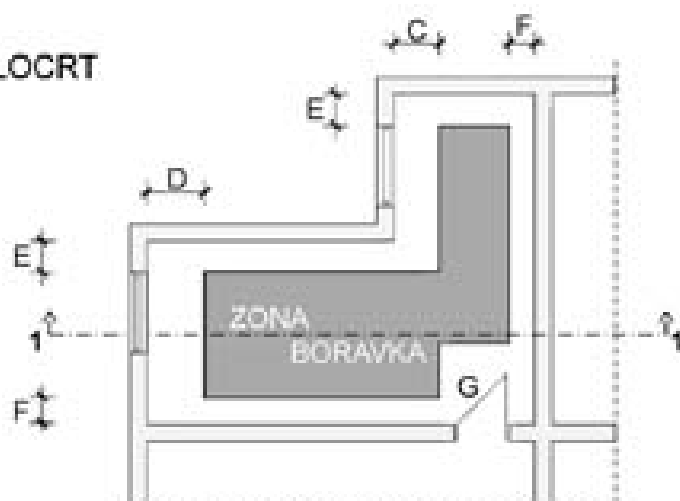
Tablica 5.10 Preporučeni kriteriji za određivanje dimenzija zone boravka (prema HRN EN 13779 [87])

Oznaka	Udaljenost građevnih dijelova zgrade od zone boravka	Preporučene udaljenosti, u m
A	Pod (donja granica)	0,05
B	Pod (gornja granica)	1,80
C	Ispred prozora i vanjskih vrata	1,00
D	Ispred komponenti GVIK sustava	1,00
E	Vanjski zidovi	0,50
F	Unutrašnji zidovi	0,50
G	Unutrašnja vrata, prijelazna područja,...	Po posebnom sporazumu

PRESJEK 1-1



TLOCRT



Slika 5.2 Vertikalni presjek i tlocrt prostorije s označenom zonom boravka

5.2.8 Učinkovitost ventilacije

Nehomogenost kvalitete zraka u prostoriji utječe na zahtjeve koji se odnose na potreban protok zraka za ventilaciju. Taj utjecaj se izražava učinkovitošću ventilacije, ε_v , koja se definira kao odnos između koncentracije onečišćujuće tvari u odsisnom zraku i koncentracije onečišćujuće tvari u području disanja (zone boravka), dakle:

$$\varepsilon_v = \frac{(C_e - C_s)}{(C_i - C_s)} \quad (5.6)$$

gdje je:

- C_e koncentracija onečišćujuće tvari u odsisnom zraku,
- C_i koncentracija onečišćujuće tvari u zraku u području disanja (zone boravka),
- C_s koncentracija onečišćujuće tvari u dobavnom zraku.

Učinkovitost ventilacije ovisi o distribuciji zraka i lokaciji izvora onečišćenja u prostoriji. Ona može imati različite vrijednosti za različite onečišćujuće tvari u zraku. Učinkovitost ventilacije je jedan ($\varepsilon_v = 1$) ako postoji potpuno miješanje zraka i onečišćujuće tvari. Ako je kvaliteta zraka u području disanja bolja nego u odsisnom zraku, učinkovitost ventilacije je veća od jedan ($\varepsilon_v > 1$) i željena kvaliteta zraka u području disanja može se postići manjim protokom zraka. Ako je kvaliteta zraka u području disanja lošija nego u odsisnom zraku, učinkovitost ventilacije je manja od jedan ($\varepsilon_v < 1$) i zahtjeva se veći protok zraka za ventilaciju.

Učinkovitost ventilacije često se naziva i „učinkovitost uklanjanja onečišćenja“.

5.2.9 Potrebni protok zraka za ventilaciju

Protok zraka je fizikalna veličina jednaka omjeru mase ili obujma zraka koji prolazi kroz neku plohu i vremena prolaza. **Maseni protok** obično se iskazuje u kilogramima, a **obujamski protok** u kubnim metrima ili litrama po nekoj vremenskoj jedinici (sekundi, satu,...).

Protok zraka za ventilaciju je količina vanjskog zraka koja u jedinici vremena prođe kroz prostoriju ili zgradu, bilo kroz projektirani sustav ventilacije ili infiltracijom kroz ovojnicu zgrade.

Protok čistog zraka potreban za održavanje koncentracije neke onečišćujuće tvari ispod određene granične vrijednosti može se odrediti iz izraza:

$$\text{Protok vanjskog zraka} = \frac{\text{Emisija izvora onečišćujuće tvari}}{\text{Neto granična koncentracija}} \quad (5.7)$$

Neto granična koncentracija se dobije tako da se najveća koncentracija onečišćujuće tvari koju se želi imati u unutrašnjosti korigira za koncentraciju iste onečišćujuće tvari u ulaznom zraku.

Protok zraka za ventilaciju, potreban za ugodnost i za zdravlje, treba proračunati odvojeno i veću vrijednost upotrijebiti kao projektnu vrijednost.

Protok zraka za ventilaciju, potreban za ugodnost, može se proračunati iz brojčane jednadžbe:

$$Q_c = 10 \cdot \frac{G_c}{C_{c,i} - C_{c,0}} \cdot \frac{1}{\varepsilon_v} \quad (5.8)$$

gdje je:

- Q_c protok zraka za ventilaciju potreban za ugodnost, u l/s,
- G_c osjetilno onečišćenje u olf-ima, olf,
- $C_{c,i}$ željena osjetilna kvaliteta unutarne zraka, u dp,
- $C_{c,0}$ osjetilna kvaliteta vanjskog zraka na mjestu ulazu zraka, u dp,
- ε_v učinkovitost ventilacije.

Protok zraka za ventilaciju, potreban sa stajališta zaštite zdravlja, može se proračunati iz brojčane jednadžbe:

$$Q_h = 10 \cdot \frac{G_h}{C_{h,i} - C_{h,0}} \cdot \frac{1}{\varepsilon_v} \quad (5.9)$$

gdje je:

- Q_h protok zraka za ventilaciju potreban za zdravlje, u l/s,
- G_h onečišćenje kemikalijom, u $\mu\text{g/s}$,
- $C_{h,i}$ granična vrijednost kemikalije, u $\mu\text{g/l}$,
- $C_{h,0}$ koncentracija kemikalije u vanjskom zraku na mjestu ulaza zraka, $\mu\text{g/l}$,
- ε_v učinkovitost ventilacije.

$C_{h,i}$ i $C_{h,0}$ smiju se također izraziti kao ppm (obujam / obujam). U tom slučaju onečišćenost kemikalijom G_h mora se izraziti u l/s.

Za proračun potrebnog protoka zraka za ventilaciju sa stajališta zdravlja, potrebno je identificirati kritičnu kemikaliju (ili grupu kemikalija) i vrednovati onečišćenje tom kemikalijom u prostoru.

Kad je više kemijskih onečišćujućih tvari emitirano istovremeno, potreban protok zraka za ventilaciju je onaj kojim će se ograničiti najzahtjevnija onečišćujuća tvar (a ne zbroj svih).

5.2.10 Postupna metoda za određivanje potrebnog protoka zraka za ventilaciju

Sustav ventilacije ili klimatizacije zraka mora se projektirati tako da se osigura zahtijevana unutarnja kvaliteta zraka pod specificiranim uvjetima. Projektant mora specificirati uvjete i sve načinjene pretpostavke, uključujući zahtjeve na kvalitetu unutarnjeg zraka, za čije se postizanje sustav projektira.

Potrebni su slijedeći ulazni podaci:

- namjena prostora,
- broj korisnika po m² poda,
- onečišćenje uzrokovano građevnim materijalima iz tijela zgrade, namještajem i tepisima,
- postotak pušača, ako je pušenje dopušteno,
- kvaliteta raspoloživog vanjskog zraka,
- razina vanjske buke.

Proračun protoka zraka za ventilaciju, potrebnog za ugodnost, provodi se postupno na slijedeći način:

- 1 – procijeni se očekivana zauzetost (tablica 5.3) i osjetilna onečišćenost uzrokovana korisnicima, uzimajući u obzir pušače, ako ih ima (tablica 5.2),
- 2 – procijeni se očekivana osjetilna onečišćenost od tijela zgrade (tablica 5.4),
- 3 – proračuna se ukupna osjetilna onečišćenost zbrajanjem vrijednosti iz 1 i 2,
- 4 – izabere se željena osjetilna kvaliteta unutarnjeg zraka (tablica 5.6),
- 5 – procijeni se kvaliteta vanjskog zraka (tablica 5.9) i učinkovitost ventilacije,
- 6 – proračuna se potreban protok zraka za ventilaciju iz jednadžba (5.8).

Proračun protoka zraka za ventilaciju, potrebnog sa stajališta zaštite zdravlja, provodi se postupno na slijedeći način:

- 1 – identificiraju se najkritičnije kemikalije i procijeni se onečišćenje prostora zgrade tim kemikalijama,
- 2 – utvrde se granične vrijednosti za kritične kemikalije,
- 3 – proračuna se protok zraka za ventilaciju potreban sa stajališta zaštite zdravlja prema jednadžbi (5.9).

Veću od dviju gore proračunatih vrijednosti treba uzeti kao potreban protok zraka za ventilaciju.

Primjer 5.3

Restoran - projektne pretpostavke:

- zauzetost je 0,7 osoba / (m² poda),
- učinkovitost ventilacije $\varepsilon_v = 1$,
- građevni materijali zgrade i oprema s malom emisijom onečišćenja od 0,1 olf / (m² poda),
- pušenje nije dopušteno,
- zgrada je smještena u području s izvrsnom osjetilnom kvalitetom vanjskog zraka (0 dp) i razine kemijskih onečišćujućih tvari u vanjskom zraku nisu od interesa u pogledu zdravlja

Projektni kriteriji kvalitete unutarnjeg zraka

Alternativa 1

Osjetilno onečišćenje zraka od osoba (tablice 5.2 i 5.4) $1 \times 0,7 = 0,7 \text{ olf} / (\text{m}^2 \text{ poda})$

Osjetilno onečišćenje zraka od zgrade $0,1 \text{ olf} / (\text{m}^2 \text{ poda})$

Ukupno osjetilno onečišćenje unutarnjeg zraka $0,8 \text{ olf} / (\text{m}^2 \text{ poda})$

Zahtijevani protok zraka za ventilaciju za ugodnost (jednadžba (5.8) i tablica 5.6)

Kategorija I: $Q_c = 10 \times 0,8 / (1,0 - 0) \times 1/1 = 8,0 \text{ l} / (\text{s} \times \text{m}^2 \text{ poda})$

Kategorija II: $Q_c = 10 \times 0,8 / (1,4 - 0) \times 1/1 = 5,7 \text{ l} / (\text{s} \times \text{m}^2 \text{ poda})$

Kategorija III: $Q_c = 10 \times 0,8 / (2,5 - 0) \times 1/1 = 3,2 \text{ l} / (\text{s} \times \text{m}^2 \text{ poda})$

Alternativa 2

Osniva se na sadržaju CO₂ zanemarujući zgradu kao izvor onečišćenja.

Zahtijevani protok zraka za ventilaciju (jednadžba (5.9) i tablice 5.2 i 5.7)

Kategorija I: $Q_c = 0,7 \times 19 / (3600 \times 350 \times 10^{-6}) \times 1/1 = 10,6 \text{ l / (s} \times \text{m}^2 \text{ poda)}$

Kategorija II: $Q_c = 0,7 \times 19 / (3600 \times 500 \times 10^{-6}) \times 1/1 = 7,4 \text{ l / (s} \times \text{m}^2 \text{ poda)}$

Kategorija III: $Q_c = 0,7 \times 19 / (3600 \times 800 \times 10^{-6}) \times 1/1 = 4,6 \text{ l / (s} \times \text{m}^2 \text{ poda)}$

5.3 Zahtijevani i preporučeni projektni protoci zraka za ventilaciju

5.3.1 Općenito

Za kvalitetu unutarnjeg zraka ne postoje opći normirani pokazatelji. Zato se kvaliteta unutarnjeg zraka izražava kao zahtijevani protok zraka za ventilaciju ili kao dopuštena koncentracija CO₂. Na kvalitetu unutarnjeg zraka utječe emisija onečišćujućih tvari od ljudi (biološko lučenje) i njihovih aktivnosti (pušenje,...) i emisija iz tijela zgrade uključujući namještaj, tepih te sam sustav ventilacije/klimatizacije. Zahtijevani protok zraka za ventilaciju osniva se na kriterijima zdravlja i ugodnosti. U većini slučajeva kod stambenih zgrada i nestambenih zgrada javne namjene zdravstveni kriterij će biti ispunjen ventilacijom zahtijevanom za ugodnost.

Projekti se mogu načiniti za različite kategorije kvalitete unutarnjeg zraka što će utjecati na zahtijevane protoke zraka za ventilaciju. Zahtijevani protoci zraka za ventilaciju koje treba osigurati (postići) odgovarajućim projektnim rješenjem zgrade dani su u nacionalnim tehničkim propisima koji uređuju ovo područje projektiranja zgrada. Kada nema takvog propisa koriste se preporučene (zadane) vrijednosti iz stručne literature ili proračuni potrebnog protoka zraka za ventilaciju za specifične projektne uvjete. Projektant mora dokumentirati usvojene projektne kriterije. Projektni kriteriji određuju podatke potrebne za proračun sustava ventilacije. Ti kriteriji također tvore osnovu mjerenja koja će se provesti tijekom procesa primopredaje zgrade i kasnijih kontrola tijekom korištenja zgrade. Oni osiguravaju uspostavu zajedničke platforme svih zainteresiranih strana, koja uključuje investitora, projektanta, izvođača i osoblja zaduženog za upravljanje i održavanje.

Podaci o protoku zraka za ventilaciju koriste se za različite svrhe: proračun energije (energetskog svojstva zgrade), proračun opterećenja grijanja i hlađenja, dimenzioniranja sustava ventilacije, analize ljetne ugodnosti i kod vrednovanja kvalitete unutarnjeg zraka. Protok zraka za ventilaciju kao ulazni parametar za navedene proračune treba utvrditi u skladu s područjem primjene.

5.3.2 Nestambene zgrade

Zahtijevani protok zraka za ventilaciju može biti izražen po osobi ili po kvadratnom metru ploštine poda. Vrijednosti izražene po osobi pretpostavljaju da su korisnici jedini izvori onečišćenja. Vrijednosti izražene po ploštini poda pretpostavljaju da postoji samo onečišćenje iz tijela zgrade, uključujući namještaj, tepihe i sam sustav ventilacije/klimatizacije. Zahtijevani protok zraka za ventilaciju mora uključiti sve prisutne izvore onečišćenja, dakle i ventilaciju zbog onečišćenja korisnika i ventilaciju zbog onečišćenja iz tijela zgrade i njenih tehničkih uređaja.

Ukupni protok zraka za ventilaciju za prostoriju jednak je zbroju te dvije komponente, dakle:

$$q_{\text{tot}} = n \times q_p + A \times q_B \quad (5.10)$$

gdje je:

q_{tot} ukupni protok zraka za ventilaciju prostorije, u l/s,

n projektna vrijednost broja osoba u prostoriji,

q_p protok zraka za ventilaciju za korištenje po osobi, u l/(s×osoba),

A ploština poda prostorije, u m²,

q_B protok zraka za ventilaciju za emisiju zgrade, u l/(s×m²).

Preporučeni protoci zraka samo zbog korisnika (q_p) navedeni su u tablici 5.11, a preporučeni protoci zraka za ventilaciju zbog emisije onečišćenja iz tijela zgrade u tablici 5.12.

Tablica 5.11 Osnovni zahtijevani protoci zraka za ventilaciju zbog emisije od ljudi (biološka lučenja) (prema HRN EN 15251 [86])

Kategorija	Očekivani postotak nezadovoljnih, %	Protok zraka po osobi, l/(s×osoba)			
		Nema pušenja	20 % pušača	40 % pušača	100 % pušača ^{a)}
I	15	10	20	30	30
II	20	7	14	21	21
III	30	4	8	12	12
IV	> 30	< 4	< 8	< 12	< 12

^{a)} Za 40 do 100 % pušača zahtijevani protok zraka za ventilaciju jednak je zahtijevanoj vrijednosti za 40 % pušača jer su pušači tolerantniji u odnosu na duhanski dim u zraku nego nepušači.

Ako je pušenje dopušteno preporuča se jasno odvajanje pušačkog od nepušačkog prostora.

Tablica 5.12: Zahtijevani protoci zraka za ventilaciju za emisiju zgrade (q_B) (prema HRN EN 15251 [86])

Kategorija	Zgrada s vrlo malim onečišćenjem, l/(s ×m ²)	Zgrada s malim onečišćenjem, l/(s ×m ²)	Zgrada koja ne pripada grupi s malim onečišćenjem, l/(s ×m ²)
I	0,5	1,0	2,0
II	0,35	0,7	1,4
III	0,3	0,4	0,8

Za projektiranje sustava ventilacije za prostorije koje nisu namijenjene korištenju od strane ljudi i čija uporaba nije jasno određena (npr. prostorije za skladištenje) zahtijevani protok zraka za ventilaciju najčešće se izražava protokom zraka po ploštini poda.

U tablici 5.13 proračunani su primjeri ukupnog protoka zraka za ventilaciju za nestambene zgrade javne namijene koji se osnivaju na navedenim vrijednostima i uporabom jednadžbe (5.10) uz zadane gustoće korištenja. Vrijednosti u tablici vrijede za potpuno miješanje zraka i onečišćujućih tvari u prostoriji (koncentracija onečišćujuće tvari jednaka je u području odsisa kao u području boravka). U suprotnom se protok zraka mora prilagoditi u skladu s učinkovitosti ventilacije. Dodatna ventilacija zahtijevana za pušenje osniva se na pretpostavci da 20 % korisnika čine pušači koji popuše po 1,2 cigarete na sat. Za veći intenzitet pušenja protoke zraka treba razmjerno povećati.

Tablica 5.13 Primjeri preporučenih protoka zraka za ventilaciju za nestambene zgrade sa zadanom gustoćom korisnika (prema HRN EN 15251 [86])

Tip zgrade ili prostorije	Kategorija kvalitete zraka	Ploština poda m ² /osoba	q _p	q _B	q _{tot}	q _B	q _{tot}	q _B	q _{tot}	Dodatak za pušenje
			l/(s×m ²)	l/(s×m ²)		l/(s×m ²)		l/(s×m ²)		l/(s×m ²)
			za korisnike	zgrada – vrlo malo onečišćenje		zgrada – malo onečišćenje		zgrada – nije malo onečišćenje		
Pojedinačni ured	I	10	1,0	0,5	1,5	1,0	2,0	2,0	3,0	0,7
	II	10	0,7	0,3	1,0	0,7	1,4	1,4	2,1	0,5
	III	10	0,4	0,2	0,6	0,4	0,8	0,8	1,2	0,3
Skupni ured	I	15	0,7	0,5	1,2	1,0	1,7	2,0	2,7	0,7
	II	15	0,5	0,3	0,8	0,7	1,2	1,4	1,9	0,5
	III	15	0,3	0,2	0,5	0,4	0,7	0,8	1,1	0,3
Soba za sastanke	I	2	5,0	0,5	5,5	1,0	6,0	2,0	7,0	5,0
	II	2	3,5	0,3	3,8	0,7	4,2	1,4	4,9	3,6
	III	2	2,0	0,2	2,2	0,4	2,4	0,8	2,8	2,0
Dvorana za gledatelje / slušatelje	I	0,75	15	0,5	15,5	1,0	16	2,0	17	
	II	0,75	10,5	0,3	10,8	0,7	11,2	1,4	11,9	
	III	0,75	6,0	0,2	0,8	0,4	6,4	0,8	6,8	
Restoran	I	1,5	7,0	0,5	7,5	1,0	8,0	2,0	9,0	
	II	1,5	4,9	0,3	5,2	0,7	5,6	1,4	6,3	5,0
	III	1,5	2,8	0,2	3,0	0,4	3,2	0,8	3,6	2,8
Učionica – razred	I	2,0	5,0	0,5	5,5	1,0	6,0	2,0	7,0	
	II	2,0	3,5	0,3	3,8	0,7	4,2	1,4	4,9	
	III	2,0	2,0	0,2	2,2	0,4	2,4	0,8	2,8	
Vrtić	I	2,0	6,0	0,5	6,5	1,0	7,0	2,0	8,0	
	II	2,0	4,2	0,3	4,5	0,7	4,9	1,4	5,8	
	III	2,0	2,4	0,2	2,6	0,4	2,8	0,8	3,2	
Robna kuća	I	7	2,1	1,0	3,1	2,0	4,1	3,0	5,1	
	II	7	1,5	0,7	2,2	1,4	2,9	2,1	3,6	
	III	7	0,9	0,4	1,3	0,8	1,7	1,2	2,1	

Navedeni zahtijevani protoci zraka za ventilaciju koriste se kao projektne ulazne vrijednosti za dimenzioniranje sustava ventilacije i za proračun energije.

Kako bi se dobra kvaliteta zraka jamčila na početku korištenja prostora, ventilacija mora započeti radom prije početka korištenja ili mora postojati minimalni protok zraka tijekom sati nekorištenja. Ako nema nacionalnog propisa preporuča se prije početka korištenja, prostor opskrbiti količinom vanjskog zraka u iznosu dva obujma zraka ventiliranog prostora (npr. ako je protok zraka za ventilaciju dvije izmjene zraka na sat, ventilaciju treba započeti 1 sat prije korištenja). Infiltracija se može uračunati kao dio te ventilacije. Umjesto ranijeg početka rada sustava ventilacije, zgrada se može ventilirati tijekom perioda nekorištenja s manjim protokom zraka nego kada se koristi (ovisno o tipu zgrade i opterećenju onečišćenja u zraku prostorije). Ako nema nacionalnih propisa najmanja preporučena vrijednost je 0,1 do 0,2 l/(s × m²). Kod proračuna energije potrebno je uzeti u obzir ove dodatne energijske potrebe za rad sustava ventilacije u „razdoblju nekorištenja“.

Ako se radi o reguliranoj ventilaciji s kontrolom CO₂, koncentracija CO₂ ne smije premašiti projektne vrijednosti. U tablici 5.7 dane su preporučene vrijednosti za najveću koncentraciju CO₂ iznad koncentracije CO₂ u vanjskom zraku. Iz zadovoljenja tog uvjeta proračunaju se zahtijevani protoci zraka za ventilaciju, koje treba koristiti za proračune energije.

5.3.3 Stambene zgrade

Zahtijevani protoci zraka za ventilaciju navode se obično kao broj izmjena zraka po satu za svaku prostoriju i/ili kao dobava vanjskog zraka i zahtijevani protok odsisnog zraka iz vlažnih prostorija (kupaonica, WC, kuhinja), odnosno kao zahtijevani ukupni broj izmjena zraka u stanu. Ako nacionalni propisi sadrže te odredbe, one se moraju zadovoljiti kod projektiranja sustava mehaničke ili prirodne ventilacije kao i uređaja za odsis zraka.

Broj izmjena zraka, n , određuje koliko se puta u jednom satu zrak u prostoriji zamjeni s vanjskim zrakom.

$$n = \frac{q_v}{V} \quad (5.11)$$

gdje je:

q_v protok zraka za ventilaciju, m³/h,
 V obujam zraka u prostoriji tj. neto obujam, izračunat pomoću unutarnjih dimenzija prostorije.

Mjerna jedinica za n je h⁻¹. Kada je zahtijevani protok zraka za ventilaciju izražen kao potreban broj izmjena zraka, onda se protok zraka izračunava pomoću izraza

$$q_v = n \times V \quad (5.12)$$

Ako nema nacionalnih propisa mogu se koristiti, u nastavku dane, preporučene (zadane) standardne vrijednosti koje se osnivaju na prosječnom korištenju stanova.

Postignuta kvaliteta unutarnjeg zraka kod stanova ovisi uglavnom o trima kriterijima:

- odvođenja onečišćenog zraka iz vlažnih prostorija (kupaonica, kuhinja, WC),
- općoj ventilaciji svih prostorija u stanu,
- općoj ventilaciji svih prostorija u stanu s kriterijima za svjež zrak u glavnim „suhim“ prostorijama (dnevni boravak i spavaće sobe).

Kvaliteta unutarnjeg zraka izražava se kao zahtijevana razina ventilacije (tablica 5.14).

Opskrba zraka za kuhinju, kupaonicu i WC smije se osigurati prijelazom zraka iz spavaćih soba i dnevnog boravka.

Tablica 5.14: Primjer protoka zraka za stanove. Vrijedi za kontinuirani rad ventilacije tijekom sati korištenja te potpuno miješanje zraka i onečišćujućih tvari (prema HRN EN 15251 [86])

Kategorija kvalitete zraka	Izmjena zraka u stanu ^{a)}		Dnevni boravak i spavaće sobe, protok vanjskog zraka		Protok odsisnog zraka, l/s		
	$l/(s \times m^2)$	broj izmjena zraka, n, h^{-1}	$l/(s \times osoba)^b)$	$l/(s \times m^2)$	Kuhinja	Kupaonica	WC
	(1)		(2)	(3)	(4a)	(4b)	(4c)
I	0,49	0,7	10	1,4	28	20	14
II	0,42	0,6	7	1,0	20	15	10
III	0,35	0,5	4	0,6	14	10	7

^{a)} Izmjena zraka izražena u $l/(s \times m^2)$ i izražena brojem izmjena zraka, n , međusobno odgovaraju ako je visina prostorije do plafona 2,5 m.

^{b)} Broj osoba u stanu može se procijeniti iz broja spavaćih soba

Postupak za odabir protoka je slijedeći:

- 1 – proračunati ukupni protok zraka za ventilaciju za stan, koji se osniva na
 - a)-ploštini poda, stupac (1),
 - b)-broju osoba (korisnika) ili broju spavaćih soba, stupci (2) i (3),
- 2 – veću vrijednost između a) i b) odabrati kao ukupni protok zraka za ventilaciju stana,
- 3 – odgovarajuće prilagoditi protok odsisnog zraka iz kuhinje, kupaonice i WC-a, stupac (4) i to na slijedeći način:
 - a)-u stanovima s malom ploštinom poda, protok odsisnog zraka se smanji,
 - b)-u velikim stanovima povećava se protok odsisnog zraka.
- 4 – Vanjskim zrakom treba u prvom redu opskrbiti dnevni boravak i spavaće sobe

Kod proračuna energije treba uzeti u obzir još i slijedeće:

Prisilna (mehanička) ventilacija

U stambenim je zgradama obično najmanji protok zraka za ventilaciju konstantan tijekom vremena korištenja i to je onaj koji je utvrđen kod projektiranja (projektni zahtjevi). Stambene zgrade treba ventilirati tijekom perioda nekorištenja s manjim protokom zraka nego u vrijeme korištenja. Taj najmanji protok zraka za ventilaciju mora se definirati na osnovi opterećenja onečišćenja zraka u prostoru. Ako nema nacionalnih propisa preporuča se vrijednost između 0,05 do 0,1 $l/(s \times m^2)$. U stambenim zgradama „razdoblje nekorištenja“ uglavnom znači razdoblje za koje nema potrebe za ventilacijom.

Prirodna ventilacija

Protoci zraka ventilacijom u prirodno ventiliranim zgradama proračunavaju se na osnovi oblika zgrade, lokacije i vremenskih uvjeta u skladu s normom HRN EN 15242 [88]. Najmanji protok ventilacije utvrđen je kod projektiranja (projektni zahtjevi) i rabi se za proračune energije tijekom sati korištenja.

Tijekom perioda nekorištenja treba predvidjeti najmanju prirodnu ventilaciju zgrade. Preporučene vrijednosti su jednake onima navedenim kod prisilne ventilacije.

5.4 Vrednovanje kvalitete unutarnjeg zraka i ventilacije

Kako se opterećenje svake zgrade s obzirom na vlagu i onečišćujuće tvari u zraku mijenja i prostorno i vremenski, može nastupiti slučaj da projektirani sustav ventilacije ili klimatizacije možda neće moći ispuniti projektne kriterije (ciljeve projekta) u svim prostorijama tijekom svih sati. Postoji stoga potreba vrednovanja dugoročnih (godišnjih) svojstava zgrade s obzirom na kvalitetu unutarnjeg zraka i ventilaciju. Vrednovanje kvalitete unutarnjeg zraka i ventilacije zgrade provodi se vrednovanjem kvalitete unutarnjeg zraka i ventilacije tipičnih prostorija, koje predstavljaju različita područja u zgradi, tijekom dužeg vremenskog razdoblja. Vrednovanje se može osnivati na projektnim kriterijima, računalnom modeliranju, dugoročnim mjerenjima na zgradi ili popunjavanjem upitnika od strane korisnika zgrade.

Projektni kriteriji

Projektni kriteriji za vrednovanje kvalitete zraka i ventilacije su projektne vrijednosti za ventilaciju nestambenih i stambenih zgrada iz točke 5.3. Oni se koriste za nove zgrade.

Primjer vrednovanja prema upotrijebljenim projektnim kriterijima u proračunima energije dan je u tablici 5.15.

Tablica 5.15 Primjeri vrednovanja utemeljen na kriterijima energijskih proračuna

Kriterij	Kategorija za predmetnu zgradu	Projektni kriteriji
Pokazatelj kvalitete zraka, CO ₂	II	500 ppm više nego u vanjskom zraku
Protok zraka za ventilaciju	II	1 l/(s×m ²)

Računalno modeliranje

Računalnim programima, na odgovarajućem modelu zgrade, analiziraju se svojstva kvalitete zraka i ventilacije. Za vrednovanje svojstava cijele zgrade modelira se ponašanje reprezentativnih prostorija. Kod toga se utvrđuje broj sati ili postotak vremena u kojem su zahtijevani kriteriji postignuti ili nisu postignuti. Zgrada ispunjava kriterije određene kategorije ako prostorije koje predstavljaju 95% obujma zgrade ispunjavaju kriterije odabrane kategorije.

Dinamičkim računalnim modeliranjem mogu se za reprezentativne prostorije zgrade proračunati protok zraka za ventilaciju i/ili koncentracija CO₂. Oni se mogu prikazati kao postotak vremena u kojem je protok zraka ili koncentracija CO₂ u okviru kriterija postavljenih za različite kategorije (I, II, III ili IV). To se provodi ponderiranjem srednjih vrijednosti s obzirom na ploštinu poda za 95% prostorija u zgradi. Primjer je prikazan u tablici 5.16.

Tablica 5.16 Primjer razdiobe kvalitete unutarnjeg zraka / ventilacije. Razdioba u različite kategorije ponderirana je po ploštinu poda pojedinih prostorija u zgradi

% vremena u kojem je kvaliteta unutarnjeg zraka u okviru kriterija pojedine kategorije				
Postotak vremena	7	7	76	10
Kategorija	IV	III	II	I

Ova proračunska metoda koristi se za nove i postojeće zgrade.

Mjerenje na zgradi

Na postojećim zgradama mogu se provoditi dugoročna mjerenja kvalitete zraka i protoka ventilacije. Ventilacija zgrade može se vrednovati mjerenjem protoka zraka u ventilacijskim kanalima.

Kvaliteta zraka u zgradi može se vrednovati u zgradama u kojima su ljudi glavni izvor onečišćenja, mjerenjem prosječne koncentracije CO₂ u zraku zgrade kad se ona u cijelosti koristi. To je moguće načiniti na reprezentativnim uzorcima zraka prostorije ili mjerenjem koncentracije u otpadnom zraku.

Protok zraka za ventilaciju ili koncentracija CO₂ mjere se u reprezentativnim prostorijama tijekom cijele godine ili reprezentativnog razdoblja. Podaci se analiziraju i prikazuju na isti način kao u tablici 5.16.

Vrednovanja kvalitete unutarnjeg zraka i ventilacije mjerenjem koriste se kod postojećih zgrada.

Dopuštaju se određena odstupanja od odabranih kriterija za kvalitetu unutarnjeg zraka odnosno od zahtijevanih protoka zraka za ventilaciju. Dopuštena odstupanja se najčešće navode kao dopušteni broj sati u kojima kriteriji nisu ispunjeni pri čemu se za osnovu uzima godišnje vrednovanje. Ako nema propisanih nacionalnih kriterija za odstupanja se mogu uzeti preporučene vrijednosti iz tablice 5.17.

Kvaliteta unutarnjeg zraka i ventilacije zgrade vrednuje se na reprezentativnim uzorcima uzetim iz različitih područja zgrade za različite sustave ventilacije.

Kvaliteta unutarnjeg zraka i ventilacija ispunjavaju kriterije određene kategorije kada ti parametri u prostorijama koje predstavljaju 95% korištenog prostora (prostora za zadržavanje) nisu primjerice za više od 3 % ili 5 % korištenih sati u danu, tjednu, mjesecu i godini izvan graničnih vrijednosti te kategorije. U tablici 5.17 prikazano je vrijeme koje odgovara 3%-tnom i 5%-tnom odstupanju utemeljenom na radnim satima i ukupnim satima.

Tablica 5.17 Primjeri za trajanje odstupanja koja odgovaraju 3 % i 5 % odgovarajućeg vremena, prema HRN EN 15251 [86]

3% / 5% vremena	Dnevno min	Tjedno sati	Mjesečno sati	Godišnje sati
Radni sati	15/24	1/2	5/9	61/108
Ukupni sati	43/72	5/9	22/36	259/432

Dopuštena su dakle samo kratkotrajna odstupanja. Npr. dopušteno je na 5%-tnoj razini imati osjetilno onečišćenje zraka veće od kriterija za 108 sati tijekom godine, ali ne više od 24 min tijekom radnog dana i 2 h tijekom radnog tjedna.

U postojećim zgradama mjerenja se mogu upotrijebiti da bi se preispitalo da li svojstva zgrade i njenih tehničkih sustava za ventilaciju ispunjavaju projektne zahtjeve.

Mjerenja kvalitete unutarnjeg zraka osnivaju se na neizravnom pristupu mjerenja protoka zraka za ventilaciju. Samo ako postoje posebni prigovori (npr. miris, simptomi bolesne zgrade,...), a mjerenje ventilacije pokaže da su zahtjevi s obzirom na opskrbu svježim zrakom postignuti, treba provesti mjerenje sadržaja određenih onečišćujućih tvari (npr. formaldehida).

Izuzetak je mjerenje CO₂. U zgradama u kojima su osobe glavni izvor onečišćenja mogu se protoci zraka za ventilaciju (vrijednosti po osobi ili po m²) izvesti iz rezultata mjerenja CO₂. Mjerenja se moraju provesti tamo gdje je poznato da će korisnici provesti većinu svog vremena. Mjerenje CO₂ treba po mogućnosti provesti u zimskim uvjetima kad je obično opskrba svježim zrakom najmanja. U većim zgradama ne treba vrednovati sve prostorije, a mjerenja u samo 5 ili 10 % prostorija (odabranih za reprezentativne) mogu biti dovoljna.

U mehanički ventiliranim zgradama mjerenje količine opskrbe svježim zrakom često je praktičnije i preciznije od mjerenja koncentracije CO₂.

Prvo treba izmjeriti ukupnu opskrbu svježim zrakom za cijelu zgradu i pretvoriti u prosječnu vrijednost po m². Također je potrebno u odabranom reprezentativnom uzorku prostorija (npr. 5 ili 10 % ukupnog broja) izmjeriti opskrbu svježim zrakom „na razini prostorije“. Nju zatim treba pretvoriti u vrijednost opskrbe svježim zrakom po m² i vrijednost opskrbe svježim zrakom po osobi uzimajući u obzir razinu stvarnog korištenja i razinu projektiranog korištenja.

Izmjerenu vrijednost opskrbe zrakom na razini prostorije treba ispraviti za optočni zrak (recirkulaciju) tijekom perioda kada se on rabi.

Ako se rabe sustavi s konstantnim obujmom mehaničke ventilacije, dovoljna su trenutačna mjerenja.

U zgradama / prostorijama sa sustavom promjenjivog obujma opskrbe zrakom treba mjeriti najmanje i najveće vrijednosti.

Metodologija subjektivnih vrednovanja

Za vrednovanje unutarnjeg okoliša mogu se upotrijebiti upitnici za subjektivno vrednovanje. Korisnicima se predoče subjektivne ljestvice u utvrđenim vremenskim intervalima (dnevno, tjedno, mjesečno itd). Upitnike treba popuniti oko sredine jutra ili sredine popodneva (ne neposredno nakon dolaska ili nakon pauze za ručak). Rezultati se mogu prikazati kao prosječne vrijednosti i/ili statističke raspodjele.

Primjer upitnika za subjektivno vrednovanje:

Kako osjećate kvalitetu zraka?

- potpuno prihvatljivom,
- još gotovo prihvatljivom,
- gotovo neprihvatljivom,
- potpuno neprihvatljivom.

Kako osjećate intenzitet mirisa?

- nema mirisa,
- slab miris,
- umjeren miris,
- jak miris,
- vrlo jak miris,
- presnažan miris.

Postotak ljudi koji smatraju da je kvaliteta zraka prihvatljiva proračuna se za svaki od reprezentativnih prostora u zgradi. Zatim se proračuna ponderirani prosjek u skladu s brojem ljudi u različitim prostorima koji se rabe pri razredbi.

5.5 Proračun protoka zraka u zgradama

5.5.1 Ventilacija, infiltracija i prozračivanje

Ventilacija prostora zgrade je jedna od mjera kojima se želi postići ugodnost boravka i odgovarajuću kvalitetu unutarnjeg zraka primjerenu korisnicima zgrade, vodeći pri tome računa o racionalnoj potrošnji energije. Sasvim općenito, ventilacijom se označava proces, kojim se u nekom zatvorenom prostoru postiže izmjena zraka. U zgradarstvu ventilacija je, u prvom redu, proces dovođenja vanjskog svježeg čistog zraka u prostor zgrade i odvođenje „potrošenog“ onečišćenog zraka iz prostora zgrade u vanjski okoliš, kroz za to predviđene otvore, a sve radi održavanja željene kvalitete unutarnjeg zraka.

Ventilacija unutarnjeg prostora zgrade može se odvijati na prisilan (mehanički) ili prirodan način. Kod **prisilne** ili **mehaničke ventilacije** koriste se ventilatori pomoću kojih se zrak prisilno dovodi u zgradu ili odvodi iz nje ili oboje. Kod **prirodne ventilacije** zrak struji kroz

projektom predviđene otvore u ovojnici zgrade zbog postojanja prirodne razlike između tlaka zraka u zgradi i tlaka zraka u vanjskom prostoru.

Hibridna ventilacija je sustav ventilacije kod kojeg je prirodna ventilacija, barem za vrijeme određenog razdoblja, potpomognuta ili potpuno zamijenjena mehaničkom ventilacijom. Sustav hibridne ventilacije sadrži, dakle, dva autonomna sustava ventilacije. On u različitim razdobljima dana ili godine, ovisno o svojim kontrolnim uređajima, koristi prirodni i/ili mehanički sustav ventilacije. Sasvim općenito, hibridna ventilacija koristi prirodnu ventilaciju kad je ona moguća, a kad je ona nedovoljna nadopunjuje je ili zamjenjuje mehaničkom ventilacijom. Načelo na kojem se osniva hibridna ventilacija je da je nepotrebno trošiti energiju za mehaničku ventilaciju kad je isti efekt moguće postići prirodnim mehanizmima ventilacije. Sustav hibridne ventilacije sadrži „pametni“ sustav kontrole koji može automatski uključivati i isključivati načine prirodne i mehaničke ventilacije, kako bi se na minimum smanjila potrošnja energije.

Infiltracija zraka u prostor zgrade događa se također kao posljedica ranije spomenute prirodne razlike tlaka zraka unutar i izvan zgrade, ali kroz neželjena mjesta propuštanja zraka u toplinskoj ovojnici zgrade (pukotine, nedovoljno zabrtvljene reške između građevnih dijelova zgrade, sljubnice krila prozora i doprozornika, itd.). Ventilacija je projektirani, željeni, proces izmjene zraka kroz za to predviđene otvore u toplinskoj ovojnici zgrade i s njom možemo upravljati. Infiltracija je neželjeni proces izmjene zraka kroz neželjena mjesta propuštanja zraka u toplinskoj ovojnici zgrade, koji je slučajan i ovisan o trenutnim vremenskim uvjetima na lokaciji zgrade. Infiltracijom se ne može efikasno zadovoljiti zahtjev potrebne izmjene zraka u prostoru zgrade.

Prozračivanjem (provjetravanjem) nazivamo prirodnu izmjenu zraka otvaranjem prozora. Potrebna izmjena zraka u prostoru zgrade ne može se riješiti povremenim otvaranjem prozora ili trajno otvorenim otklopnim prozorom. Učinak povremenog otvaranja prozora vrlo brzo nakon njegova zatvaranja biti će poništen, tako da će kvaliteta zraka biti gotovo jednaka onoj prije prozračivanja. Trajno otklopljen prozor uzrokuje povećanje ventilacijskih toplinskih gubitaka pa s gledišta racionalne uporabe energije nije prihvatljivo rješenje. Prozračivanje prostora otvaranjem prozora treba koristiti za brzu izmjenu zraka u slučaju povremeno većeg onečišćenja zraka, dakle, samo kao dopunu trajnoj kontroliranoj ventilaciji.

Protok zraka uzrokovan provjetravanjem preko prozora promatra se kao dodatni protok. Ukupni protok vanjskog zraka, $q_{v,tot}$, proračunava se kao:

$$q_{v,tot} = q_{v,syst} + q_{v,airing} \quad (5.13)$$

gdje je:

$q_{v,syst}$ protok zraka preko projektiranog sustava ventilacije, uključivo infiltraciju,
 $q_{v,airing}$ dodatni protok uslijed otvaranja prozora.

5.5.2 Modeliranje strujanja zraka u zgradi

Strujanje zraka u zgradama može se modelirati (matematički predstaviti) na više ili manje precizan način, od modela koji omogućuju samo globalnu procjenu protoka zraka do modela s kojima je moguća vrlo precizna procjena karakteristika strujanja, vodeći računa o arhitektonskim, klimatskim i toplinskim karakteristikama zgrade i njenog okoliša. Različiti modeli dijele se prema različitom stupnju apstrakcije, koji odgovara željenoj preciznosti i raspoloživosti ulaznih podataka. U stručnoj literaturi su opisane brojne metode modeliranja, makroskopske i mikroskopske, koje se mogu grupirati u četiri osnovne kategorije [89]:

- jednozonski modeli,
- višezonski modeli,
- modeli s podjelom prostorije (zone) u skup malih kvadara (pravokutnih (paralelopipeda),
- modeli s podjelom prostorije u dijelove s infinitezimalno malim obujmom.

Makroskopski modeli koriste pojednostavnjenja bazirana na idealizaciji fizikalnih pojava i procesa. Kod **jednozonskog modela** čitava zgrada se promatra kao jedna zona koja ima jednolika svojstva tlaka, temperature, koncentracije onečišćujućih tvari,... Ti modeli omogućuju globalnu procjenu protoka zraka na razini zgrade, uvažavajući karakteristike propustljivosti za zrak njene ovojnice. Jednozonski modeli se temelje na pojednostavnjenim hipotezama o obliku zgrade i o parametrima koji utječu na kretanje zraka. Jednozonskim modelima ne može se utvrđivati ugodnost ili učinkovitost ventilacije po prostorijama, jer ovi modeli zanemaruju detalje internog funkcioniranja zgrade.

Postoje razne kategorije jednozonskih modela. Najjednostavniji je **empirijski jednozonski model**, kod kojeg se izmjena zraka kroz ovojnicu zgrade procjenjuje prema vrijednosti njene ukupne propustljivosti za zrak. Kod toga se polazi od broja izmjena zraka za razliku tlaka unutar i izvan zgrade od 50 Pa, što označavamo kao n_{50} . Jedna varijanta ovog modela razrađena je, primjerice, u HRN EN 12831 [90] za proračun ventilacijskih toplinskih gubitaka za potrebe dimenzioniranja sustava grijanja.

Kod **jednostavnog teorijskog jednozonskog modela** uzimaju se u obzir prirodne pogonske sile koje uzrokuju tokove zraka kroz ovojnicu zgrade: razlika temperature između unutarnjeg i vanjskog zraka i brzina vjetra (npr. ASHRE, 2005). Model se temelji na procjeni protoka zraka infiltracijom kroz ovojnicu zgrade polazeći od vrijednosti ploštine ekvivalentne površine mjesta propuštanja zraka u ovojnici zgrade. Ovim tipom modela mogu se dobiti srednje vrijednosti izmjene zraka za zgradu u cjelini i za dane meteorološke uvjete, ali se ne može analizirati utjecaj pojedinih komponenti ventilacije (ulazi zraka, fasade,...) što onemogućuje vrednovanje različitih projektnih rješenja. Da bi se to omogućilo, razvijeni su detaljni teorijski jednozonski modeli.

Detaljni teorijski jednozonski model (npr. u HRN EN 15242 [88]) uzima u obzir fizikalne pogonske sile, ali predviđa i razdiobu mjesta propuštanja i ulaza zraka po cijeloj ovojnici zgrade. U ovom modelu zgrada je podijeljena u zone prema kriteriju korištenja prostora. Kod proračuna protoka zraka smatra se da su pregrade između zona nepropusne za zrak, i zato ovaj model u stvari predstavlja jednozonski model proračuna.

U **višezonezonskom modelu** (nazivan i model čvorova ili u mreži) najčešće svaka prostorija predstavlja jednu zonu. Svaka zona se promatra kao homogena, s jednakim karakteristikama temperature, tlaka, koncentracije onečišćujuće tvari, u svim točkama zone, u svakom vremenskom koraku proračuna. Zračne veze između zona (mali ili veliki otvori, pukotine,...) su putovi strujanja zraka. Protoci zraka između zona ovise o razlici tlaka između zona, koji se proračunavaju na bazi teorije mehanike fluida. Višezonezonski model omogućava da se procjeni kretanje zraka između svake prostorije unutar zgrade te ukupni protok zraka izmijenjen s vanjskim okolišem. Nedostatak višezonezonskog modela je da ne uzima u obzir efekte lokalnih izvora topline, tako da se ne mogu dobiti preciznije informacije o temperaturi i tlaku na pojedinim mjestima unutar zone. U prostorijama velikog obujma (npr. atrij) hipoteza o homogenom temperaturnom polju daleko je od realnosti.

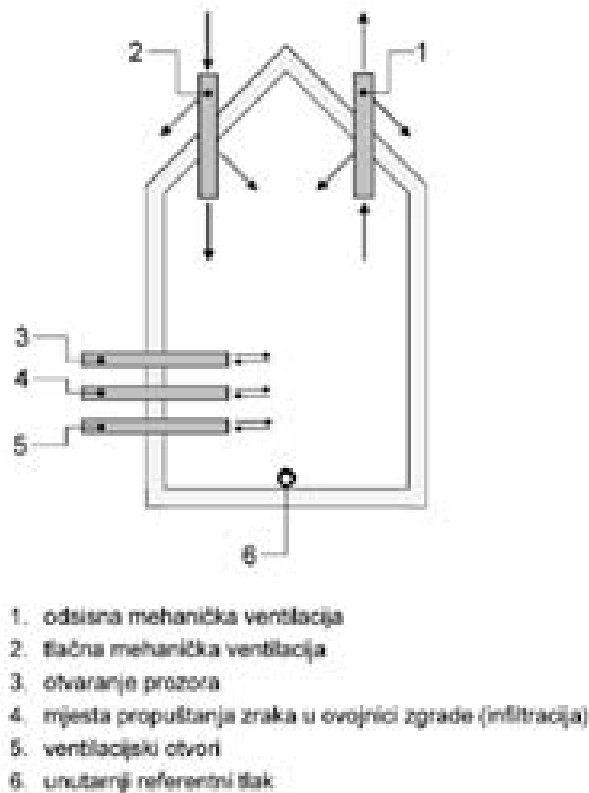
Navedeni nedostaci višezonezonskog modela mogu se ublažiti razdiobom prostorije (zone) u više **malih pravokutnih paralelopipeda**, svaki s jednolikim fizikalnim svojstvima. Na svaki paralelopiped primjene se jednadžbe očuvanja mase i energije kao i prenošenja mase i energije između njih. Ovim modelima može se istovremeno dobiti razdioba temperatura i protoci zraka u prostoriji.

Još točniji podaci o kretanju zraka u zgradama mogu se dobiti **mikroskopskim modelima** ventilacije. Svaki infinitezimalno mali obujam karakterizira se s tri varijable: tlakom, temperaturom i brzinom strujanja zraka. Rješenjem sustava parcijalnih diferencijalnih jednadžbi očuvanja mase, energije i količine gibanja mogu se vrlo precizno opisati protoci zraka u prostoriji. Postoje različite tehnike rješavanja diferencijalnih jednadžbi od kojih se najviše koristi numerička metoda konačnih elemenata ili konačnih obujama.

Pri utvrđivanju ukupnog protoka zraka u zgradi moraju se uzeti u obzir sljedeći pojedinačni protoci:

- protok zraka zbog mehaničke, prisilne ventilacije zgrade, $q_{v,sup}$ i $q_{v,exh}$,
- protok zraka zbog prirodne ventilacije pomoću ventilacijskih otvora, $q_{v,inlet}$, i vertikalnih ventilacijskih kanala, $q_{v,passive,duct}$,
- protok zraka kroz mjesta propuštanja u ovojnici zgrade (infiltracije i eksfiltracija), $q_{v,leak}$ ($q_{v,inf}$ i $q_{v,exh}$),
- protok zraka kroz dimnjake s ložištima, $q_{v,comb}$,
- protok zraka zbog otvaranja prozora (prozračivanje), $q_{v,airing}$.

Na slici 5.3 prikazana je shema zgrade s različitim vrstama protoka zraka.



Slika 5.3 Shema zgrade s naznačenim različitim vrstama protoka zraka

U nastavku su prikazane metode proračuna obujamskog protoka zraka, q_v , za svaku od navedenih komponenata izmjene zraka u prostoru zgrade, u skladu s HRN EN 15242 [88]. Protoci zraka proračunavaju se za zgradu ili zonu u zgradi. Zgrada se može podijeliti na različite zone na način da svaka zona ima svoj sustav ventilacije. Pretpostavlja se da nema prenošenja zraka između pojedinih zona ili je ono zanemarivo. Kod proračuna potrošnje energije zanemaruje se unutrašnje pregrađivanje u svakoj zoni. Ulaz zraka u zonu / zgradu smatra se pozitivnim, a izlaz zraka iz zone / zgrade negativnim.

Proračun protoka zraka provodi se u tri koraka. U prvom koraku treba utvrditi formule za izračun pojedinih vrsta protoka za određeni unutarnji referentni tlak zraka, irp . U drugom koraku proračuna se unutarnji referentni tlak zraka u zgradi / zoni iz uvjeta ravnoteže tokova zraka koji ulaze u zgradu / zonu i koji izlaze iz nje. U trećem koraku se za taj izračunati unutarnji referentni tlak proračunavaju pojedinačni protoci zraka. Proračuni se provode za zadano stanje rada sustava ventilacije te za zadano stanje vanjske klime (temperatura i brzina vjetra) i temperature unutarnjeg zraka.

5.5.3 Protok zraka za prisilnu ili mehaničku ventilaciju

Kod proračuna protoka zraka za mehaničku ventilaciju polazi se od nacionalnim propisima zahtijevanog protoka dobavnog zraka, $q_{v,sup,req}$ i odsisnog zraka, $q_{v,exh,req}$, odnosno njihovih projektnih vrijednosti, koje se korigira slijedećim koeficijentima (utjecajima):

- C_{use} koeficijent koji označava da li je ventilator uključen (za razdoblje korištenja, $C_{use} = 1$) ili isključen (za razdoblje nekorištenja, $C_{use} = 0$),
- C_{cont} koeficijent koji ovisi o lokalnoj kontroli (regulaciji) protoka zraka. Za sustav ventilacije s promjenjivim obujmom protoka zraka (VAV sustav), koeficijent C_{cont} je omjer, za dano razdoblje, stvarnog i projektnog protoka zraka. Za proračun energije pretpostavlja se da je $C_{cont} = 1$,
- C_{syst} koeficijent koji izražava činjenicu da nije moguće osigurati točno zahtijevanu minimalnu količinu vanjskog zraka. Njegova vrijednost je ≥ 1 . On uzima u obzir točnost proračuna sustava ventilacije u odnosu na disperziju karakteristika njegovih komponenata. Za proračun energije pretpostavlja se da je $C_{syst} = 1,20$,
- C_{rec} koeficijent recirkulacije (optoka zraka). On se koristi kod VAV ventilacijskog sustava s optočnim zrakom. Njime se uzima u obzir potreba da svaka prostorija ima zahtijevanu količinu vanjskog zraka. Ako je $q_{v,req(i)}$ zahtijevani protok vanjskog zraka za prostoriju i , a $q_{v,sup(i)}$ stvarni protok dobavnog zraka za prostoriju i , koeficijent recirkulacije se može izračunati približno iz izraza:

$$C_{rec} = \left(1 - \max \left(\frac{q_{v,req(i)}}{q_{v,sup(i)}} \right) \right)$$

Da bi se održala granična vrijednost koncentracije onečišćujuće tvari u zraku svake prostorije, može se koristiti izraz:

$$C_{rec} = \frac{1}{\left(1 + \frac{\sum q_{v,req(i)}}{\sum q_{v,sup(i)}} \right)} \left(1 - \max_i \left(\frac{q_{v,req(i)}}{q_{v,sup(i)}} \right) \right) \quad (5.14)$$

- C_{leak} koeficijent propuštanja zraka razvodnih kanala i centralne jedinice za pripremu zraka, AHU (engl. Air Handling Unit).

Protok zraka kroz mjesta propuštanja kanalnog razvoda, $q_{v,duct,leak}$, u m^3/h , proračunava se pomoću izraza:

$$q_{v,duct,leak} = \frac{(A_{duct} \times K \times \Delta p_{duct}^{0,65})}{3600} \quad (5.15)$$

gdje je

A_{duct} ploština kanala prema normi EN 14239 [91], u m^2 ,

Δp_{duct} razlika tlaka između zraka u kanalu i okolnog zraka, u Pa. U kanalnom razvodu dobavnog zraka to je prosjek između razlike tlaka na izlazu AHU jedinice i razlike tlaka vertikalnog uzlaznog strujanja distribucijskog uređaja za zrak. U kanalnom razvodu odsisnog zraka to je prosjek između razlike tlaka vertikalnog silaznog strujanja distribucijskog uređaja za zrak i razlike tlaka na ulazu AHU jedinice.

K propustljivost kanala za zrak, u $m^3/(s \times m^2)$ za razliku tlaka 1 Pa. Određuje se za kanale kružnog presjeka prema HRN EN 12237 [92], a za kanale pravokutnog presjeka u skladu s HRN EN 1507 [93].

Koeficijent propuštanja zraka razvodnih kanala, $C_{duct,leak}$, određuje se prema izrazu:

$$C_{\text{duct,leak}} = 1 + \frac{q_{v,\text{duct,leak}}}{\left(\frac{q_{v,\text{req}} \times C_{\text{cont}} \times C_{\text{syst}}}{\epsilon_v} \right)} \quad (5.16)$$

Isti ovaj izraz koristi se i za zahtijevani protok dobavnog zraka, $q_{v,\text{sup,req}}$, i za zahtijevani protok odsisnog zraka, $q_{v,\text{exh,req}}$.

Koeficijent propuštanja zraka centralne jedinice za pripremu zraka (AHU jedinica), $C_{\text{AHU,leak}}$, određuje se prema izrazu:

$$C_{\text{AHU,leak}} = 1 + \frac{q_{v,\text{AHU,leak}}}{\left(\frac{q_{v,\text{req}} \times C_{\text{cont}} \times C_{\text{syst}}}{\epsilon_v} \right)} \quad (5.17)$$

Ovdje je $q_{v,\text{AHU,leak}}$ protok zraka kroz mjesta propuštanja AHU jedinice određen prema HRN EN 1886 [94].

Razlikuju se dva slučaja, ovisno o položaju centralne jedinice za pripremu zraka, za koja se proračunavaju koeficijenti propuštanja zraka:

1. slučaj: AHU jedinica se nalazi unutar zone zgrade,
2. slučaj: AHU jedinica se nalazi izvan zone zgrade.

Ako je AHU jedinica smještena unutar promatrane zone zgrade, koeficijent propuštanja zraka u zonu je:

$$C_{\text{indoor,leak}} = C_{\text{duct,leak}} \times C_{\text{AHU,leak}} \quad (5.18)$$

a koeficijent propuštanja zraka izvan zone je:

$$C_{\text{outdoor,leak}} = 1 \quad (5.19)$$

Ako je AHU jedinica smještena izvan promatrane zone zgrade, koeficijent propuštanja zraka u zonu je:

$$C_{\text{indoor,leak}} = 1 - R_{\text{indoor,duct}} \times (1 - C_{\text{duct,leak}}) \quad (5.20)$$

a koeficijent propuštanja zraka izvan zone je:

$$C_{\text{outdoor,leak}} = 1 - (1 - C_{\text{duct,leak}}) \times (1 - R_{\text{indoor,duct}}) \times C_{\text{AHU,leak}} \quad (5.21)$$

gdje je

$$R_{\text{indoor,duct}} = \frac{A_{\text{indoor,duct}}}{A_{\text{duct}}} \quad (5.22)$$

$A_{\text{indoor,duct}}$ ploština kanala smještenog unutar zone zgrade.
 A_{duct} ukupna ploština razvodnih kanala.

Ukupni koeficijent propuštanja zraka, C_{leak} , iznosi:

$$C_{\text{leak}} = C_{\text{indoor,leak}} \times C_{\text{outdoor,leak}} \quad (5.23)$$

Pored navedenih koeficijenata u obzir treba uzeti i učinkovitost lokalne ventilacije, ϵ_v . ϵ_v je odnos između koncentracije onečišćujuće tvari u odsisnom zraku i koncentracije onečišćujuće tvari u području disanja. Za proračun energije pretpostavlja se potpuno miješanje zraka tj. $\epsilon_v = 1$.

Mehanički protok zraka doveden u zonu zgrade proračuna se pomoću izraza:

$$q_{v,\text{sup}} = \frac{q_{v,\text{sup,req}} \times C_{\text{cont}} \times C_{\text{indoor,leak}} \times C_{\text{rec}}}{\epsilon_v} \quad (5.24)$$

Mehanički protok zraka odveden iz zone zgrade proračuna se pomoću izraza:

$$q_{v,\text{exh}} = \frac{q_{v,\text{exh,req}} \times C_{\text{cont}} \times C_{\text{indoor,leak}} \times C_{\text{rec}}}{\epsilon_v} \quad (5.25)$$

U slučaju ventilacijskog sustava s konstantnim obujamskim protokom zraka, koji je projektiran da zadovolji svu potrebnu energiju hlađenja, $q_{v,sup}$ se treba izračunati s obzirom na najveće rashladno opterećenje zone zgrade.

Kod proračuna protoka zraka kroz ventilator, u svrhu dimenzioniranja ventilatora, protoku dobavnog zraka u prostoriju, odnosno protoku odsisnog zraka iz prostorije moraju se dodati i protoci zraka kroz mjesta propuštanja za zrak AHU jedinice i kanalnog razvoda i to na dijelu silaznog strujanja zraka od ventilatora za dobavu zraka, odnosno uzlaznog strujanja zraka do ventilatora za otpadni zrak.

Mehanički protok zraka doveden u centralnu jedinicu za pripremu zraka (AHU jedinica) proračuna se pomoću izraza:

$$q_{v,sup,AHU} = \frac{q_{v,sup,req} \times C_{cont} \times C_{leak} \times C_{rec}}{\epsilon_v} \quad (5.26)$$

Mehanički protok zraka odveden iz centralne jedinice za pripremu zraka (AHU jedinica) proračuna se pomoću izraza:

$$q_{v,exh,AHU} = \frac{q_{v,exh,req} \times C_{cont} \times C_{leak} \times C_{rec}}{\epsilon_v} \quad (5.27)$$

Za proračun energije dopušteno je u svakoj promatranoj zoni zanemariti unutarnje pregrade. Za AHU jedinicu smještenu unutar promatrane zone zgrade mogu se zanemariti propuštanja zraka AHU jedinice, ako je ona bila ispitana prema HRN EN 1886 [94] i ako je zadovoljila najmanje razred A3. Za kanalni razvod unutar promatrane zone zgrade, ako vrijednosti A_{duct} i Δp_{duct} nisu poznate, dopušteno je koristiti vrijednosti $C_{duct,leak}$ iz tablice 5.18 i vrijednosti $C_{AHU,leak}$ iz tablice 5.19.

Tablica 5.18 Tipične vrijednosti koeficijenata propuštanja zraka za razvodne kanale, prema HRN EN 15242 [88]

Razred razvodnih kanala	K	Protok zraka, %	$C_{duct,leak}$
2,5 × razred A (preporučena vrijednost)	0,0000675	0,150	1,15
razred A	0,000027	0,060	1,06
razred B	0,000009	0,020	1,02
razred C ili bolji	0,000003	0,000	1,00

Tablica 5.19 Tipične vrijednosti koeficijenata propuštanja zraka za jedinicu za pripremu zraka, prema HRN EN 15242 [88]

Razred AHU jedinice	K	Protok zraka, %	$C_{AHU,leak}$
2,5 × razred L3 (preporučena vrijednost)	0,0000675	0,060	1,06
razred L3	0,000027	0,020	1,02
razred L2	0,000009	0,007	1,01
razred L1 ili bolji	0,000003	0,002	1,00

Ako nije poznat razred razvodnih kanala ili razred AHU jedinice, za proračun se uzima najveća vrijednost $C_{duct,leak}$ iz tablice 5.18, odnosno $C_{AHU,leak}$ iz tablice 5.19.

Za kanalni razvod izvan promatrane zone zgrade, načelno treba uzeti u obzir stvarne karakteristike kanala. Propuštanja kanala za otpadni zrak zanemaruju se. Za centralnu jedinicu za pripremu zraka proračun se treba zasnivati na ispitnoj normi HRN EN 1886 [94]. Jedino ako sustav ventilacije ne služi istovremeno za hlađenje ili grijanje zraka, propuštanja zraka kroz AHU jedinicu smiju se zanemariti.

5.5.4 Protok zraka izazvan prirodnim mehanizmima (infiltracija, eksfiltracija i protok ventilacijskim otvorima)

5.5.4.1 Uvod

Kad govorimo o zrakopropusnosti zgrade mislimo na kvalitetu njene ovojnice. Pod kvalitetom ovojnice zgrade u smislu zrakopropusnosti podrazumijeva se njeno svojstvo da spriječi nekontrolirani ulazak (i izlazak) parazitnog zraka tj. onog koji nije uzet u obzir u projektiranom sustavu ventilacije.

Propustljivost zraka kroz ovojnicu zgrade mijenja se tijekom vremena ovisno o klimatskim uvjetima. Mjesta propuštanja zraka su eventualne pukotine u ovojnici i nedovoljno zabrtvljene reške između pojedinih građevnih dijelova ovojnice zgrade. Intenzitet strujanja zraka kroz mjesta propuštanja ovisi o razlici tlaka s obje strane zračne veze kroz ovojnicu zgrade. Zrak uvijek struji iz područja s višim tlakom prema području s nižim tlakom. Kod toga razlikujemo dva tipa strujanja:

- **infiltraciju**, kada vanjski zrak prodire u prostor zgrade, što se događa u slučaju kada je tlak vanjskog zraka viši od tlaka unutarnjeg zraka, i
- **eksfiltraciju**, kada unutarnji zrak struji prema vanjskom prostoru, što se događa kada je tlak unutarnjeg zraka viši od tlaka vanjskog zraka.

Tokovi infiltracije i eksfiltracije zraka kroz ovojnicu zgrade moraju biti predvidivi i mora se moći upravljati njima, kako bi u prostoru zgrade osigurali potrebnu količinu kvalitetnog zraka bez nepotrebnog trošenja toplinske energije za grijanje i hlađenje.

Kvalitetna ovojnica zgrade u smislu zrakonepropusnosti postiže se istovremeno, s jedne strane, odgovarajućim projektiranjem, i s druge strane, brižljivim izvođenjem koje uvijek treba provjeriti ispitivanjem propustljivosti zraka *in situ*.

Razlika između tlaka unutarnjeg i vanjskog zraka može nastati uslijed dvije različite fizikalne pojave: energije vjetra i efekta dimnjaka (toplinskog vučenja, toplinskog uzgona). Ova razlika tlaka može biti promijenjena u slučaju rada ventilatora u prostoru zgrade. Navedene pojave mogu djelovati pojedinačno ili u međusobnoj kombinaciji. Vjetar povećava tlak zraka na pročeljima zgrade koja su izložena vjetru, a uz pročelja u zavjetrini nastaje podtlak. Efekt dimnjaka osniva se na činjenici da je topli zrak lakši i diže se uvis, tako da, tijekom zime, u gornjim dijelovima zgrade nastaje nadtlak, a u donjim dijelovima zgrade nastaje podtlak. Zbog toga u donjim dijelovima ovojnice zgrade dolazi do infiltracije zraka što nazivamo efekt dimnjaka.

Isti prirodni mehanizmi uzrok su izmjene zraka kroz projektirane ventilacijske otvore u ovojnici zgrade, što nazivamo **prirodnom ventilacijom** prostora zgrade.

U slučaju odsisnog sustava ventilacije smanjuje se tlak zraka u zgradi u odnosu na tlak vanjskog zraka što povećava infiltraciju. Kod tlačnog sustava tlak unutarnjeg zraka je viši od tlaka vanjskog zraka što povećava eksfiltraciju. U slučaju uravnoteženog sustava mehaničke ventilacije količina dobavnog zraka može biti povećana ili smanjena u odnosu na odsisni zrak, zbog čega dolazi do povećanja odnosno smanjenja tlaka unutarnjeg zraka u odnosu na okolicu.

5.5.4.2 Tlak zraka

Fizikalna veličina tlak, p , omjer je sile F_N i ploštine A plohe na koju ta sila okomito djeluje:

$$p = \frac{F_N}{A} \quad (5.28)$$

U međunarodnom sustavu mjernih jedinica (SI) jedinica za tlak je njutn po kvadratnom metru (znak: N/m^2). Ta mjerna jedinica je dobila naziv paskal (oznaka: Pa):

$$1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ Pa} \quad (5.29)$$

Posebni dopušteni naziv za višekratnik 10^5 Pa je bar (oznaka: bar):

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} \quad (5.30)$$

Na jedinicu bar smiju se primjenjivati dekadski i decimalni višekratnici.

Uz navedene jedinice ponekad se susreće i stara jedinica tlaka „fizikalna atmosfera“ (oznaka: atm) definirana odnosom:

$$1 \text{ atm} = 101\,325 \text{ Pa} = 1,01325 \text{ bar} \quad (5.31)$$

Kod fluida (zajednički naziv za tekućine i plinove – tvari koje nemaju stalan oblik) razlikujemo nekoliko vrsta tlakova. Tlak uzrokovan težinom mirnog fluida nazivamo **hidrostatski tlak**. Težina G stupca fluida visine h je:

$$G = m \times g = V \times \rho \times g = h \times A \times \rho \times g \quad (5.32)$$

gdje je

m	masa fluida,
g	ubrzanje Zemljine sile teže,
V	obujam fluida,
ρ	gustoća fluida,
h	visina stupca fluida,
A	ploština horizontalnog presjeka stupca fluida.

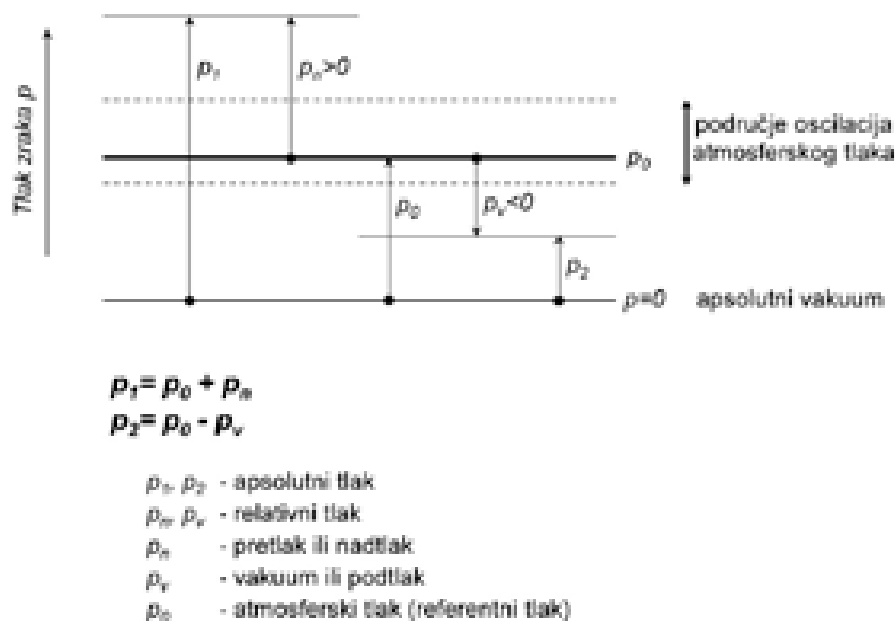
Tlak, p , kojim fluid pritišće na svoju podlogu iznosi:

$$p = \frac{G}{A} = h \times \rho \times g \quad (5.33)$$

Hidrostatski tlak, p , ovisi, dakle, o visini stupca fluida, h , njegovoj gustoći, ρ , i ubrzanju Zemljine sile teže, g . Ubrzanje Zemljine sile teže, g , je ubrzanje slobodnog pada u gravitacijskom polju Zemlje. Dogovorno je utvrđena standardna vrijednost ubrzanja sile teže na razini mora u iznosu $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$, koja se obično zaokružuje na $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

Tlak kojim zračni omotač Zemlje – atmosfera pritišće na svako tijelo na površini Zemlje nazivamo **atmosferski tlak** ili **okolišni tlak**, p_0 . Atmosferski tlak je tlak stupca zraka koji se proteže od Zemljine površine do vrha atmosfere (visine oko 560 km) i vlastitom težinom pritišće površinu Zemlje. On se mijenja s promjenom nadmorske visine. Na morskoj površini (referentna visina) atmosferski tlak iznosi prosječno oko 101 325 Pa. S porastom nadmorske visine tlak zraka se smanjuje približno 12 Pa/m.

Atmosferski tlak najčešće se smatra referentnim tlakom u mjerenjima tlaka na Zemlji. Višak tlaka iznad atmosferskog (referentnog) nazivamo **pretlakom** ili **nadtlakom**, p_n , a manjak tlaka ispod atmosferskog (referentnog) nazivamo **vakuomom** ili **podtlakom**, p_v . Stvarni tlak plina ili tekućine, p , nazivamo **apsolutnim tlakom**. Apsolutni tlak se računa od apsolutnog vakuuma tj. tlaka u praznom prostoru ($p = 0$). Razliku između apsolutnog tlaka i referentnog tlaka nazivamo **relativni tlak**. Apsolutni tlak je, dakle, zbroj referentnog i relativnog tlaka. Međusobni odnosi različitih vrsta tlakova prikazani su na slici 5.4.



Slika 5.4 Međusobni odnosi različitih vrsta tlakova

Ovisno o promjeni tlaka i temperature mijenja se gustoća plinova i tekućina. S promjenom gustoće fluida mijenjaju se i druga njegova svojstva, npr. specifična toplota, specifična unutarnja energija i dr. Radi pojednostavnjenja dogovoreno je da se normiraju vrijednosti temperature i tlaka na koje treba svesti o njima ovisne fizikalne veličine. Stanje tvari pri normiranom tlaku i temperaturi nazivamo **normirano stanje**. Tako je „fizikalno normirano stanje“ definirano vrijednostima temperature:

$$T = T_0 = 273,15 \text{ K } (\theta = \theta_0 = 0 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (5.34)$$

i tlaka:

$$p = p_0 = 1 \text{ atm} = 101\,325 \text{ Pa} \quad (5.35)$$

Ovdje je, dakle, vrijednost normirane temperature zadana ledištem vode, a vrijednost normiranog tlaka jednom „fizikalnom atmosferom“.

Ispitivanjima je utvrđeno da se obujam plina, kod zagrijavanja pri stalnom tlaku, mijenja prema izrazu:

$$V = V_0 \times (1 + \alpha \times \theta) \quad (5.36)$$

gdje je

- V obujam plina zagrijan na konačnu temperaturu θ ,
- V_0 obujam plina na početnoj temperaturi $\theta = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$,
- θ konačna temperatura plina, u $^\circ\text{C}$,
- α koeficijent proporcionalnosti koji za sve plinove ima vrijednost

$$\alpha = \frac{1}{(273,15 \text{ } ^\circ\text{C})} \quad (5.37)$$

Uvrštavanjem navedene vrijednosti za α u izraz (5.36) dobije se:

$$V = V_0 \times \left(1 + \frac{\theta}{273,15}\right) = V_0 \times \left[\frac{(273,15 + \theta)}{273,15}\right] = \frac{V_0 \times T}{T_0} \quad (5.38)$$

odnosno:

$$\frac{V}{T} = \frac{V_0}{T_0} = \text{konst.} \quad (5.39)$$

ili sasvim općenito:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} = \text{konst.} \quad (5.40)$$

To znači da kod izobarnih promjena (stalnog tlaka) količnik obujma plina i termodinamičke temperature plina ostaje konstantan (Gay-Lussacov zakon).

Ako u izraz (5.39) umjesto obujma uvrstimo $V = m/\rho$, dobiti ćemo da je:

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \frac{T}{T_0} \quad (5.41)$$

Promjena tlaka zraka u zgradi je zanemariva u odnosu na vrijednost atmosferskog tlaka tako da se može smatrati da je tlak zraka u zgradi konstantan tj. da promjena gustoće zraka ovisi jedino o promjeni njegove temperature. Primjerice, gustoća zraka temperature $T_0 = 273,15$ K iznosi $\rho_0 = 1,293$ kg/m³, a gustoća zraka, ρ , u kg/m³, na bilo kojoj temperaturi T , u K, iznositi će:

$$\rho = \rho_0 \times \left(\frac{T_0}{T} \right) = \frac{(1,293 \times 273,15)}{T} = \frac{353,2}{T} \quad (5.42)$$

Promjena obujma zraka u manjoj mjeri ovisi i o promjeni koncentracije vodene pare u zraku, ali se njen utjecaj obično zanemaruje.

5.5.4.3 Promjena hidrostatskog tlaka zraka

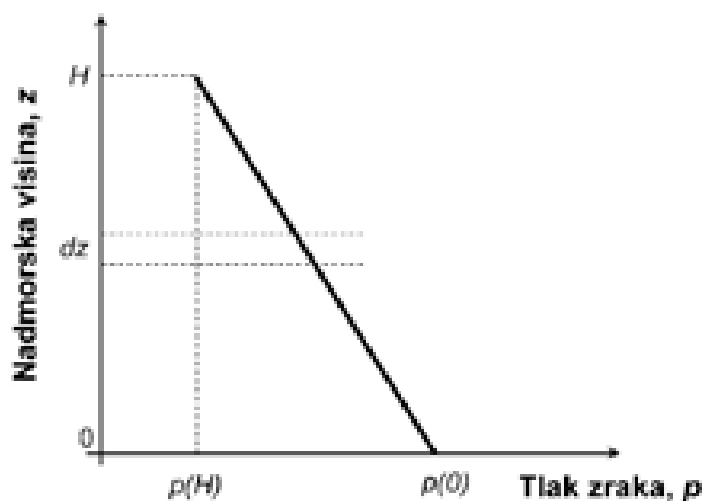
Zrak u stanju mirovanja podvrgnut je polju Zemljine gravitacije, g , uslijed čega nastaje hidrostatski tlak koji ovisi o obujamskoj masi zraka, ρ , i nadmorskoj visini, z , promatrane točke. Elementarni hidrostatski tlak zraka, dp , uslijed sloja zraka debljine dz je:

$$dp = -\rho \times g \times dz \quad (5.43)$$

Integracijom izraza (5.43) dobije se izraz za hidrostatski tlak zraka $p(z)$ na bilo kojoj visini z , u obliku:

$$p(z) = p_0 - \rho \times g \times z \quad (5.44)$$

gdje je p_0 atmosferski tlak zraka na razini mora (za $z = 0$).



Slika 5.5 Shematski prikaz promjene hidrostatskog tlaka zraka s nadmorskom visinom

Kod proračuna prirodne izmjene zraka u zgradi obično se hidrostatski tlak zraka računa u odnosu na referentnu ravninu na visini h_{ref} (obično pod proračunske zone zgrade). U tom slučaju hidrostatski tlak zraka na visini h iznad referentne ravnine iznosi:

$$p(h) = p_0(h_{\text{ref}}) - \rho \times g \times h \quad (5.45)$$

gdje je $p_0(h_{\text{ref}})$ atmosferski tlak na referentnoj ravnini, a h je udaljenost promatrane točke iznad referentne ravnine.

5.5.4.4 Bernoullijeva jednadžba

Gibanje fluida nazivamo **strujanjem**. Strujanje nastaje zbog razlike u tlakovima. Zamišljenu liniju u fluidu čija tangenta u svakoj točki pokazuje smjer strujanja nazivamo **strujnica**. Tamo gdje je veća brzina fluida strujnice su bliže jedna drugoj i obrnuto. Dio fluida omeđen strujnicama nazivamo **strujnom cijevi**.

Bernoullijeva jednadžba govori o raspodjeli tlakova unutar strujne cijevi, za stacionarno strujanje idealnog plina. Strujanje je stacionarno ako se u određenoj točki fluida brzina i tlak fluida s vremenom ne mijenjaju (a mogu se mijenjati od jedne do druge točke fluida). Idealni fluid je fluid kod kojeg je zanemareno trenje između njegovih čestica. Zakoni koji vrijede za idealni fluid najčešće se mogu primijeniti i na realni fluid.

Za strujnu cijev prikazanu na slici 5.6 Bernoullijeva jednadžba glasi:

$$p_1 + \rho \times g \times h_1 + 0,5 \times \rho \times v_1^2 = p_2 + \rho \times g \times h_2 + 0,5 \times \rho \times v_2^2 \quad (5.46)$$

ili općenito:

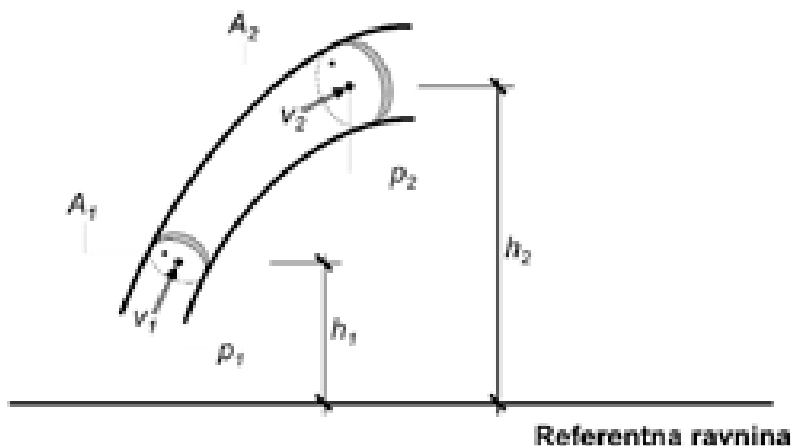
$$p + \rho \times g \times h + 0,5 \times \rho \times v^2 = \text{konst.} \quad (5.47)$$

Ovdje je

- p statički tlak,
- ρ gustoća fluida,
- g ubrzanje Zemljine sile teže ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$),
- h visina težišta poprečnog presjeka strujne cijevi iznad referentne horizontalne ravnine,
- v brzina fluida u promatranoj točki.

Član $0,5 \times \rho \times v^2$ nazivamo **dinamički tlak** ili **zaustavni tlak**. To je tlak kojim bi struja fluida djelovala na beskonačno malu prepreku koja bi se suprotstavila tom strujanju ne stvarajući poremećaje u samom strujanju.

Prema jednadžbi (5.47) u svakoj točki strujne cijevi zbroj statičkog tlaka, p , hidrostatskog tlaka, $\rho \times g \times h$, uzrokovanog visinskom razlikom h pojedinih dijelova fluida i dinamičkog tlaka, $0,5 \times \rho \times v^2$, uzrokovanog kretanjem fluida, uvijek je konstantan.



Slika 5.6 Prikaz strujne cijevi za izvod Bernoullijeve jednadžbe

Kad neki fluid struji kroz strujnu cijev različitog presjeka, tada je strujanje u suženom dijelu cijevi brže nego u proširenom dijelu. Ondje gdje je brzina fluida veća statički tlak je manji, a gdje je brzina fluida manja tlak je veći.

Pomoću Bernoullijeve jednadžbe možemo proračunati razliku tlakova između dvije toplinske zone i zatim proračunati prirodni protok zraka kroz svaku zračnu vezu u ovojnici zgrade između različitih zona.

5.5.4.5 Brzina vjetra

Velika strujanja zraka na globalnoj razini, koja nazivamo vjetar, prouzročena su razlikama tlaka i temperature u atmosferi. Da bi se odredio tlak kojim vjetar pritišće na ovojnicu zgrade potrebni su podaci o smjeru i brzini vjetra na lokaciji promatrane zgrade, v_{site} . Vjetar je vrlo promjenjiva pojava kako po svom smjeru tako i po svojoj brzini. Za dobivanje što vjernijih podataka o karakteristikama vjetra najpovoljnije bi bilo provesti direktna mjerenja brzine i smjera vjetra na lokaciji zgrade. Brzina vjetra mjeri se anemometrom, a smjer vjetra sa zastavom. Srednja referentna vrijednost brzine vjetra određuje se preko vremenskog intervala od 10 min do 60 min. Na jednaki vremenski odsječak svodi se i srednji smjer strujanja vjetra.

Ako mjerenja na lokaciji promatrane zgrade, iz bilo kojeg razloga, nisu provediva, koriste se podaci o srednjoj brzini vjetra izmjerenoj na najbližoj meteorološkoj postaji, v_{meteo} . Ta mjerenja se u pravilu provede na ravnom terenu (najčešće na aerodromima) na visini 10 metara iznad tla.

Brzina vjetra raste s povećanjem visine iznad tla. Na brzinu strujanja zraka u niskim slojevima atmosfere blizu površine tla jako utječe priroda tla tj. njena hrapavost. Srednja brzina vjetra se smanjuje u mjeri u kojoj se povećava hrapavost tla. Uz samu površinu tla brzina vjetra je 0 m/s. Općenito, za jednaku brzinu i jednaku visinu iznad tla, brzina vjetra se smanjuje kada hrapavost tla raste. Tek na većim visinama iznad tla, utjecaj hrapavosti površine zemlje na brzinu vjetra je praktički zanemariv.

Karakteristike lokacije promatrane zgrade u pogledu hrapavosti terena su općenito različite od onih u blizini meteorološke postaje, tako da je potrebno meteorološke podatke preračunati u vrijednosti koje će biti reprezentativnije za okolicu promatrane zgrade. Da bi se izvršio popravak brzine vjetra, v_{meteo} , zbog razlike u hrapavosti terena između lokacije promatrane zgrade i lokacije meteorološke postaje, teren lokacije zgrade treba svrstati u jedan od tri razreda hrapavosti:

- otvoren, ravan teren,
- prigradsko ili seosko područje,
- gradsko područje.

Prema normi HRN EN 15242 [88] popravni faktor za preračunavanje brzine vjetra na meteorološkoj postaji, v_{meteo} , u brzinu vjetra na lokaciji promatrane zgrade, v_{site} , ovisno o razredu terena u pogledu hrapavosti, treba uzeti iz tablice 5.20.

Tablica 5.20 Popravni faktor $v_{\text{site}} / v_{\text{meteo}}$ na visini 10 m iznad tla, prema HRN EN 15242 [88]

Razred terena	Parametar hrapavosti z_0 na lokaciji zgrade, u m	$v_{\text{site}} / v_{\text{meteo}}$
Otvoren, ravan teren	0,03	1,0
Prigradsko ili seosko područje	0,25	0,9
Gradsko područje	0,50	0,8

Hrapavost površine terena karakterizira se parametrom hrapavosti z_0 u metrima, koji nazivamo **visina (duljina) hrapavosti**, a označava visinu iznad tla na kojoj bi srednja brzina vjetra teoretski bila jednaka nuli. Vrijednost z_0 određuje se eksperimentalno.

U sloju zraka uz tlo vjetar je jako kočen raznim preprekama na tlu. Udaljavanjem od površine tla brzina vjetra se povećava kao logaritamska funkcija visine. Na određenoj visini iznad tla vjetar više nije pod utjecajem hrapavosti površine tla. U literaturi postoji više matematičkih izraza, raznih autora, kojima se može odrediti profil vjetra na lokaciji promatrane zgrade u ovisnosti o hrapavosti terena i srednjoj brzini vjetra na referentnoj visini od 10 metara. U normi HRN EN 15242 [88] koristi se izraz:

$$v_2 = v_1 \times \left[\frac{\ln \left(\frac{h_2}{z_0} \right)}{\ln \left(\frac{h_1}{z_0} \right)} \right] \quad (5.48)$$

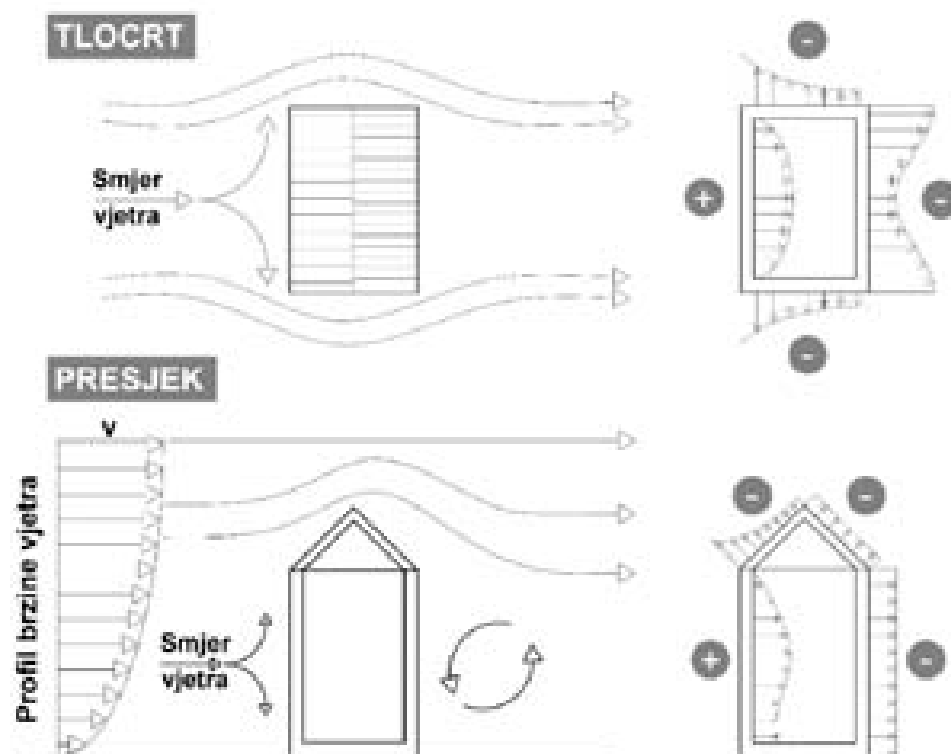
gdje je

v_1 referentna brzina vjetra u m/s, na visini h_1 iznad tla u metrima,
 v_2 brzina vjetra u m/s, na visini h_2 iznad tla u metrima,
 z_0 visina hrapavosti u metrima prema tablici 5.20.

Izraz (5.48) može se primijeniti za brzine vjetra $v > 2$ m/s i visine iznad tla $h > 20 \times z_0$.

5.5.4.6 Tlak vjetra

Vjetar stvara oko zgrade polje brzina strujanja zraka i polje tlakova koji su promjenjiva intenziteta. Pročelje zgrade koje je izloženo udaru vjetra nalazi se u nadtlaku što uzrokuje infiltraciju, a nasuprotno pročelje koje je u zavjetrini, te područja s usporednim strujanjem zraka biti će u podtlaku što uzrokuje eksfiltraciju. Tlakovi na drugim dijelovima ovojnice zgrade mogu biti pozitivni (nadtlak) ili negativni (podtlak), ovisno o kutu upada vjetra na ravninu ovojnice. Na slici 5.7 shematski je prikazan primjer zgrade izložene djelovanju vjetra, s uvjetima tlaka zraka na pročeljima.



Slika 5.7 Shematski prikaz strujanja zraka oko zgrade s prikazom tlaka zraka

U ravnini pročelja brzina kretanja zraka je nula i sva kinetička energija vjetra pretvara se u statički tlak. Ispitivanjima je utvrđeno da je stvarni tlak $p(z)$ kojim vjetar tlači točku pročelja zgrade na visini z , direktno proporcionalan s dinamičkim tlakom, $p_{\text{dyn}}(z)$, na istoj visini z :

$$p(z) = C_p \times p_{\text{dyn}}(z) \quad (5.49)$$

gdje je, u skladu s Bernoullijevom jednadžbom:

$$p_{\text{dyn}}(z) = 0,5 \times \rho \times v^2(z) \quad (5.50)$$

Ovdje je ρ gustoća vanjskog zraka, a $v(z)$ je srednja brzina vjetra na visini z , neporemećena uslijed prisustva zgrade.

Gustoća zraka, ρ , ovisi o temperaturi zraka, θ , i relativnoj vlažnosti zraka, φ (vidjeti tablicu 5.21)

Tablica 5.21 Gustoća zraka na normiranom atmosferskom tlaku 101 325 Pa

Temperatura, θ , °C	Gustoća, ρ , kg/m ³		
	Suhi zrak ($\varphi = 0$ %)	Vlažni zrak ($\varphi = 50$ %)	Zasićen zrak ($\varphi = 100$ %)
-20	1,396	1,395	1,395
-15	1,368	1,368	1,367
-10	1,342	1,342	1,341
-5	1,317	1,316	1,315
0	1,293	1,291	1,290
5	1,270	1,268	1,266
10	1,247	1,244	1,241
15	1,225	1,222	1,218
20	1,204	1,199	1,194
25	1,184	1,177	1,170
30	1,165	1,155	1,146
35	1,146	1,134	1,022
40	1,127	1,112	1,096
45	1,110	1,090	1,070

Faktor proporcionalnosti C_p nazivamo **koeficijent tlaka vjetra**. On kvantificira razdiobu tlaka vjetra na vanjskoj ovojnici zgrade. Za područja ovojnice zgrade gdje vlada nadtlak njegova je vrijednost pozitivna, a za područja s podtlakom negativna (sisajuće djelovanje vjetra). Koeficijent tlaka vjetra, C_p , je faktor koji uzima u obzir aerodinamičke uvjete na pročelju zgrade. On ovisi o obliku (geometriji) zgrade, položaju promatrane točke na ovojnici zgrade, smjeru vjetra i eventualnim preprekama (građevine, vegetacija,...) ispred promatrane zgrade iz smjera puhanja vjetra. U pravilu se određuje eksperimentalno u aerodinamičkom tunelu na smanjenim modelima zgrade. Aerodinamički tunel ili zračni tunel je uređaj za ispitivanje aerodinamičkih svojstava tijela, odnosno za određivanje slike strujanja fluida i sila koje na

tijelo djeluju kada se ono nalazi u struji fluida. Vrijednosti koeficijenta tlaka vjetra, C_p , dobivene ovakvim ispitivanjima objavljene su u stručnoj literaturi.

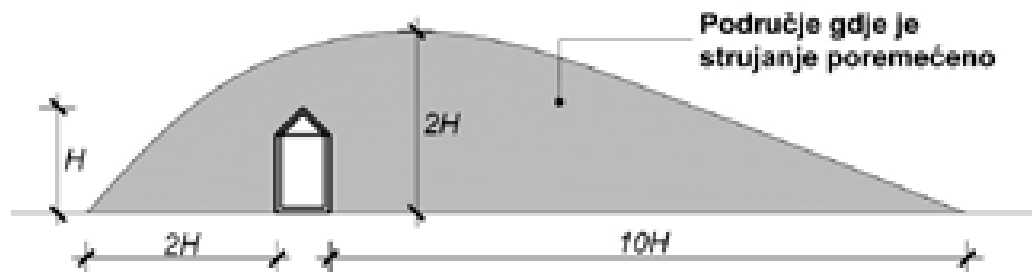
Postupak određivanja koeficijenta tlaka vjetra, C_p , s kojim treba računati protok zraka kroz zgradu kod proračuna potrošnje energije za grijanje i hlađenje, definiran je u normi HRN EN 15242 [88]. Prvi korak tog postupka je da se promatrana zgrada po visini podijeli u tri dijela:

- niski dio, visine od nula do 15 metara,
- srednji dio, visine od 15 metara do 50 metara, uključivo i te visine,
- visoki dio, visine iznad 50 metara.

Visina zgrade je visina od razine terena na ulazu u zgradu do razine vrha krova. Utjecaj promjene brzine vjetra s visinom zgrade uzima se u obzir pomoću navedene tri kategorije zgrade prema visini. Za svaku proračunsku zonu zgrade vrijednost koeficijenta C_p odabire se ovisno o prosječnoj visini pročelja zone iznad razine tla. Ako je prosječna visina zone manja od 15 m iznad terena, odabire se vrijednost C_p pročelja za niski dio zgrade. Ako je prosječna visina zone između 15 m i 50 m iznad terena ili je jednaka tim vrijednostima, odabire se vrijednost C_p za srednji dio pročelja. Za prosječnu visinu zone veću od 50 m, uzima se C_p koji vrijedi za visoki dio pročelja.

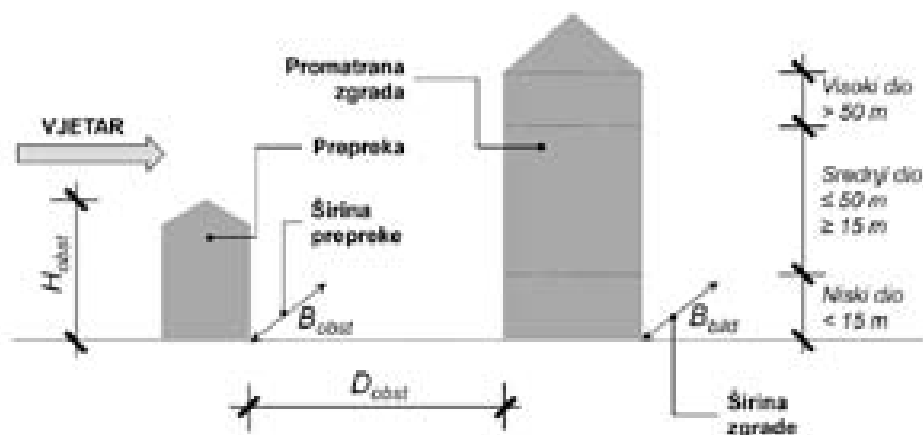
Na strujanje zraka bitno utječu hrapavost terena na lokaciji zgrade i eventualne prepreke u vidu građevina ili vegetacije u blizini promatrane zgrade iz smjera puhanja vjetra. Utjecaj hrapavosti terena na brzinu vjetra uzet je u obzir kod određivanja referentne brzine vjetra na lokaciji zgrade, v_{site} . Utjecaj prepreka u okolini zgrade uzima se u obzir kod određivanja koeficijenta tlaka vjetra, C_p .

Smatra se da je strujanje zraka oko prepreke, koja se nalazi u smjeru puhanja vjetra, poremećeno u području prikazanom na slici 5.9.



Slika 5.8 Shematski prikaz područja u kojem je strujanje poremećeno zbog prisutnosti određene prepreke vjetru

Ako je za dio pročelja strujanje zraka poremećeno nekom preprekom u blizini promatrane zgrade potrebno je odrediti **razred zaklonjenosti** zgrade tom preprekom. Razred zaklonjenosti karakterizira učinak prepreke, a određuje se prema relativnoj visini, širini i udaljenosti mjerodavne prepreke u odnosu na promatranu zgradu (vidjeti sliku 5.9).



Slika 5.9 Prepreka i promatrana zgrada.

Za zadani smjer puhanja vjetra prepreka je definirana kao bilo kakva zgrada ili predmet na koji nailazi vjetar prije nego dosegne pročelje promatrane zgrade, za koji je

$$\frac{B_{\text{obst}}}{B_{\text{build}}} > 0,5 \quad (5.51)$$

Ovdje je B_{obst} širina najbliže prepreke, a B_{build} je širina promatrane zgrade.

Postoje tri razreda zaklonjenosti:

- otvoren,
- običan,
- zaklonjen.

Dio pročelja promatrane zgrade, koji može biti zaklonjen određenom preprekom, određuje se na slijedeći način:

- ako je $H_{\text{obst}} \geq 0,5 \times (\min(H_{\text{build}}, 15))$ onda niski dio pročelja može biti zaklonjen,
- ako je $(H_{\text{obst}} - 15) \geq 0,5 \times (\min(35; (H_{\text{build}} - 15)))$ onda niski i srednji dio pročelja mogu biti zaklonjeni,
- gornji (visoki) dio pročelja uvijek se smatra nezaklonjenim, dakle pripada razredu zaklonjenosti „otvoren“.

Razred zaklonjenosti ovisi o omjeru $D_{\text{obst}} / H_{\text{obst}}$. H_{obst} je visina najbliže prepreke, a D_{obst} je razmak između najbliže prepreke i zgrade. Razred zaklonjenosti odabire se prema podacima iz tablice 5.22.

Tablica 5.22 Razredi zaklonjenosti u ovisnosti o vrijednosti odnosa $D_{\text{obst}} / H_{\text{obst}}$

Razred zaklonjenosti	Vrijednost odnosa $D_{\text{obst}} / H_{\text{obst}}$
otvoren	>4
običan	1,5 – 4
zaklonjen	<1,5

U skladu s dijelom pročelja i razredom zaklonjenosti u tablici 5.23 dane su vrijednosti koeficijenta tlaka vjetra, C_p . Ovi koeficijenti vrijede za smjer vjetra od približno $\pm 60^\circ$ prema osi pročelja.

Tablica 5.23 Koeficijent tlaka vjetra, C_p (prema HRN EN 15242 [88])

Dio pročelja	Razred zaklonjenosti	Koeficijent tlaka vjetra, C_p				
		Pročelje izloženo vjetru, C_{p1}	Pročelje u zavjetrini C_{p2}	Krov (ovisno o nagibu), C_{p3}		
				< 10 °	10° - 30°	>30°
niski dio	otvoren	+ 0,50	-0,70	-0,70	-0,60	-0,20
	običan	+ 0,25	-0,50	-0,60	-0,50	-0,20
	zaklonjen	+ 0,05	-0,30	-0,50	-0,40	-0,20
srednji dio	otvoren	+ 0,65	-0,70	-0,70	-0,60	-0,20
	običan	+ 0,45	-0,50	-0,60	-0,50	-0,20
	zaklonjen	+ 0,25	-0,30	-0,50	-0,40	-0,20
visoki dio	otvoren	+ 0,80	-0,70	-0,70	-0,60	-0,20

Postoje dva tipa zgrada ili zona: bez poprečne ventilacije (propuha) ili jednostavne izloženosti i s poprečnom ventilacijom (propuhom) ili složene izloženosti. Vrijednosti koeficijenata C_p iz tablice 5.23 vrijede za zgradu kod koje je moguća poprečna ventilacija. Za zgrade kod kojih nije moguća poprečna ventilacija, koeficijent tlaka vjetra za pročelje izloženo vjetru je +0,05, a za pročelje u zavjetrini je -0,05.

Koeficijenti iz tablice 5.23 primjenjuju se za proračun protoka infiltracijskog zraka i kod proračuna protoka zraka prirodnom ventilacijom kroz ventilacijske otvore.

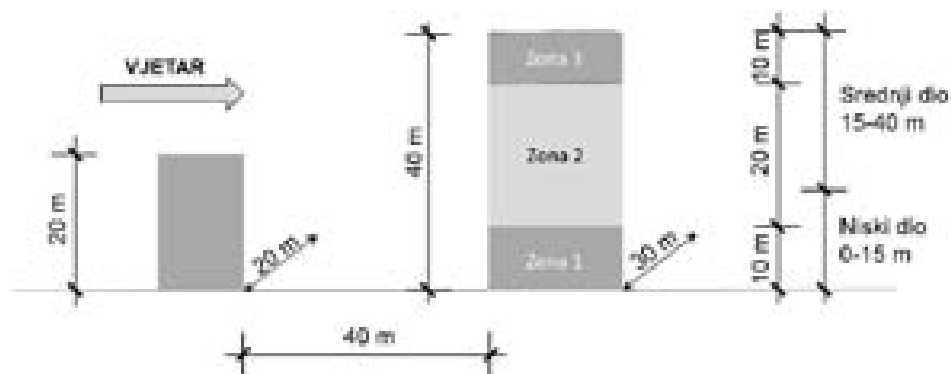
Primjer 5.4

Zgrada visine $H_{\text{build}} = 40$ m i širine $B_{\text{build}} = 30$ m nalazi se u seoskom području. Prosječna izmjerena brzina vjetra iz smjera sjevera, na najbližoj meteorološkoj postaji, iznosila je $v_{\text{meteo}} = 4$ m/s. Sjeverno od promatrane zgrade, na udaljenosti $D_{\text{obst}} = 40$ m smještena je manja zgrada visine $H_{\text{obst}} = 20$ m i širine $B_{\text{obst}} = 20$ m. Promatrana zgrada ima tri proračunske zone:

- zona 1, visine od 0 do 10 m,
- zona 2, visine od 10 do 30 m,
- zona 3, visine od 30 do 40 m.

Treba provjeriti da li manja zgrada djeluje kao prepreka strujanju vjetra za promatranu zgradu te odrediti odgovarajuće koeficijente tlaka vjetra, C_p , i proračunati odgovarajuće tlakove zraka, p .

Shematski prikaz promatrane zgrade i prepreke dan je na slici 5.10.



Slika 5.10 Shematski prikaz zgrade i prepreke uz primjer 5.4

Prema tablici 5.20 za seosko područje je:

$$v_{\text{site}} = 0,9 \times v_{\text{meteo}} = 0,9 \times 4 = 3,6 \text{ m/s}$$

Budući da je $B_{\text{obst}} / B_{\text{build}} = 20 / 30 = 0,67 > 0,5$ manja zgrada se može promatrati kao prepreka strujanju zraka iz smjera sjever $\pm 60^\circ$.

Kako je $H_{\text{obst}} = 20 \text{ m}$, zadovoljena je nejednadžba:

$$H_{\text{obst}} > 0,5 \times (\min(40; 15)) = 0,5 \times 15 = 7,5 \text{ m}$$

To znači da niski dio pročelja (od 0 do 15 m) može biti zaklonjen. Kako je $D_{\text{obst}} / H_{\text{obst}} = 40/20 = 2$, razred zaklonjenosti za niski dio pročelja je „običan“.

Za srednji dio pročelja promatrane zgrade je:

$$(H_{\text{obst}} - 15) = 20 - 15 = 5 < 0,5 \times (\min(35; (40 - 15))) = 0,5 \times 25 = 12,5 \text{ m}$$

pa srednji dio pročelja promatrane zgrade pripada razredu zaklonjenosti „otvoren“. Isti razred zaklonjenosti vrijedi i za krov zgrade.

Odgovarajući koeficijenti tlaka vjetra, C_p , prema tablici 5.23 navedeni su u tablici 5.24.

Tablica 5.24 Koeficijenti tlaka vjetra za zgradu iz primjera 5.4

Dio pročelja	Razred zaklonjenosti	Koeficijent tlaka vjetra, C_p				
		Pročelje izloženo vjetru, C_{p1}	Pročelje u zavjetrini C_{p2}	Krov (ovisno o nagibu), C_{p3}		
				< 10 °	10° - 30°	>30°
niski dio za sjeverni vjetar $\pm 60^\circ$	običan	+ 0,25	-0,50	-0,60	-0,50	-0,20
niski dio za drugi smjer vjetra	otvoren	+ 0,50	-0,70	-0,70	-0,60	-0,20
srednji dio	otvoren	+ 0,65	-0,70	-0,70	-0,60	-0,20

Vrijednosti C_p s kojima treba proračunati tlak vjetra odabiru se prema prosječnoj visini proračunske zone u odnosu na razinu tla:

- prosječna visina zone 1 je $10/2 = 5 \text{ m}$, uzima se C_p za niski dio pročelja,
- prosječna visina zone 2 je $(10 + 30)/2 = 20 \text{ m}$, uzima se C_p za srednji dio pročelja,
- prosječna visina zone 3 je $(30 + 40)/2 = 35 \text{ m}$, uzima se C_p za srednji dio pročelja.

Tlak vjetra na pročelju predmetne zgrade iznositi će:

$$p_w = 0,5 \times \rho \times C_p \times v_{\text{site}}^2$$

Za srednju temperaturu vanjskog zraka 10°C , gustoća zraka je $\rho = 1,247 \text{ kg/m}^3$, pa će tlak vjetra u paskalima iznositi:

$$p_w = 0,5 \times 1,247 \times C_p \times 3,6^2$$

$$p_w = 8,09 \times C_p$$

5.5.4.7 Razlika između tlaka zraka unutar zgrade i tlaka zraka u vanjskom prostoru

Protok zraka kroz svaku pojedinu zračnu vezu između unutarnjeg prostora zgrade / zone i vanjskog prostora, bilo da se radi o slučajno nastaloj pukotini, nedovoljno zabrtvljenoj reški između građevnih dijelova zgrade ili o namjerno projektiranom ventilacijskom otvoru u

ovojnici zgrade, nazivamo **komponentom protoka zraka**. Za svaku komponentu potrebno je proračunati razliku apsolutnog tlaka zraka s vanjske i unutarnje strane ovojnice zgrade. Ta razlika tlaka je pogonska sila koja izaziva strujanje zraka kroz zračne veze u ovojnici zgrade/zone. Do razlike tlaka dolazi ili zbog različitih gustoća (različitih temperatura) unutarnjeg i vanjskog zraka što izaziva efekt dimnjaka (toplinskog uzgona, toplinskog vučenja) ili zbog djelovanja vjetra na ovojnicu zgrade.

Vjetar osim što tlači na ovojnicu zgrade, djeluje i na promjenu tlaka unutar zgrade. Ta promjena rezultat je potrebe da se postigne ravnoteža između, s jedne strane, infiltracije zraka kroz dio ovojnice zgrade koji je u nadtlaku i, s druge strane, eksfiltracije zraka kroz dio ovojnice zgrade koji je u podtlaku.

Razlika tlaka Δp_w kojoj je izložena ovojnica zgrade zbog djelovanja vjetra ovisi, dakle, o tlaku vjetra na površini oplošja zgrade, p_w , i o unutarnjem referentnom tlaku, irp :

$$\Delta p_w = p_w - irp \quad (5.52)$$

Na vrijednost irp utječu karakteristike i položaj mjesta propuštanja zraka u ovojnici zgrade. Princip proračuna irp sastoji se u iterativnom određivanju njegove vrijednosti kojom se izjednačava infiltracija s eksfiltracijom zraka uzimajući u obzir karakteristike različitih zračnih veza kroz ovojnicu zgrade.

Primjer 5.5

Neka je tlak vjetra na izloženom pročelju 16 Pa, a na pročelju u zavjetrini -22 Pa. Pretpostavlja se da su sva ostala pročelja i krov potpuno nepropusni za zrak. Ako oba promatrana pročelja (izloženo i u zavjetrini) imaju jednaku propustljivost zraka onda oni moraju biti podvrgnuti jednakoj vrijednosti razlike tlaka vanjskog i unutarnjeg zraka, ali suprotnog predznaka, kako bi kroz njih prolazio jednak protok zraka, jedan u unutrašnjost zgrade i drugi prema vanjskom prostoru.

U ovom slučaju, vrijednost irp uslijed djelovanja vjetra mora zadovoljiti jednadžbu:

$$\Delta p_{inf} = -\Delta p_{exh}$$

odnosno:

$$16 - irp = -(-22 - irp)$$

Rješenjem jednadžbe dobije se da je $irp = -3$ Pa. Pročelje izloženo vjetru podvrgnuto je razlici tlaka $\Delta p_w = 16 - (-3) = 19$ Pa, a pročelje u zavjetrini razlici tlakova $\Delta p_w = -22 - (-3) = -19$ Pa.

Tlak vanjskog zraka u visine komponente protoka zraka iznosi:

$$p_{ext,comp} = p_{0,ref} + 0,5 \times \rho_{ref} \times C_{p,comp} \times v_{site}^2 - h_{comp} \times g \times \rho_e \quad (5.53)$$

gdje je

$p_{0,ref}$ atmosferski tlak na referentnoj visini za koju se obično uzima visina poda zone, u Pa,
 h_{comp} visina komponente protoka zraka iznad referentne visine (razlika nadmorskih visina komponente i razine poda zone), u m.

Uvrštavanjem:

$$\rho_e = \rho_{ref} \times \frac{T_{ref}}{T_e} \quad (5.54)$$

u jednadžbu (5.53) dobije se za tlak vanjskog zraka u visini komponente protoka zraka izraz:

$$p_{ext,comp} = p_{0,ref} + \rho_{ref} \times \left(0,5 \times C_{p,comp} \times v_{site}^2 - h_{comp} \times g \times \frac{T_{ref}}{T_e} \right) \quad (5.55)$$

Tlak zraka u zoni/zgradi predstavljen je unutarnjim referentnim tlakom, irp (eng.: internal reference pressure) koji je nepoznat i hidrostatskim tlakom, promjenjivim po visini zone:

$$p_{int,comp} = p_{0,ref} + irp - h_{comp} \times g \times \rho_i \quad (5.56)$$

Uvrštavanjem:

$$\rho_i = \rho_{\text{ref}} \times \frac{T_{\text{ref}}}{T_i} \quad (5.57)$$

u jednadžbu (5.56) dobije se za tlak unutarnjeg zraka, u visini komponente protoka zraka, izraz:

$$p_{\text{int,comp}} = p_{0,\text{ref}} + irp - \rho_{\text{ref}} \times h_{\text{comp}} \times g \times \frac{T_{\text{ref}}}{T_i} \quad (5.58)$$

Pretpostavlja se da je referentna ravnina za unutarnji prostor na istoj visini kao i u vanjskom prostoru. Referentna ravnina uzima se obično u visini poda proračunske zone zgrade. Razlika između tlakova zraka u vanjskom i unutarnjem prostoru, u visini jedne komponente, je:

$$\begin{aligned} \Delta p &= p_{\text{ext,comp}} - p_{\text{int,comp}} \\ \Delta p &= 0,5 \times \rho_{\text{ref}} \times C_{p,\text{comp}} \times v_{\text{site}}^2 - \rho_{\text{ref}} \times T_{\text{ref}} \times g \times h_{\text{comp}} \times \\ &\times \left(\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_i} \right) - irp \end{aligned} \quad (5.59)$$

Pojedini faktori u gornjim izrazima imaju slijedeće značenje:

h_{comp} je visina komponente iznad razine poda zone, u m,

g je ubrzanje Zemljine sile teže, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$,

irp unutarnji referentni tlak, u Pa,

$\rho_{\text{ref}} = 1,25 \text{ kg/m}^3$,

$T_{\text{ref}} = 283 \text{ K}$.

Razlika tlaka, Δp , kojoj je podvrgnuta zračna veza u ovojnici zgrade dana je zbrojem tlaka kojeg izaziva vjetar, p_w , i hidrostatskog tlaka prouzročenog razlikom temperatura, Δp_t , vodeći računa o unutarnjem referentnom tlaku, irp , koji je u početku nepoznat:

$$\Delta p = p_w + \Delta p_t - irp \quad (5.60)$$

Svi tlakovi su u paskalima.

5.5.4.8 Analiza razlika hidrostatskog tlaka

U izrazu (5.59), član:

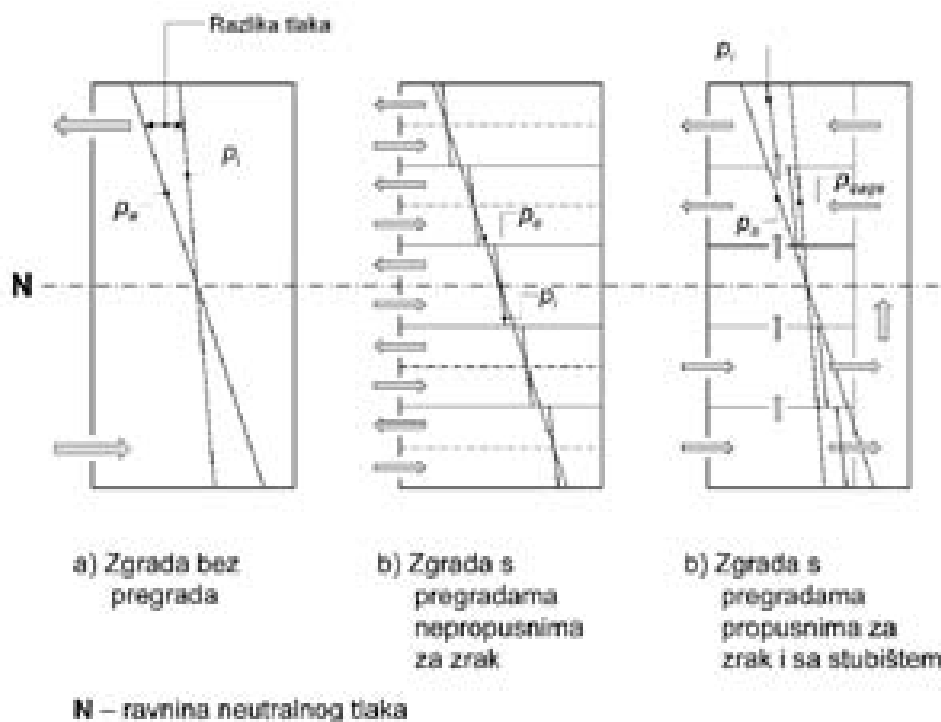
$$\Delta p_t = -\rho_{\text{ref}} \times T_{\text{ref}} \times g \times h \times \left(\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_i} \right) \quad (5.61)$$

predstavlja ukupnu razliku hidrostatskog tlaka. Sasvim općenito, h je razlika visina između najnižeg i najvišeg mjesta propuštanja pročelja zgrade, u m.

Iz izraza (5.61) proizlazi da razlika hidrostatskog tlaka raste ako se povećava udaljenost h između najvišeg i najnižeg otvora i ako raste razlika temperatura ($T_i - T_e$).

Zbog razlike hidrostatskog tlaka, hladan vanjski zrak prodire kroz mjesta propuštanja i otvore koji se nalaze u donjem dijelu pročelja zgrade, a topli unutarnji zrak izlazi iz zgrade kroz mjesta propuštanja i otvore koji se nalaze u gornjem dijelu pročelja zgrade. U tim uvjetima, tj. kad je temperatura unutarnjeg zraka viša od temperature vanjskog zraka, donji dijelovi pročelja zgrade izloženi su povećanom tlaku zraka s vanjske strane dok su gornji dijelovi izloženi podtlaku. Na slici 5.11a), razlika tlaka kojoj je izloženo pročelje zgrade predstavljena je razlikom između pravca tlaka vanjskog zraka, p_e , i pravca tlaka unutarnje zraka, p_i . Visinu na kojoj je ta razlika tlaka nula nazivamo **razinom (ravninom) neutralnog tlaka** (h_N) [95].

U slučaju višekratne zgrade kod koje su međukatne konstrukcije nepropusne za zrak, izraz (5.60) primjenjuje se posebno za svaku etažu. U tom slučaju zgrada ima u svakoj etaži ravninu neutralnog tlaka (vidjeti sliku 5.11b)).

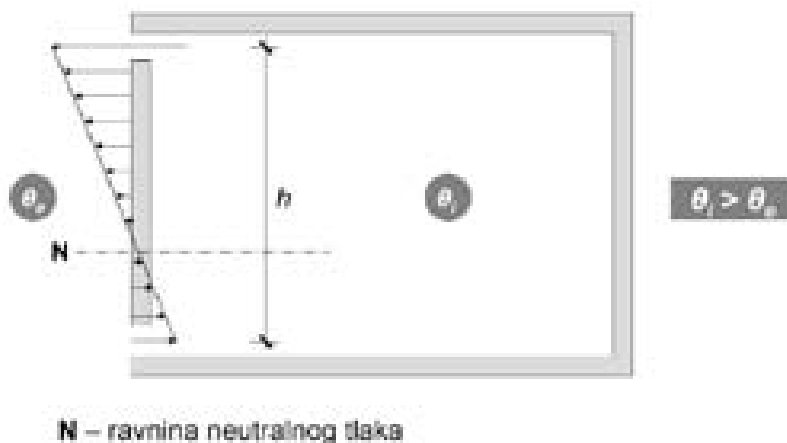


Slika 5.11 Utjecaj pregrada u zgradi na razdiobu hidrostatskog tlaka ($\theta_i > \theta_e$), vertikalni presjek

Kod stvarnih zgrada, međukatne konstrukcije nisu niti potpuno propusne za zrak, niti potpuno zrakonepropusne. Stubište, vozno okno dizala, otvori / kanali u međukatnim konstrukcijama koji služe za vođenje raznih instalacija, omogućuje određeni prolazak zraka između pojedinih etaža. Razlika tlaka zraka između prostorija pojedinih etaža i stubišta predstavljena je razlikom između pravca tlaka zraka u prostoriji, p_i , i pravca tlaka zraka u stubištu, p_{cage} . Jedan dio razlike hidrostatskog tlaka preuzimaju pregradni zidovi prema stubištu, tako da je razlika tlaka kojoj su izloženi vanjski zidovi prostorija manja od one koja bi bila kad ne bi bilo tih pregradnih zidova (vidjeti sliku 5.11 c)).

Kada su otvori i mjesta propuštanja zraka pročelja zgrade jednoliko raspoređeni po visini zgrade i kada pružaju jednaki otpor strujanju zraka, ravnina neutralnog tlaka se nalazi na polovici visine zgrade. Podtlak na najvišim otvorima jednak je nadtlaku na najnižim otvorima. Apsolutna vrijednost tih razlika tlakova jednaka je polovici razlike ukupnog hidrostatskog tlaka.

Ako su, međutim, mjesta propuštanja zraka u donjem dijelu veća od onih u gornjem dijelu pročelja, ravnina neutralnog tlaka se pomiče prema dolje (vidjeti sliku 5.12). Podtlak, s vanjske strane, na najvišim otvorima veći je od nadtlaka na najnižim otvorima. Zbroj apsolutnih vrijednosti tih razlika tlakova uvijek je međutim jednak ukupnoj razlici hidrostatskog tlaka.



Slika 5.12 Pomak ravnine neutralnog tlaka prema većem otvoru, vertikalni presjek

Princip proračuna razlike hidrostatskog tlaka u visini svakog mjesta propuštanja ili otvora (komponente protoka zraka) sastoji se u izjednačavanju zbroja protoka zraka koji ulazi u zgradu sa zbrojem protoka zraka koji izlazi iz zgrade, uzimajući u obzir karakteristike različitih otvora.

Prostorija nepropusna za zrak s otvorom u donjem dijelu pročelja

Promotrimo prostoriju potpuno nepropusnu za zrak s izuzetkom jednog otvora u razini poda prostorije kojim je zrak u prostoriji povezan s vanjskim zrakom (vidjeti sliku 5.13).



Slika 5.13 Promjena hidrostatskog tlaka u prostoriji koja je potpuno nepropusna za zrak, osim jednog otvora u razini poda, vertikalni presjek

U visini otvora tj. na razini poda ($z = 0$) apsolutni tlak vanjskog zraka, $p_{e,0}$, u paskalima, jednak je apsolutnom tlaku unutarnjeg zraka na razini poda, $p_{i,0}$, u paskalima:

$$p_{e,0} = p_{i,0} \quad (5.62)$$

Na bilo kojoj visini z u metrima, tlak vanjskog zraka biti će:

$$p_{e,z} = p_{e,0} - \rho_e \times g \times z \quad (5.63)$$

gdje je

ρ_e obujamska masa (gustoća) vanjskog zraka, u kg/m^3 ,
 $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ akceleracija sile teže.

Na jednakoj, bilo kojoj visini z u metrima, tlak unutarnjeg zraka, $p_{i,z}$ u paskalima, iznosi:

$$p_{i,z} = p_{i,0} - \rho_i \times g \times z \quad (5.64)$$

gdje je

ρ_i obujamska masa (gustoća) unutarnjeg zraka, u kg/m^3 .

Razlika tlaka između vanjskog i unutarnjeg zraka na bilo kojoj visine z je:

$$\Delta p_z = p_{e,z} - p_{i,z} = (p_{e,0} - \rho_e \times g \times z) - (p_{i,0} - \rho_i \times g \times z)$$

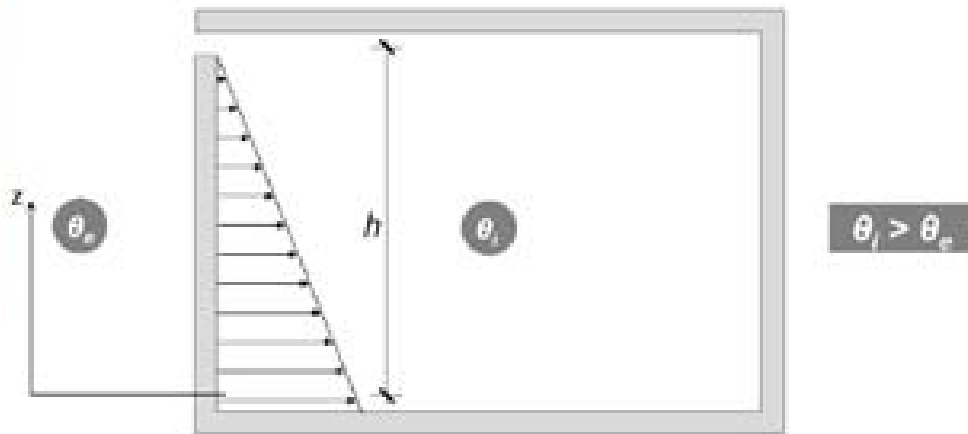
S obzirom na (5.62) dobije se:

$$\Delta p_z = (\rho_i - \rho_e) \times g \times z \quad (5.65)$$

Uz pretpostavku da je temperatura vanjskog zraka, θ_e , niža od temperature unutarnjeg zraka, θ_i , što znači da je $\rho_e > \rho_i$, prostorija će biti u nadtlaku u odnosu na vanjski prostor. Promjena tlaka Δp_z na slici 5.13 prikazana je trokutom čiji je vrh smješten u visini otvora u vanjskom zidu.

Prostorija nepropusna za zrak s otvorom u gornjem dijelu pročelja

Promotrimo prostoriju potpuno nepropusnu za zrak s izuzetkom jednog otvora u razini plafona prostorije kojim je zrak u prostoriji povezan s vanjskim zrakom (vidjeti sliku 5.14).



Slika 5.14 Promjena hidrostatskog tlaka u prostoriji koja je potpuno nepropusna za zrak, osim jednog otvora u razini plafona, vertikalni presjek

U visini otvora tj. u visini plafona ($z = h$) apsolutni tlak vanjskog zraka, $p_{e,h}$, u paskalima, jednak je apsolutnom tlaku unutarnjeg zraka u visini plafona, $p_{i,h}$, u paskalima:

$$p_{e,h} = p_{i,h} \quad (5.66)$$

Na bilo kojoj visini z u metrima, koja je manja od h , tlak vanjskog zraka biti će:

$$p_{e,z} = p_{e,h} + \rho_e \times g \times (h - z) \quad (5.67)$$

Na jednakoj, bilo kojoj visini z u metrima, tlak unutarnjeg zraka, $p_{i,z}$ u paskalima, iznosi:

$$p_{i,z} = p_{i,h} + \rho_i \times g \times (h - z) \quad (5.68)$$

Razlika tlaka između vanjskog i unutarnjeg zraka na bilo kojoj visine z je:

$$\Delta p_z = p_{e,z} - p_{i,z} = (p_{e,h} + \rho_e \times g \times (h - z)) - (p_{i,h} + \rho_i \times g \times (h - z))$$

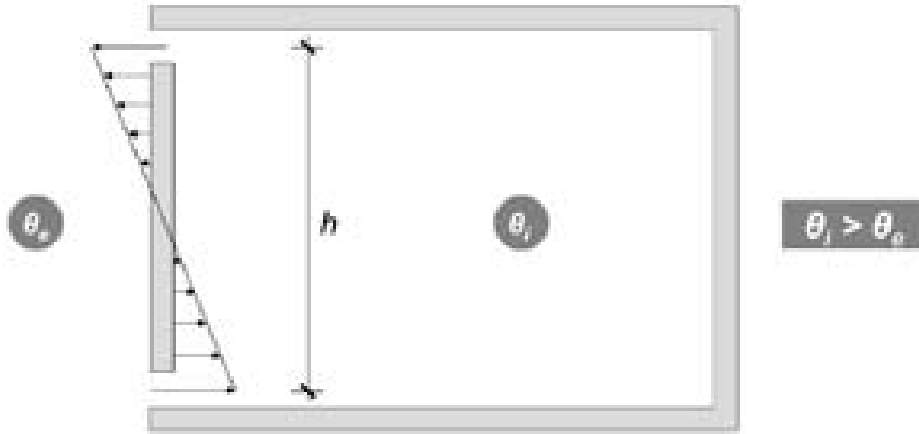
S obzirom na (5.66) dobije se:

$$\Delta p_z = (\rho_e - \rho_i) \times g \times (h - z) \quad (5.69)$$

Uz pretpostavku da je temperatura vanjskog zraka, θ_e , niža od temperature unutarnjeg zraka, θ_i , što znači da je $\rho_e > \rho_i$, prostorija će biti u podtlaku u odnosu na vanjski prostor. Promjena tlaka Δp_z na slici 5.14 prikazana je trokutom čiji je vrh smješten u visini otvora u vanjskom zidu.

Prostorija nepropusna za zrak s otvorom u donjem i gornjem dijelu pročelja

Promotrimo prostoriju potpuno nepropusnu za zrak s izuzetkom jednog otvora u razini poda prostorije i drugog identičnog otvora u visini plafona prostorije, kojima je zrak u prostoriji povezan s vanjskim zrakom (vidjeti sliku 5.15).



Slika 5.15 Promjena hidrostatskog tlaka u prostoriji koja je potpuno nepropusna za zrak, osim po jednog identičnog otvora u razini poda i razini plafona, vertikalni presjek

U ovom slučaju, količina vanjskog zraka koji prodire u prostoriju kroz jedan od otvora jednaka je količini zraka koji napušta prostoriju kroz drugi otvor. Budući da su oba otvora identična i protoci zraka kroz njih jednaki, nužno je da i razlike tlaka u visini otvora budu također jednake, ali suprotnog predznaka jer su i protoci zraka u suprotnim smjerovima. Može se dakle pisati da je:

$$\Delta p_0 = -\Delta p_h \quad (5.70)$$

$$(p_{e,0} - p_{i,0}) = -(p_{e,h} - p_{i,h})$$

$$(p_{e,0} - p_{i,0}) = (p_{i,0} - \rho_i \times g \times h) - (p_{e,0} - \rho_e \times g \times h)$$

$$(p_{e,0} - p_{i,0}) = (\rho_e \times g \times h - \rho_i \times g \times h) - (p_{e,0} - p_{i,0})$$

$$2 \times (p_{e,0} - p_{i,0}) = (\rho_e \times g \times h - \rho_i \times g \times h)$$

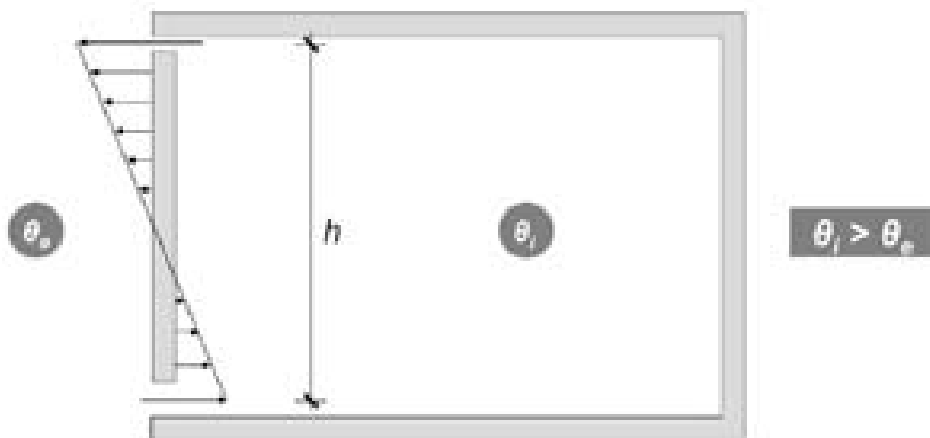
$$\Delta p_0 = (p_{e,0} - p_{i,0}) = -(\rho_i - \rho_e) \times g \times \frac{h}{2} \quad (5.71)$$

i

$$\Delta p_h = (p_{e,h} - p_{i,h}) = (\rho_i - \rho_e) \times g \times \frac{h}{2} \quad (5.72)$$

Uz pretpostavku da je temperatura vanjskog zraka, θ_e , niža od temperature unutarnjeg zraka, θ_i , što znači da je $\rho_e > \rho_i$, hladni vanjski zrak prodirati će kroz otvor smješten u razini poda, a topli zrak iz prostorije odlaziti će iz prostorije kroz otvor smješten u razini plafona. Razdioba tlaka zraka izgleda kako je prikazano na slici 5.15. Tlak unutarnjeg zraka jednak je tlaku vanjskog zraka točno na polovici udaljenosti h između tih otvora.

Promotrimo sada prostoriju potpuno nepropusnu za zrak s izuzetkom jednog otvora u razini poda i jednog manjeg otvora u razini plafona. I u ovom slučaju zrak koji ulazi u prostoriju kroz donji otvor jednak je količini unutarnjeg zraka koja kroz gornji otvor izlazi u vanjski prostor (vidjeti sliku 5.16)



Slika 5.16 Promjena hidrostatskog tlaka u prostoriji koja je potpuno nepropusna za zrak, osim jednog otvora u razini poda i jednog manjeg otvora u razini plafona, vertikalni presjek

Za ove otvore, odnos između protoka q u m^3/h i razlike tlaka Δp u Pa, može se izraziti, empirijski dobivenim zakonom, kao:

$$q = C \times \Delta p^n \quad (5.73)$$

Ovdje je C koeficijent propuštanja zraka, u $\text{m}^3/(\text{h} \times \text{Pa}^n)$, koji je karakteristika otvora.

Jednakost protoka kroz donji i gornji otvor može se izraziti kao:

$$q = C_0 \times \Delta p_0^{n_0} = -C_h \times \Delta p_h^{n_h} \quad (5.74)$$

Iz jednadžbe (5.74), uz pretpostavku da su eksponenti protoka zraka, n , jednaki za oba otvora (za ventilacijski otvor $n = 0,5$; za pukotinu $n = 0,667$), dobije se da je:

$$\Delta p_0 = \frac{-C_h}{(C_0 + C_h) \times (\rho_i - \rho_e) \times g \times h} \quad (5.75)$$

i

$$\Delta p_h = \frac{C_0}{(C_0 + C_h) \times (\rho_i - \rho_e) \times g \times h} \quad (5.76)$$

Dakle, u slučaju kad jedan od otvora pruža znatno veći otpor strujanju zraka od drugog otvora (npr. ako je gornji otvor znatno manjih dimenzija u odnosu na donji), pravac razlike tlaka biti će pomaknut i ravnina u kojoj su tlakovi p_i i p_e jednaki pomaknuti će se prema većem otvoru (vidjeti sliku 5.16).

Općenito, položaj ravnine neutralnog tlaka nije statičan. Promjena snage vjetra i korištenje sustava mehaničke ventilacije može premjestiti ravninu neutralnog tlaka prema gore ili prema dolje.

5.5.4.9 Karakteristike ovojnice zgrade u pogledu propuštanja zraka

Propuštanje zraka kroz ovojnicu zgrade izražava se protokom zraka kroz zgradu za danu razliku tlaka unutarnjeg i vanjskog zraka. Za određeni Δp taj protok se dobije mjerenjem na predmetnoj zgradi (postupak mjerenja „blower door“ prema HRN EN 9972 [96]). Obujamski

protok zraka može se izraziti u l/s ili m³/h. Ovisnost protoka o razlici tlaka obično se izražava empirijskim zakonom

$$q_{v,\Delta p} = C \times (\Delta p)^n \quad (5.77)$$

Iz jednadžbe (5.77) slijedi da je:

$$C = q_{v,\Delta p} \times \left(\frac{1}{\Delta p} \right)^n \quad (5.78)$$

Ovdje je:

- C koeficijent propuštanja zraka tj. protok zraka u l/s ili m³/h, za razliku tlaka $\Delta p = 1$ Pa, (1 l/s = 1 dm³/s = 3,6 m³/h; 1 m³/h = 0,287 l/s),
 $q_{v,\Delta p}$ protok zraka u l/s ili m³/h, za razliku tlaka Δp Pa,
 n eksponent ovisan o geometrijskim karakteristikama mjesta propuštanja zraka. Za pukotine i nedostatke u zabrtvljenosti između građevnih dijelova (npr. reške između doprozornika i zida) iznosi $n = 0,667$.

Za poznatu vrijednost propuštanja zraka za čitavu zgradu, kod razlike tlaka od 50 Pa, n_{50} , koeficijent propuštanja zraka C , u m³/h za razliku tlaka 1 Pa, prema (5.78), iznosi:

$$C = n_{50} \times \frac{V}{50^{0,667}} \quad (5.79)$$

gdje je V obujam zraka u m³.

Da bi se propustljivosti zraka različitih zgrada mogle međusobno uspoređivati, izmjeri se protok zraka kroz zgradu, u m³/h, za dogovorenu referentnu razliku tlaka zraka unutarnjeg i vanjskog prostora od 4 Pa, 10 Pa ili 50 Pa [97]. Kao pokazatelji propustljivosti zraka kroz ovojnici zgrade koriste se:

- broj izmjena zraka na sat, n , u obujam/h, za razliku tlaka od 4 Pa, oznaka n_4 , ili 10 Pa, oznaka n_{10} , ili 50 Pa, oznaka n_{50} (n je izmjereni protok podijeljen s obujmom grijanog zraka),
- izmjereni protok zraka u m³/h za razliku tlaka od 4 Pa, ili 10 Pa, ili 50 Pa, podijeljen s ploštinom ovojnice zgrade (bez ploštine poda na tlu), u m³/h po m² ovojnice zgrade,
- izmjereni protok zraka u m³/h za razliku tlaka od 4 Pa, ili 10 Pa, ili 50 Pa, podijeljen s ploštinom poda grijanog prostora, u m³/h po m² ploštine poda.

Razlika tlakova od 4 Pa odgovara tlaku kojeg stvara lagani lahor brzine 9 km/h, a razlika 50 Pa ekvivalentna je brzini vjetra od 32 km/h.

Za nove zgrade ili kad, za postojeću zgradu, nije provedeno mjerenje propusnosti za zrak *in situ*, proračun se provodi s preporučenim vrijednostima koje nalazimo u stručnoj literaturi.

U tablici 5.25 navedene su, prema DIN V 18599-2 [98], preporučene vrijednosti za n_{50} uslijed infiltracije, ako nema mehaničke ventilacije. Te vrijednosti se mogu koristiti kao ulazni podaci za daljnje proračune protoka zraka.

Tablica 5.25 Preporučene vrijednosti broja izmjena zraka na sat, n_{50} , za zgrade na kojima nije provedeno ispitivanje zrakopropusnosti, prema DIN V 18599-2 [98]

Kategorija zabrtvljenosti	Razina zabrtvljenosti za zrak		Preporučena vrijednost n_{50} h^{-1}
I	Jako zabrtvljena zgrada (mjerjenje propusnosti zraka nakon izvedbe zgrade)	Zgrada bez sustava mehaničke ventilacije	2
		Zgrada sa sustavom mehaničke ventilacije	1
II	Zgrada ili dio zgrade dobre zabrtvljenosti za koje nije predviđeno ispitivanje zrakopropusnosti		4
III	Zgrada koja ne spada u kategoriju zabrtvljenosti I, II ili IV		6
IV	Slabo zabrtvljena zgrada (postojanje vidljivih nezabrtvljenih mjesta u ovojnici zgrade, npr. otvorene reške u sloju za brtvljenje zraka)		10

Propustljivost zraka kroz ovojnicu zgrade može se karakterizirati i ploštinom ekvivalentnog ventilacijskog otvora, A_{vent} , koja odgovara ploštini jedinstvenog ventilacijskog otvora kroz koji bi, za danu referentnu razliku tlaka, izmjereni obujamski protok bio jednak protoku kroz zrakopropusnu ovojnicu zgrade. Radi se o teoretskom otvoru i teoretskom protoku zraka. Kako, međutim, na protok zraka bitno utječu karakteristike ventilacijskog otvora, uvodi se bezdimenzijski **koeficijent strujanja** ili **koeficijent rasterećenja**, C_d , koji predstavlja odnos realnog obujamskog protoka i teoretskog protoka. Koeficijent strujanja karakteristika je otvora i njegova se vrijednost kreće u granicama između 0,5 i 1. Za otvore s glatkim zaobljenim bridovima njegova vrijednost je približno 1. U slučaju pravokutnog otvora s oštrim bridovima njegova vrijednost se uzima da iznosi $C_d = 0,61$.

Ploština ekvivalentnog ventilacijskog otvora, A_{vent} , u m^2 , može se izvesti iz rezultata mjerenja zrakopropustljivosti zgrade / zone, pomoću slijedećeg izraza:

$$A_{vent} = \frac{C_{leak/inlet}}{C_d} \times \left(\frac{\rho}{2}\right)^{0,5} \times (\Delta p_{ref})^{(n-0,5)} \quad (5.80)$$

gdje je

$C_{leak/inlet}$ koeficijent propuštanja zraka za čitavu zgradu / zonu, u $m^3/(h \times Pa^n)$,

C_d koeficijent rasterećenja otvora, $C_d = 0,61$,

ρ gustoća zraka na 20 °C, $\rho \approx 1,2 \text{ kg/m}^3$,

Δp_{ref} referentna razlika tlaka za otvor (npr. 4 Pa).

Podjela mjesta propuštanja zraka

Budući da položaji mjesta propuštanja zraka nisu poznati, u normi HRN EN 15242 [88], dogovorno je pretpostavljena podjela između pročelja izloženog vjetru i pročelja u zavjetrini. Propuštanje zraka utvrđuje se za cijelu zonu, $C_{leak, zone}$ (eksponent $n = 0,667$). Podjela propuštanja zraka po ovojnici zone provodi se na slijedeći način:

$$C_{leak, facades} = \frac{C_{leak, zone} \times A_{facades}}{(A_{facades} + A_{roof})} \quad (5.81)$$

$$C_{\text{leak,roof}} = \frac{C_{\text{leak,zone}} \times A_{\text{roof}}}{(A_{\text{facades}} + A_{\text{roof}})} \quad (5.82)$$

Ovdje je A_{facades} ploština pročelja, a A_{roof} je ploština krova (površine koja se vidi iz zone).

Pretpostavlja se da su mjesta propuštanja i količina propuštenog zraka razdijeljeni kako ja navedeno u tablici 5.26.

Tablica 5.26 Položaj mjesta propuštanja zraka i razdioba koeficijenta propuštanja zraka prema HRN EN 15242 [88]

	Koeficijent propuštanja zraka, C_{leak} u $\text{m}^3/(\text{h} \times \text{Pa}^n)$		
	Pročelje izloženo vjetru	Pročelje u zavjetrini	Krov
Visina mjesta propuštanja (komponente) = $0,25 \times H_z$	$0,25 \times C_{\text{leak,facade}}$	$0,25 \times C_{\text{leak,facade}}$	
Visina mjesta propuštanja (komponente) = $0,75 \times H_z$	$0,25 \times C_{\text{leak,facade}}$	$0,25 \times C_{\text{leak,facade}}$	
Visina mjesta propuštanja (komponente) = H_z			$C_{\text{leak,roof}}$

U tablici 5.26 H_z je visina promatrane proračunske zone.

Podjela ventilacijskih otvora za ulaz zraka

Propuštanje zraka kroz ventilacijske otvore utvrđuje se za cijelu zonu, $C_{\text{inlet, zone}}$. Podjela ulaza zraka po ovojnici zgrade provodi se prema izrazima (5.81) i (5.82). Pretpostavlja se da su mjesta ulaza zraka i količina ulaznog zraka razdijeljeni kako je navedeno u tablici 5.27.

Tablica 5.27 Položaj mjesta ulaza zraka i razdioba koeficijenta propuštanja zraka prema HRN EN 15242 [88]

	Koeficijent propuštanja zraka, C_{inlet} u $\text{m}^3/(\text{h} \times \text{Pa}^n)$	
	Pročelje izloženo vjetru	Pročelje u zavjetrini
Visina ulaza zraka (komponente) = $0,25 \times H_z$	$0,25 \times C_{\text{inlet,facade}}$	$0,25 \times C_{\text{inlet,facade}}$
Visina ulaza zraka (komponente) = $0,75 \times H_z$	$0,25 \times C_{\text{inlet,facade}}$	$0,25 \times C_{\text{inlet,facade}}$

U tablici 5.27 H_z je visina promatrane proračunske zone.

5.5.4.10 Protok zraka kroz zgradu / zonu

Procjena izmjene zraka na osnovi propusnosti zraka kroz ovojnicu zgrade

Protok zraka kroz zgradu ovisi o razlici između tlaka zraka unutarnjeg i vanjskog okoliša te o otporu koji svako mjesto propuštanja zraka ili ventilacijski otvor u ovojnici zgrade pruža strujanju zraka. Razlika u tlaku unutarnjeg i vanjskog zraka nastaje djelovanjem vjetra oko zgrade te zbog različitih gustoća (različitih temperatura) unutarnjeg i vanjskog zraka.

Najjednostavnija metoda za grubu procjenu protoka infiltracijskog zraka polazi od vrijednosti ukupne izmjene zraka, n_{50} :

$$q_{v,inf} = n_{50} \times \frac{V}{20} \quad (5.83)$$

gdje je

$q_{v,inf}$ protok zraka infiltracijom, u m³/h,

n_{50} broj izmjena zraka na sat za cijelu zgradu / zonu, kod razlike tlaka unutarnjeg i vanjskog zraka 50 Pa,

V obujam zraka grijanog prostora zgrade, u m³.

Izrazom (5.83) dobije se red veličine protoka zraka uslijed infiltracije.

Varijanta ovog postupka dana je u normi za proračun toplinskih gubitaka kod dimenzioniranja termotehničkih sustava, HRN EN 12831 [90]. Prema toj normi protok zraka infiltracijom, $V_{inf,i}$, u m³/h, u grijani prostor i , uslijed djelovanja vjetra i efekta dimnjaka / uzgona, proračunava se izrazom:

$$V_{inf,i} = 2 \times V_i \times n_{50} \times e_i \times \varepsilon_i \quad (5.84)$$

gdje je

V_i obujam grijanog prostora i , u m³,

n_{50} broj izmjena zraka na sat za razliku tlakova 50 Pa između unutarnjeg i vanjskog prostora zgrade, u 1/h,

e_i koeficijent izloženosti, broj bez dimenzije,

ε_i popravni faktor za visinu, koji uzima u obzir povećanje brzine vjetra s visinom promatranog prostora iznad razine tla, broj bez dimenzije.

Faktor 2 uvodi se u jednadžbu (5.84) da bi se uzeo u obzir najnepovoljniji slučaj, u kojem sav infiltrirani zrak ulazi samo na jednom pročelju zgrade.

Preporučene vrijednosti n_{50} dane su za različite tipove zgrada u tablici 5.28.

Tablica 5.28 Broj izmjena zraka n_{50} različitih zgrada, prema HRN EN 12831 [90]

Tip zgrade	Broj izmjena zraka n_{50} kroz ovojnicu zgrade [1/h]		
	Kvaliteta brtvljenja reški stolarije - visoka	Kvaliteta brtvljenja reški stolarije - srednja	Kvaliteta brtvljenja reški stolarije - niska
Obiteljske kuće	< 4	4 – 10	>10
Višestambene zgrade	< 2	2 – 5	>5

Preporučene vrijednosti koeficijenta izloženosti, e_i , dane su u tablici 5.29, a popravnog faktora za visinu, ε_i , u tablici 5.30.

Tablica 5.29 Razredi izloženosti zgrade, prema HRN EN 12831 [90]

Razred izloženosti	Koeficijent izloženosti, e_i , [-]		
	Grijani prostor bez izloženih otvora	Grijani prostor s jednim izloženim otvorom	Grijani prostor s više od jednog izloženog otvora
Nezaštićen položaj (zgrade u vjetrovitom području, zgrade velike visine u centru grada)	0	0,03	0,05

Umjereno zaštićen položaj (zgrade na selu zaštićene stablima ili drugim zgradama, predgrađa)	0	0,02	0,03
Vrlo zaštićen položaj (zgrade srednje visine u centru grada, zgrade u šumi)	0	0,01	0,02

Tablica 5.30 Popravni faktor za visinu, ε_i , prema HRN EN 12831 [90]

Visina grijanog prostora iznad tla (središta prostorije u razini tla)	ε_i , [-]
0 – 10 m	1,0
>10 – 30 m	1,2
>30 m	1,5

Detaljni teorijski monozonski model

Kod poznate razlike tlaka zraka između vanjskog i unutarnjeg prostora, protok zraka može se odrediti pomoću empirijski dobivenih izraza. Otvori i pukotine koji predstavljaju zračnu vezu između unutarnjeg i vanjskog prostora svrstavaju se u jedan od dva opća tipa otvora:

- pukotine, nedostaci u brtvljenju reški između građevnih dijelova zgrade ili mali otvori čija je tipična dimenzija manja od 10 mm (za njih se u formulama koristi indeks: *leak*),
- projektirani ventilacijski otvori čija je tipična dimenzija veća od 10 mm (za njih se u formulama koristi indeks: *inlet*).

Tlak stvoren energijom vjetra i tlak uslijed razlike temperature unutarnjeg i vanjskog zraka dovode do strujanja zraka kroz mjesta propuštanja zraka i otvore u ovojnici zgrade, kod čega se ukupan protok zraka koji ulazi u zgradu izjednačava s protokom zraka koji izlazi iz zgrade.

Strujanje zraka kroz navedena mjesta propuštanja zraka i otvore u ovojnici zgrade može biti laminarno ili turbulentno, ovisno o geometriji i smještaju zračne veze. Ono se karakterizira empirijski dobivenim zakonom:

$$q_v = C \times (\Delta p)^n \quad (5.85)$$

gdje je

- q_v obujamski protok zraka u m³/h ili l/s = dm³/s za razliku tlakova od Δp paskala, (1 l/s = 3,6 m³/h; 1 m³/h = 0,278 l/s),
- C koeficijent propuštanja zraka koji karakterizira propuštanje zraka kroz pojedina mjesta propuštanja (komponente protoka zraka) u ovojnici zgrade. Fizikalno se može interpretirati kao protok zraka prouzročen jediničnim padom tlaka. Vrijednost C je funkcija geometrijskih karakteristika otvora (mjesta propuštanja – komponente). Određuje se mjerenjem.
- n eksponent koji karakterizira vrstu strujanja zraka. Vrijednost $n = 0,5$ odgovara za turbulentno strujanje (kod ventilacijskih otvora). Za laminarno strujanje vrijednost n se približava vrijednosti 1. Za male otvore (pukotine i nepotpuno zabrtvljene reške) općenito se uzima da je $n = 0,667$ ($n = 2/3$).

Za svaku komponentu protoka zraka u vanjskoj ovojnici zgrade vrijedi, dakle:

- za neželjena mjesta propuštanja zraka (pukotine ili nedostaci u zabrtvljenosti reški između pojedinih građevnih dijelova zgrade, mali otvori):

$$q_{v,leak} = C_{leak} \times \text{sign}(\Delta p) \times |\Delta p|^{0,667} \quad (5.86)$$

- za projektirane veće ventilacijske otvore

$$q_{v,inlet} = C_{inlet} \times \text{sign}(\Delta p) \times |\Delta p|^{0,5} \quad (5.87)$$

Obujamske protoke zraka kroz zračne veze u ovojnici zgrade možemo pretvoriti u masene protoke pomoću izraza:

$$q_m = q_v \times \rho_{through} \quad (5.88)$$

Ovdje je $\rho_{through}$ vrijednost gustoće zraka koji prolazi kroz promatranu komponentu protoka zraka i ovisi o smjeru strujanja zraka tj. da li zrak ulazi u zgradu (tada je ρ_e) ili iz nje izlazi (tada je ρ_i).

Da bi se mogao proračunati protok zraka uslijed prirodne ventilacije potrebno je poznavati vrijednost unutarnjeg referentnog tlaka, irp , u zoni zgrade. Da bi se pak izračunao irp potrebno je riješiti jednadžbu:

$$q_{v,sup} + q_{v,exh} + \Sigma q_{v,comp} + q_{v,passive,duct} + q_{v,comb} = 0 \quad (5.89)$$

u kojoj je nepoznata vrijednost irp .

U jednadžbi (5.89) je:

$q_{v,sup}$	protok dobavnog zraka kod mehaničke ventilacije,
$q_{v,exh}$	protok odsisnog zraka kod mehaničke ventilacije,
$q_{v,passive,duct}$	protok zraka zbog prirodne ventilacije pomoću vertikalnih ventilacijskih kanala,
$q_{v,comb}$	protok zraka kroz dimnjak s ložištem,
$q_{v,comp}$	protoci zraka kroz pojedine komponente protoka zraka, jednaki $q_{v,leak}$ ili $q_{v,inlet}$.

Kad je određen irp proračunamo svaku pojedinačnu vrijednost $q_{v,comp}$. Tada je:

$$\text{infiltracija: } q_{v,inf} = \Sigma q_{v,comp} \quad \text{za pozitivne vrijednosti } q_{v,comp}, \quad (5.90)$$

$$\text{eksfiltracija: } q_{v,exh} = \Sigma q_{v,comp} \quad \text{za negativne vrijednosti } q_{v,comp} \quad (5.91)$$

Vertikalni ventilacijski kanali smatraju se ventilacijskim otvorom visine H_d koja je udaljenost između razine poda zone i vrha kanala.

Protok zraka kroz model malog otvora

Kod malih otvora zrak se može kretati samo u jednom smjeru [99]. Iz Bernoullijeve jednadžbe slijedi da je pad tlaka u strujnoj cijevi proporcionalan kvadratu brzine strujanja zraka kroz mali otvor:

$$\Delta p = 0,5 \times \rho \times v^2 \quad (5.92)$$

Iz jednadžbe (5.92) brzina strujanja zraka u otvoru, v , u m/s, je:

$$v = \left(\frac{2 \times \Delta p}{\rho} \right)^{0,5} \quad (5.93)$$

Teoretski obujamski protok zraka kroz otvor, q_v u m³/s, je:

$$q_v = A \times v \quad (5.94)$$

odnosno:

$$q_v = A \times \left(\frac{2 \times \Delta p}{\rho} \right)^{0,5} \quad (5.95)$$

a maseni protok, q_m u kg/s, iznosi:

$$q_m = \rho \times A \times v \quad (5.96)$$

odnosno:

$$q_m = A \times (2\Delta p \times \rho)^{0,5} \quad (5.97)$$

U gornjim izrazima je

A ploština površine presjeka otvora, u m^2 ,
 Δp razlika tlaka vanjskog i unutarnjeg zraka, u Pa,
 ρ gustoća zraka u strujnoj cijevi, u kg/m^3 .

U stvarnosti protok ovisi o geometrijskim karakteristikama otvora i o viskoznim efektima unutar fluida. Zato se uvodi bezdimenzionalni koeficijent rasterećenja (ili koeficijent istjecanja za otvor), C_d , koji karakterizira sam otvor i koji omogućava da se dobije realan protok zraka kroz otvor polazeći od teoretskog protoka kroz strujnu cijev istog presjeka.

Za stvarni protok zraka jednadžbe (5.95) i (5.97) glase:

$$q_v = C_d \times A \times \left(\frac{2 \times \Delta p}{\rho} \right)^{0,5} \quad (5.98)$$

$$q_m = C_d \times A \times (2\Delta p \times \rho)^{0,5} \quad (5.99)$$

Za pravokutne otvore s oštrim bridovima (rubovima) uzima se da je $C_d = 0,61$.

Protok zraka kroz veliki vertikalni otvor

Veliki vertikalni otvori (npr. otvoren prozor ili vrata) karakterizirani su činjenicom da su kroz njih moguća istovremeno dva strujanja u suprotnim smjerovima. Veliki vertikalni otvor može se podijeliti u skup elemenata dovoljno male visine Δz , tako da za njih vrijedi izraz (5.101) odnosno izraz (5.101):

$$q_v = C_d \times w \times v(z) \times \Delta z = C_d \times w \times \left[2 \times \frac{\Delta p(z)}{\rho} \right]^{0,5} \times \Delta z \quad (5.100)$$

odnosno:

$$q_m = C_d \times w \times [2 \times \Delta p(z) \times \rho]^{0,5} \times dz \quad (5.101)$$

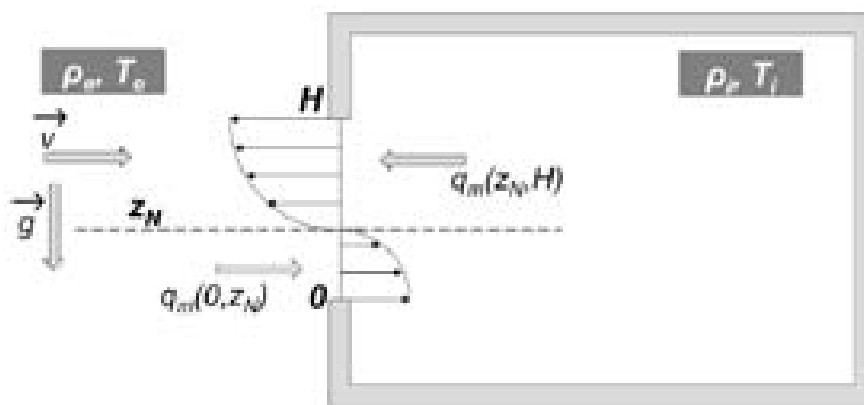
$v(z)$ je horizontalna brzina duž strujnice na visini z , a w je širina otvora.

U slučaju postojanja neutralne ravnine na visini z_N , može se definirati protok zraka iznad i ispod te neutralne ravnine sa slijedećim jednadžbama:

$$q_m(z_N, H) = C_d \int (\text{od } z = 0 \text{ do } z = H - z_N) w \times [2 \times \Delta p(z) \times \rho]^{0,5} \times dz \quad (5.102)$$

i

$$q_m(0, z_N) = C_d \int (\text{od } z = -z_N \text{ do } z = 0) w \times [2 \times \Delta p(z) \times \rho]^{0,5} \times dz \quad (5.103)$$



Slika 5.17 Strujanje zraka kroz veliki otvor, vertikalni presjek

Po definiciji položaj neutralne ravnine nalazi se na visini z_N za koju je $p_i(z) = p_e(z)$. Ako je ravnina neutralnog tlaka smještena u otvoru ($-H/2 < z_N < H/2$) prisutna su dva protoka u suprotnim smjerovima. U drugim slučajevima dolazi do protoka u samo jednom smjeru.

Da bi se našao položaj neutralne osi, dovoljno je napisati bilancu mase. U slučaju pretpostavljenog otvora dobije se tada:

$$\frac{z_N}{(H - z_N)} = \left(\frac{\rho_i}{\rho_e} \right)^{1/3} \quad (5.104)$$

Integracijom izraza (5.103) dobije se protok zraka koji izlazi kroz veliki otvor [99]:

$$q_m(0, z_N) = C_d \times \frac{w}{3} \times (8g \times H^3 \times \rho'_i \times \Delta p)^{0,5} \quad (5.105)$$

s

$$\rho'_i = \frac{\rho_i}{\left[1 + \left(\frac{\rho_i}{\rho_e} \right)^{1/3} \right]^3} \quad (5.106)$$

5.5.5 Protok zraka uslijed izgaranja u ložištima

Dodatni protok vanjskog zraka, potreban za rad uređaja za izgaranje, $q_{v,comb}$, u m^3/h , proračunava se prema HRN EN 15242 [88], kad je uređaj uključen, prema izrazu:

$$q_{v,comb} = 3,6 \times F_{as} \times F_{ff} \times P_{hf} \quad (5.107)$$

gdje je

F_{as} faktor upotrijebljenog sustava za izgaranje, (vrijednost 0 ili 1),

P_{hf} ulazna snaga upotrijebljenog goriva, u kW,

F_{ff} faktor protoka goriva, u $l/(s \times kW)$.

Za isključeni uređaj za izgaranje je $q_{v,comb} = 0$. Tada se dimovodni kanal smatra vertikalnim ventilacijskim kanalom.

Faktor upotrijebljenog sustava za izgaranje, F_{as} , uzima u obzir da li je protok zraka za izgaranje odvojen od prostorije ili nije. Njegova vrijednost je nula kada se zrak za izgaranje uzima iz zraka prostorije, a plinovi izgaranja ostaju u prostoriji (npr. kuhinjska peć) ili kad se zrak za izgaranje dobavlja neposredno izvana posebnim zabrtvljenim kanalom, a dimni plinovi se odsisavaju u poseban kanal (zatvoreno ložište). Ako se zrak za izgaranje uzima iz zraka prostorije i dimni plinovi se odsisavaju u poseban kanal tada je $F_{as} = 1$ (npr. otvoreno ložište).

Faktor protoka goriva, F_{ff} ovisi o specifičnom protoku zraka po vrsti goriva, zahtijevanom za proces izgaranja. Vrijednosti su dane u tablici 5.31.

Tablica 5.31 Faktori protoka goriva

Vrsta goriva	Drvo	Plin				Nafta	Ugljen
Vrsta uređaja	Otvoreno ložište	Zatvoreno ložište s ugrađenim ventilatorom	Otvoreni plin s dimovodom	Otvoreni plinski kuhinjski štednjak	Otvoreni plin	Zatvoreno ložište	Zatvoreno ložište
Faktor protoka goriva dm ³ /s po kW	2,8	0,38	0,78	3,35	3,35	0,32	0,52

5.5.6 Protok zraka uslijed otvaranja prozora

5.5.6.1 Proračun protoka zraka prozračivanjem

U obiteljskim kućama i stambenim zgradama danas se najviše koristi prirodna ventilacija otvaranjem prozora. Strujanje zraka kroz otvoren prozor prouzročeno je kombiniranim djelovanjem vjetra i efekta dimnjaka (toplinskog uzgona). U slučaju jednostavne izloženosti (bez poprečne ventilacije) dominantan je efekt toplinskog uzgona. Ako je temperatura unutarnjeg zraka veća od temperature vanjskog zraka, efekt dimnjaka uvlači vanjski hladniji zrak (dakle i teži) kroz niže dijelove otvora dok unutarnji topliji zrak (dakle i laganiji) izlazi kroz gornje dijelove otvora. Empirijski izraz za procjenu protoka zraka kroz potpuno otvoreno krilo prozora, u slučaju jednostavne izloženosti, koji se koristi u HRN EN 15242 [88], je:

$$q_{v, \text{airing}} = 3600 \times 0,5 \times A_{ow} \times v^{0,5} \quad (5.108)$$

gdje je

$q_{v, \text{airing}}$ protok zraka kroz otvoreni prozor, u m³/h,
 A_{ow} ploština otvora (krila prozora), u m²,
 v efektivna brzina određena izrazom:

$$v = C_t + C_w \times v_{met}^2 + C_{st} \times H_{window} \times \text{abs}(\theta_i - \theta_e) \quad (5.109)$$

Ovdje je:

$C_t = 0,01$ koeficijent koji uzima u obzir turbulenciju vjetra,
 $C_w = 0,001$ koeficijent koji uzima u obzir brzinu vjetra,
 $C_{st} = 0,0035$ koeficijent koji uzima u obzir efekt toplinskog uzgona,
 v_{met} meteorološka brzina vjetra na visini 10 m, u m/s,
 H_{window} visina prozorskog otvora, u m,
 θ_i temperatura zraka u prostoriji, u °C,
 θ_e temperatura vanjskog zraka, u °C.

Ako je razlika između temperatura unutarnjeg i vanjskog zraka mala, protok zraka biti će slab. Izmjena zraka kod jednostavne izloženosti slabo ovisi o srednjoj brzini vjetra.

Za otklopne prozore uzima se da je omjer protoka zraka kroz otvorenu površinu otklopnog prozora i kroz potpuno otvoren prozor ovisan samo o kutu otvaranja krila prozora α :

$$A_{ow} = C_k(\alpha) \times A_w \quad (5.110)$$

gdje je A_w ploština potpuno otvorenog prozora.

Faktor $C_k(\alpha)$, koji ima vrijednost između 0 i 1, može se aproksimirati polinomom:

$$C_k(\alpha) = 2,60 \times 10^{-7} \times \alpha^3 - 1,19 \times 10^{-4} \times \alpha^2 + 1,86 \times 10^{-2} \times \alpha \quad (5.111)$$

U izraz (5.111) α se uvrštava u stupnjevima. ($0^\circ < \alpha < 180^\circ$). Aproksimativni izraz (5.111) primjenjuje se za prozore s parapetom i za odnos visine prema širini otklopnog prozora od oko 1:1 do 2:1.

Pojednostavnjeni proračun

Kod pojednostavnjenog proračuna prema HRN EN 15242 [88], može se uzeti da je:

$$q_{v,airing} = C_{airing} \times \max(q_{v,sup,req}; q_{v,exh,req}) \quad (5.112)$$

gdje je

C_{airing} koeficijent koji uzima u obzir učinkovitost koju postiže korisnik otvaranjem prozora,
 $q_{v,sup,req}$ zahtijevani protok dobavnog zraka,
 $q_{v,exh,req}$ zahtijevani protok odsisnog zraka.

Vrijednost koeficijenta C_{airing} propisuje se u nacionalnim propisima. Kad se kvaliteta unutarnjeg zraka oslanja samo na otvaranje prozora, uzima se u obzir da ponašanje korisnika dovodi do protoka zraka koji je veći od zahtijevanog. Ako nacionalnim propisima nije određeno drugačije, uzima se da je:

$$C_{airing} = 1,8 \quad (5.113)$$

5.5.6.2 Tipična uporaba otvaranja prozora

Vremenski udio otvaranja prozora, $R_{op,w}$, u odnosu na najveće moguće vrijeme s otvorenim prozorom, je:

$$R_{op,w} = Y_{wind} \times Y_{temp} \quad (5.114)$$

gdje je

Y_{wind} faktor utjecaja vjetra,
 Y_{temp} faktor utjecaja vanjske temperature.

$R_{op,w} = 0$ znači da se prozori neće otvarati kroz čitavo analizirano vrijeme (npr. cijeli dan),
 $R_{op,w} = 1$ znači da će prozori biti otvoreni kroz čitavo analizirano vrijeme (npr. cijeli dan),
 $R_{op,w} = 0,5$ znači da će prozori biti otvoreni tijekom polovice analiziranog vremena (npr. 12 sati dnevno).

Faktori u izrazu (5.114) određeni su izrazima:

$$Y_{wind} = 1 - 0,1 \times v_{met} \quad (5.115)$$

$$Y_{temp} = \frac{\theta_e}{25} + 0,2 \quad (5.116)$$

gdje je

v_{met} meteorološka brzina vjetra, u m/s,
 θ_e temperatura vanjskog zraka, u °C.

Vrijednosti faktora Y_{wind} i Y_{temp} ograničene su na najmanju vrijednost 0 i najveću vrijednost 1.

Srednje provjetranje otvaranjem prozora za promatrano vremensko razdoblje dobije se množenjem $q_{v,airing}$ s faktorom $R_{op,w}$.

5.5.7 Određivanje prosječnih vrijednosti protoka zraka

Vrijednosti protoka zraka dobivene metodama proračuna opisanim u točkama 5.5.3 do 5.5.6 vrijede za jedno specificirano stanje sustava ventilacije koje ovisi o tome jesu li kanali otvoreni ili zatvoreni, jesu li ventilatori i uređaji za gorenje uključeni ili isključeni, te za jedan određen skup unutarnjih temperatura i vanjskih klimatskih uvjeta. Kad se ventilacijski sustav, unutar razdoblja koje se promatra, nalazi u nekoliko različitih stanja, protok zraka mora se odrediti za svako postojeće stanje. Iz tih vrijednosti protoka zraka za svako stanje mora se

odrediti prosječna vrijednost protoka zraka za razdoblje koje se istražuje, na temelju različitih vremenskih udjela unutar kojih su aktivna pojedina stanja:

$$q_{v,total,v} = \sum_{allstates\ s} (q_{v,tot,s} \times f_s) \quad (5.117)$$

gdje je:

$q_{v,tot,s}$ protok zraka za vrijeme stanja s ,

f_s udio vremena tijekom kojeg je stanje s aktivno ($0 \leq f_s \leq 1$).

Za satne proračune uzima se samo jedno stanje (npr. jedan proračun svakog sata).

Za mjesečni proračun minimalna stanja koja se moraju uzeti u obzir su:

- razdoblje korištenje / nekorisćenja,
- pet brzina vjetra.

Može se rabiti samo jedan mjesečni prosjek razlike unutarnje i vanjske temperature.

Međurezultati se računaju na najmanje tri značajne znamenke, a krajnji rezultat za protoke zraka prikazuje se na dvije značajne znamenke.

6. PRORAČUN POTREBNE KORISNE ENERGIJE ZA GRIJANJE I KORISNE ENERGIJE ZA HLAĐENJE PROSTORA ZGRADE

6.1 Uvod

Prostoriju ili ograđeni prostor za koje se radi proračuna pretpostavlja da su grijani do dane postavne temperature, nazivamo **grijani prostor**.

Prostoriju ili ograđeni prostor za koje se radi proračuna pretpostavlja da su hlađeni do dane postavne temperature, nazivamo **hlađeni prostor**.

Grijani i / ili hlađeni prostor nazivamo i **kondicionirani prostor**. Kondicionirani prostor zgrade određuje proračunsku granicu zgrade, odnosno toplinsku ovojnici zgrade. Prostoriju ili omeđeni prostor koji nije dio kondicioniranog prostora nazivamo **nekondicionirani prostor**. Područja zgrade koja su nekondicionirana sakupe se u nekondicioniranu zonu (npr. negrijana zona zgrade). Jedna zgrada može imati više nekondicioniranih zona (npr. podrum, tavan,...).

Kondicionirana površina je površina poda kondicioniranog prostora, a uključuje površinu poda svih kondicioniranih etaža. Ploština kondicionirane površine, A_f , u m^2 , može se odrediti primjenom sustava unutarnjih dimenzija, ukupnih unutarnjih dimenzija ili vanjskih dimenzija. Sustav dimenzija, koji treba koristiti, u pravilu se određuje na nacionalnoj razini, ali uvijek treba navesti koji je sustav korišten.

Grijani odnosno hlađeni prostor ograđen je građevnim dijelovima ovojnice zgrade. Ti su građevni dijelovi tijela zgrade ograničeni s dvije paralelne površine od kojih je jedna izložena prostoru koji se promatra.

Postavna (unutarnja) temperatura je najniža predviđena unutarnja projektna temperatura postavljena regulacijskim sustavom u uobičajenom načinu grijanja, odnosno najviša predviđena unutarnja projektna temperatura postavljena regulacijskim sustavom u uobičajenom načinu hlađenja. Vrijednosti postavnih temperatura određuju se na nacionalnoj razini, ovisno o namjeni prostora i svrsi proračuna.

Unutarnja projektna temperatura je aritmetička srednja vrijednost temperature unutarnjeg zraka i srednje temperature zračenja, utvrđena u sredini ograđenog prostora. To je približna vrijednost radne temperature.

Srednja temperatura zračenja je jednolika temperatura unutarnjih površina svih okolnih građevnih dijelova ograđenog prostora kod koje bi osoba u prostoru izmijenila jednaku količinu topline zračenjem kao i kod stvarne nejednolike temperature tih ploha. Srednja temperatura zračenja proračunava se kao prosjek temperatura unutarnjih površina svakog građevnog dijela ovojnice ponderiran njegovom ploštinom.

Radna temperatura (operativna temperatura) je jednolika temperatura ograđenog prostora u kojem bi osoba izmijenila jednaku količinu topline zračenjem i konvekcijom kao u stvarnom prostoru nejednolike temperature.

Vanjska temperatura je temperatura vanjskog zraka. Za proračun prijenosa topline transmisijom pretpostavlja se da je temperatura zračenja vanjskog okoliša jednaka temperaturi vanjskog zraka.

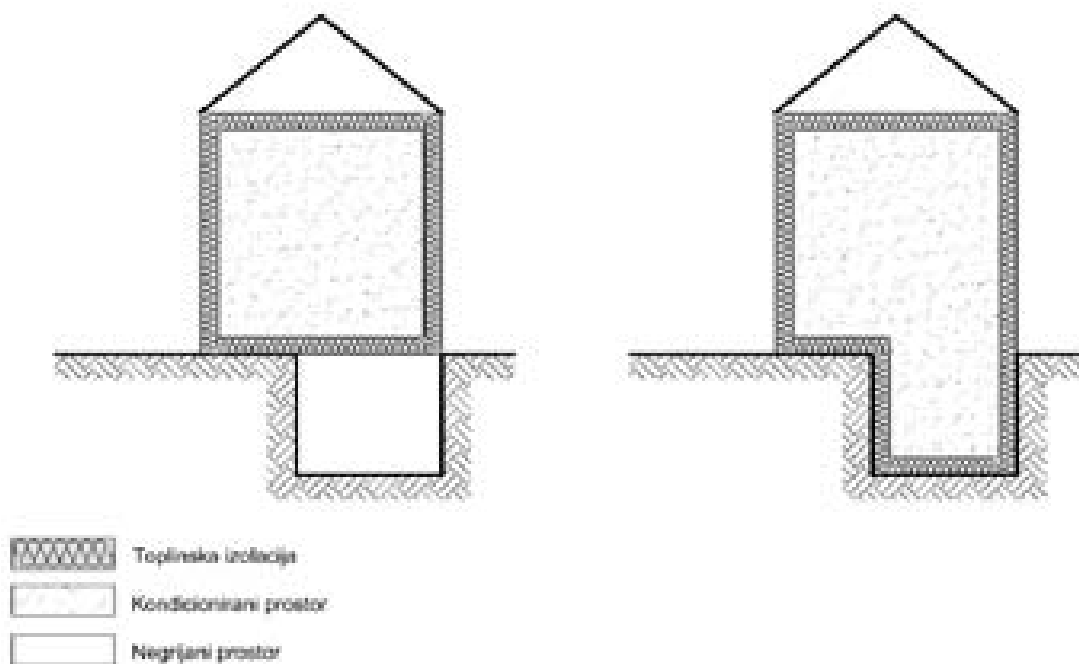
Potrebna korisna energija za grijanje (eng.: energy need for heating), $Q_{H,nd}$, je toplota koja se mora, na kontrolirani način, isporučiti kondicioniranom prostoru radi održavanja predviđene temperature tijekom određenog vremena, ne uzimajući u obzir svojstva tehničkih sustava zgrade.

Potrebna korisna energija za hlađenje (eng.: energy need for cooling), $Q_{C,nd}$, je toplota koja se mora, na kontrolirani način, odvesti iz kondicioniranog prostora radi održavanja predviđene temperature tijekom određenog vremena, ne uzimajući u obzir svojstva tehničkih sustava zgrade.

Potrebnu korisnu energiju za grijanje i potrebnu korisnu energiju za hlađenje prostora zgrade određuje se proračunom. U nastavku je prikazana metodologija proračuna prema normi HRN EN ISO 13790 [100].

6.2 Proračunska granica zgrade i proračunske zone zgrade

Za proračun potrebne korisne energije za grijanje zgrade, $Q_{H,nd}$, i potrebne korisne energije za hlađenje zgrade, $Q_{C,nd}$, prvo se mora, prostorno i vremenski, odrediti proračunska granica zgrade. **Prostornu proračunsku granicu zgrade** čini toplinska ovojnica grijanog / hlađenog dijela zgrade tj. svi građevni dijelovi zgrade koji odvajaju kondicionirani prostor od vanjskog prostora, temeljnog tla, nekondicioniranih prostora zgrade ili susjednih zgrada. Kroz toplinsku ovojnicu zgrade prolaze svi tokovi energije. Relativno mali prostori koji nisu kondicionirani smiju se uključiti unutar proračunske granice zgrade, ali ih se tada mora promatrati kao kondicionirane prostore.



Slika 6.1 Shematski prikaz prostorne proračunske granice zgrade

Nakon što je određena prostorna proračunska granica zgrade, zgrada se, ako je potrebno, podijeli u **proračunske zone** (toplinske zone) s odvojenim proračunima potrebne korisne energije za svaku zonu. Proračun potrebne korisne energije za grijanje i korisne energije za hlađenje provodi se bilanciranjem svih vanjskih i unutarnjih unosa topline i „hladnoće“ u prostor zone, koji nisu upravljani preko unutarnje postavne temperature

Zona je osnovna proračunska jedinica za bilanciranje energije. Cilj zoniranja je skupiti u jednu zonu područja zgrade s homogeno raspodijeljenim izvorima i ponorima topline, a to su u pravilu područja zgrade s jednakim uvjetima korištenja i jednakom vrstom tehničkog kondicioniranja. Ako korištenje dviju prostorija ili vrste njihova kondicioniranja bitno odstupaju jedno od drugog, prostorije se dodjeljuju različitim zonama. Npr. uredske prostorije sa sustavima za grijanje i hlađenje i uredske prostorije iste zgrade sa sustavima za grijanje, hlađenje i prisilnu ventilaciju dodijeliti će se različitim zonama, usprkos jednakog korištenja (uredi).

Kod podjele zgrade na zone najprije se odrede područja jednakog korištenja, a zatim se ona dalje dijele na temelju promjenjive vrste kondicioniranja ili promjenjivih građevinskih karakteristika (npr. bitno različiti udjeli ostakljenih površina u dijelovima vanjskih zidova zone).

Podjela zgrade na toplinske zone nije potrebna ako su zadovoljeni slijedeći uvjeti:

- nema značajnijih razlika u režimu korištenja prostora zgrade,
- postavne temperature za grijanje prostorija ne razlikuju se za više od 4 K,
- svi prostori su bez sustava mehaničkog hlađenja ili svi prostori imaju sustav mehaničkog hlađenja, a postavne temperature za hlađenje prostorija ne razlikuju se za više od 4 K,
- sve prostorije opslužuje isti sustav grijanja (ako postoji) i isti sustav hlađenja (ako postoji),
- ako postoji sustav ili sustavi ventilacije, a najmanje 80 % ploštine poda prostora opslužuje isti sustav ventilacije (tada se smatra da i druge prostore opslužuje glavni sustav ventilacije),
- protok ventilacije prostorija izražen u kubnim metrima po metru kvadratnom ploštine poda u sekundi ne razlikuje se za više od četverostruke vrijednosti na 80 % površine poda ili se, pak, vrata između prostorija često otvaraju.

Ako zgrada ne zadovoljava jedan ili više gornjih uvjeta, podijeli se na različite zone tako da su za svaku pojedinu zonu zgrade zadovoljeni svi gornji uvjeti. Dopuštena je i daljnja podjela na manje zone ako postoje područja zgrade s bitno različitim dobircima topline od unutarnjih izvora ili Sunčeva zračenja.

S brojem zona ne treba pretjerivati jer previše zona može znatno povećati utrošak vremena za proračune, a bez značajnijeg poboljšanja konačnog rezultata bilanciranja energije.

Bitno obilježje zone je jednolična potrebna korisna energija. To znači da je potrebna korisna energija, svedena na neto ploštinu poda zone, jednako velika za svaki isječak zone. Kod bilanciranja topline pretpostavlja se da su svi izvori i ponori topline homogeno razdijeljeni preko neto površine zone.

Ako je zgrada podijeljena na više zona, na nacionalnoj se razini smije odlučiti uz koje uvjete je dopušteno proračunati toplinsku bilancu svake zone neovisno o drugim zonama tj. uz pretpostavku adijabatskih granica između zona. U tom slučaju se govori o proračunu više zona bez toplinske povezanosti zona. Kod tog proračuna ne uzima se u obzir izmjena topline transmisijom i / ili ventilacijom između pojedinih zona. Višezonski proračun bez toplinske povezanosti zona smatra se nezavisnim nizom jednozonskih proračuna.

Kod proračuna više zona s toplinskom povezanošću između zona (proračun s toplinski povezanim zonama) u obzir se uzimaju sve izmjene topline transmisijom i / ili ventilacijom između pojedinih zona.

Određivanje **vremenske proračunske granice zgrade** sastoji se u određivanju vremenskog razdoblja tijekom kojeg se želi utvrditi bilanca energije. Kod zgrada je to obično jedna godina. Da bi se poboljšala točnost proračuna, korisno je proračunati toplinsku bilancu za svaki mjesec i dobivene rezultate za svih 12 mjeseci zbrojiti.

Može se također utvrditi odvojeno bilanca energije za razdoblje grijanja i razdoblje bez grijanja ili razdoblje hlađenja.

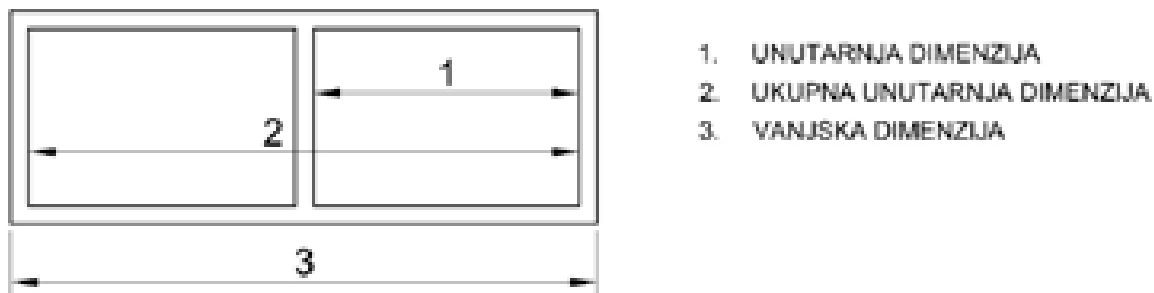
Daljnje poboljšanje točnosti proračuna postiže se utvrđivanjem bilance energije za kratke vremenske intervale, najčešće za svaki sat u godini.

6.3 Određivanje granica zone zgrade, ploštine građevnih dijelova i obujma zone zgrade

Dimenzije građevnih dijelova zgrade radi utvrđivanja njihove ploštine ili radi proračuna obujma zgrade ili zone zgrade mogu se odrediti u skladu s jednim od tri sustava dimenzija:

- sustav unutarnjih dimenzija,
- sustav ukupnih unutarnjih dimenzija,
- sustav vanjskih dimenzija.

Karakteristike pojedinih sustava dimenzija prikazane su na slici 6.2 [101].



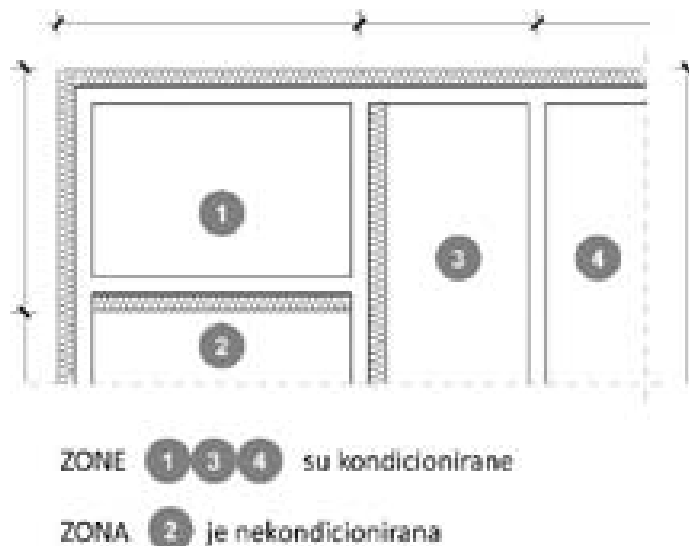
Slika 6.2 Sustavi dimenzija kod određivanja ploština građevnih dijelova zgrade i obujma zgrade

Prema našem tehničkom propisu [58], kod energetskog ocjenjivanja zgrade treba koristiti sustav vanjskih dimenzija.

U slučaju podjele zgrade na više zona, da bi geometrijske vrijednosti izračunate za zgradu kao cjelinu (npr. oplošje, obujam,...) bile jednake zbroju geometrijskih vrijednosti izračunatih za pojedine zone zgrade, potrebno je, kod korištenja sustava vanjskih dimenzija, zadovoljiti slijedeće uvjete:

a) u horizontalnom smjeru (tlocrt zgrade – vidjeti sliku 6.3), prema [102]:

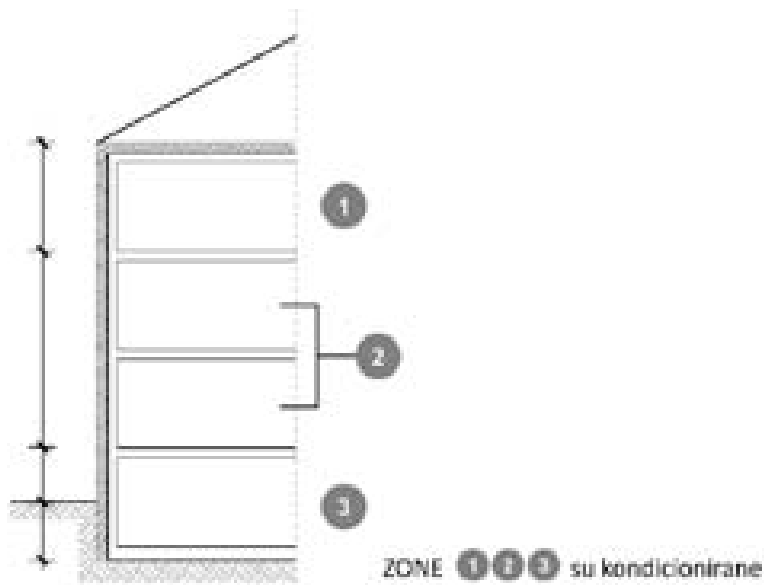
- za vanjske građevne dijelove, vanjska dimenzija uključuje i sloj toplinske izolacije s vanjske strane (ako postoji) i sloj žbuke (ako postoji),
- za unutarnje građevne dijelove između kondicionirane i nekondicionirane zone uzima se vanjska dimenzija kondicionirane zone,
- za unutarnje građevne dijelove između dvije kondicionirane zone (jednakih ili različitih temperatura), za granicu između zona uzima se sredina nosivog sloja, neovisno o položaju eventualnog sloja toplinske izolacije.



Slika 6.3 Isječak tlocrta zgrade s naznačenim zonama i vanjskim dimenzijama

b) u vertikalnom smjeru (presjek zgrade – vidjeti sliku 6.4), prema [102]:

- dimenzije se mjere od gornje plohe nosivih stropnih ploča u svim etažama, neovisno o položaju eventualnog sloja toplinske izolacije, osim kod gornjeg i donjeg završetka zgrade,
- kod gornjeg završetka zgrade, vanjska dimenzija ide do gornje površine sloja toplinske izolacije (ravni ili kosi krov ili strop prema tavanu),
- kod donjeg završetka zgrade vanjska dimenzija ide do donje površine nosive podne ploče.



Slika 6.4 Isječak presjeka zgrade s naznačenim zonama i vanjskim dimenzijama

6.4 Bilanca energije na razini zone zgrade

Prije početka proračuna potrebne korisne energije za grijanje i za hlađenje, ovisno o konkretnim uvjetima, zgrada se podjeli na više proračunskih zona ili se obrađuje kao jedna zona. Najvažnija obilježja zone zgrade su jednaki uvjeti korištenja i jednaka vrsta kondicioniranja svih prostorija u zoni.

Za svaku zonu zgrade odrede se relevantne energijske karakteristike (koeficijenti prolaska topline U pojedinih građevnih dijelova, koeficijenti izmjene topline zone zgrade $H_{tr,adj}$, $H_{ve,adj}$, ...)

Potrebne korisne energije za grijanje i hlađenje zgrade proračunavaju se na osnovi **bilance topline** svake zone zgrade, i za svaku zonu zgrade se moraju odvojeno odrediti. Dobivene korisne energije su ulazni podaci za bilancu energije sustava za grijanje i hlađenje i, u određenim slučajevima, sustava ventilacije (kod zračnog grijanja i / ili hlađenja). Ako postoji više istovrsnih tehničkih sustava koji opskrbljuju energijom istu zonu zgrade, izračunata potrebna korisna energija zone razdijeli se na te sustave.

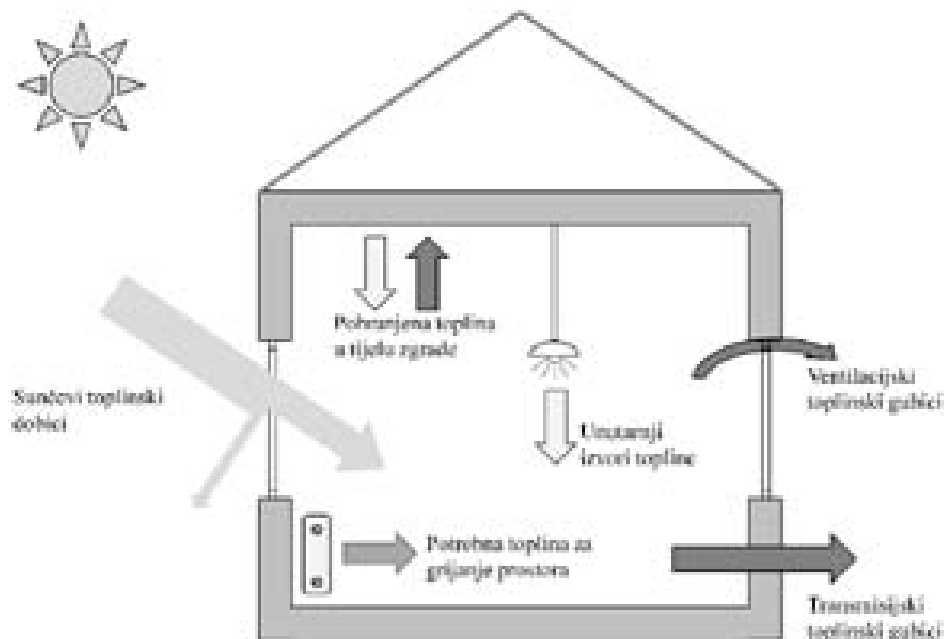
Bilanca energije na razini zgrade temelji se na činjenici da se praktički sva energija koja ulazi u zgradu u konačnici pretvara u toplinu i ta toplota, prije ili kasnije, završi izvan zgrade. Bilanciranje energije je postupak poput računovodstva koje, umjesto financijskih transakcija, bilježi sve ulaske i izlaske energije iz zgrade. Ako je razdoblje promatranja dovoljno veliko (npr. jedna godina) zbroj dobitaka i gubitaka energije biti će uravnotežen. Bilanca energije na razini zone zgrade uključuje slijedeće članove:

- izmjenu topline transmisijom između kondicioniranog prostora i vanjskog prostora, Q_{tr} ,
- izmjenu topline ventilacijom između kondicioniranog prostora i vanjskog prostora, Q_{ve} ,
- transmisijsku i ventilacijsku izmjenu topline između susjednih zona, $Q_{ht,zy}$
- unutarnje dobitke topline (od osoba, uređaja, rasvjete,...), Q_{int} ,
- toplinske dobitke od Sunčeva zračenja (izravne, npr. kroz prozore ili neizravne npr. apsorpcijom neprozirnih građevnih dijelova zgrade), Q_{sol} ,
- akumuliranu toplinu u tijelu zgrade ili otpuštenu toplinu iz tijela zgrade.

Rezultat bilance energije na razini zone zgrade je:

- potrebna korisna energija za grijanje zone zgrade, $Q_{H,nd}$, (ako se zona grije, sustav grijanja opskrbljuje je toplinom kako bi se povećala unutarnja temperatura na zahtijevanu postavnu temperaturu za grijanje),

- potrebna korisna energija za hlađenje zone zgrade, $Q_{C,nd}$, (ako se zona hladi, sustav hlađenja izvlači toplinu kako bi se smanjila unutarnja temperatura na zahtijevanu postavnu temperaturu za hlađenje).



Slika 6.5 Energijski tokovi koji utječu na potrebnu toplinu za grijanje prostora zgrade

Ako je vanjska temperatura viša od unutarnje, količina izmijenjene topline s vanjskim prostorom je negativna.

Bilanca energije zgrade smije uključiti vraćenu energiju u zgradu iz različitih izvora kao što su vraćeni ventilacijski toplinski gubitci, povratni toplinski gubitci iz sustava grijanja i hlađenja i dr.

Kako bi se u obzir uzelo međudjelovanje između različitih zona zgrade ili djelovanje između tehničkih sustava i bilance energije na razini zone zgrade, proračun potrebnih korisnih energija za grijanje i hlađenje može se provesti u više koraka (iteracija), što se smije definirati na nacionalnoj razini.

6.5 Različiti tipovi metoda proračuna

Proračun potrebne korisne energije za grijanje i korisne energije za hlađenje provodi se za proračunsko razdoblje od jedne godine. Ovo proračunsko razdoblje može se podijeliti u određeni broj proračunskih koraka tj. vremenskih intervala: sate, mjeseci ili sezonu grijanja i / ili sezonu hlađenja. Sezona grijanja ili sezona hlađenja je razdoblje godine tijekom kojeg je potrebna energija za grijanje odnosno hlađenje prostora zgrade. (Proračun utemeljen na sezoni grijanja i / ili hlađenja može se provesti za stambene zgrade.)

Načelno postoje dva osnovna tipa metoda proračuna:

- kvazistacionarne metode (mjesečna metoda proračuna i sezonska metoda),
- dinamičke metode (jednostavna satna dinamička metoda i detaljna dinamička metoda).

U kvazistacionarnim metodama bilanca topline se proračunava za dovoljno dugo vrijeme (jedan mjesec ili cijela sezona) što omogućuje da se dinamički učinci uzmu u obzir s pomoću empirijski određenih faktora iskorištenja toplinskih dobitaka i / ili gubitaka.

Kod grijanja, faktorom iskorištenja unutarnjih toplinskih dobitaka i toplinskih dobitaka od Sunčeva zračenja uzima se u obzir činjenica da je samo dio ovih toplinskih dobitaka

iskorišten za smanjenje potrebne korisne energije za grijanje prostora, a ostatak uzrokuje neželjeno povišenje unutarnje temperature iznad postavne vrijednosti.

Kod hlađenja, faktorom iskorištenja toplinskih gubitaka tj. izmjene topline transmisijom i ventilacijom, u obzir se uzima činjenica da je samo dio izmijenjene topline iskorišten za smanjenje potrebne korisne energije za hlađenje prostora, a da „neiskorišteni“ dio nastaje tijekom razdoblja kada ta izmjena topline nema učinka na potrebnu energiju za hlađenje (npr. noću). Kod drugog mogućeg prikaza, slično kao za grijanje, faktorom iskorištenja unutarnjih toplinskih dobitaka i toplinskih dobitaka od Sunčeva zračenja uzima se u obzir činjenica da je samo dio ovih toplinskih dobitaka kompenziran izmjenom topline transmisijom i ventilacijom, uz pretpostavku određene najviše unutarnje temperature. Drugi „neiskorišteni“ dio iziskuje potrebu hlađenja kako bi se izbjeglo neželjeno povišenje unutarnje temperature iznad postavne vrijednosti.

Učinak toplinske tromosti (inercije) u slučaju prekida ili isključenja grijanja, odnosno hlađenja, uzima se u obzir odvojeno.

U dinamičkim metodama bilanca topline se proračunava za kratke vremenske korake (tipično jedan sat), uzimajući u obzir i akumulaciju topline u tijelo zgrade te otpuštenu akumuliranu toplinu iz tijela zgrade. Integriranjem dobivenih vrijednosti za određeno vremensko razdoblje (npr. jedan mjesec, sezonu ili jednu godinu), dobije se potrošena toplinska energija tijekom tog razdoblja. Postoji više dinamičkih metoda proračuna, od vrlo jednostavnih do vrlo složenih.

U mjesečnoj metodi proračuna, za vanjsku temperaturu, θ_e , uzima se srednja mjesečna temperatura vanjskog zraka u °C.

U sezonskoj metodi proračuna za vanjsku temperaturu, θ_e , uzima se srednja temperatura vanjskog zraka tijekom trajanja sezone grijanja (za grijanje) odnosno trajanja sezone hlađenja (za hlađenje).

Trajanje proračunskih vremenskih intervala dano je u tablici 6.1.

Tablica 6.1: Proračunski vremenski intervali i njihova trajanja

Proračunski vremenski interval	Broj dana	Trajanje, t , u Ms
siječanj	31	2,6784
veljača	28	2,4192
ožujak	31	2,6784
travanj	30	2,592
svibanj	31	2,6784
lipanj	30	2,592
srpanj	31	2,6784
kolovoz	31	2,6784
rujan	30	2,592
listopad	31	2,6784
studen	30	2,592
prosinac	31	2,6784
sezona grijanja	vidjeti točku 6.8.7.2	dani x 24 x 3,6 x 10 ⁻³
sezona hlađenja	vidjeti točku 6.9.7.2	dani x 24 x 3,6 x 10 ⁻³

6.6 Postavne temperature zone zgrade

Postavna temperatura za grijanje zone zgrade, $\theta_{\text{int,H,set}}$, dana je izrazom:

$$\theta_{\text{int,H,set}} = \sum A_{f,s} \times \frac{\theta_{\text{int,s,H,set}}}{\sum A_{f,s}} \quad (6.1)$$

gdje je

$\theta_{\text{int,s,H,set}}$ postavna temperatura za grijanje prostora s , izražena u °C,
 $A_{f,s}$ ploština kondicionirane površine poda prostora s , u m².

Postavna temperatura za hlađenje zone zgrade, $\theta_{\text{int,C,set}}$, dana je izrazom:

$$\theta_{\text{int,C,set}} = \sum A_{f,s} \times \frac{\theta_{\text{int,s,C,set}}}{\sum A_{f,s}} \quad (6.2)$$

gdje je

$\theta_{\text{int,s,C,set}}$ postavna temperatura za hlađenje prostora s , izražena u °C,
 $A_{f,s}$ ploština kondicionirane površine poda prostora s , u m².

Određivanje srednje vrijednosti postavne temperature za zonu zgrade provodi se s prosječnim sezonskim, mjesečnim ili satnim podacima, ovisno o tipu proračunske metode.

Ako zona zgrade sadrži prostore s različitim uvjetima korištenja (npr. različiti unutarnji toplinski dobici, sati rasvjete, sati ventilacije, protok ventilacije,...) moraju se za proračun koristiti prosječne vrijednosti parametara određene na bazi ponderiranja s ploštinom prostora s različitim uvjetima korištenja, na jednaki način kako je to gore pokazano za postavnu temperaturu.

Ploština kondicionirane površine, A_f , je ploština poda kondicioniranog prostora. Za njen proračun može se koristiti sustav unutarnjih, ukupnih unutarnjih ili vanjskih dimenzija, a što je nužno specificirati.

Zbroj ploština kondicioniranih površina svih zona zgrade mora biti jednak ploštini kondicionirane površine zgrade.

Vrijednosti postavnih temperatura za uobičajeni način grijanja/hlađenja u pravilu su određene u nacionalnim tehničkim propisima, ovisno o namjeni zgrade. U nedostatku tih podataka mogu se koristiti preporučene vrijednosti iz tablice 6.2.

Tablica 6.2: Primjer postavnih temperatura (ulazni podaci za proračun prijenosa topline) za zgrade različite namjene, prema HRN EN ISO 13790 [100]

Kategorije zgrada prema namjeni	Postavna temperatura za grijanje, °C	Postavna temperatura za hlađenje, °C
Obiteljske kuće	20	26
Višestambene zgrade	20	26
Uredi	20	26
Zgrade za obrazovanje	20	26
Bolnice	22	26
Hoteli i restorani	20	26
Sportske građevine	18	26
Zgrade veleprodaje i maloprodaje	20	26
Zatvoreni plivački bazeni	28	28

6.7 Opći prikaz postupka proračuna

Redoslijed postupanja kod određivanja potrebne korisne energije za grijanje i potrebne korisne energije za hlađenje zgrade je slijedeći:

- a) odabrati tip metode proračuna (mjesečna, satna,...),
- b) odrediti proračunske granice zgrade (granice kondicioniranih i nekondicioniranih prostora), te granice opskrbe tehničkim sustavima,
- c) ako je potrebno odrediti granice različitih proračunskih zona zgrade,
- d) utvrditi rubne uvjete (unutarnja i vanjska klima,...),
- e) za svaku zonu zgrade i za svaki vremenski korak proračunati potrebnu korisnu energiju za grijanje zgrade, $Q_{H,nd}$, i potrebnu korisnu energiju za hlađenje zgrade, $Q_{C,nd}$,
- f) odrediti godišnju potrebnu korisnu energiju za grijanje za zonu zgrade, $Q_{H,nd,an}$ i godišnju potrebnu korisnu energiju za hlađenje za zonu zgrade, $Q_{C,nd,an}$, zbrajanjem potrebnih korisnih energija za pojedine vremenske korake tijekom godine,
- g) odrediti godišnju potrebnu korisnu energiju za grijanje i za hlađenje za danu kombinaciju sustava grijanja, hlađenja i ventilacije, koji opslužuju (opskrbljuju) različite zone, $Q_{H,nd,an,zs}$ i $Q_{C,nd,an,zs}$, zbrajanjem potrebnih korisnih energija za zone zs koje su opsluživane (opskrbljivane) istom kombinacijom sustava.

6.8 Mjesečna i sezonska metoda proračuna potrebne korisne energije za grijanje prostora zone zgrade

6.8.1 Potrebna korisna energija za grijanje

Potrebna korisna energija za grijanje prostora zone zgrade, $Q_{H,nd}$, uz uvjet kontinuiranog grijanja, $Q_{H,nd,cont}$, za koju se pretpostavlja da je veća ili jednaka nuli, proračunava se za svaku zonu i za svaki proračunski vremenski korak (mjesec ili sezona grijanja), pomoću jednadžbe:

$$Q_{H,nd} = Q_{H,nd,cont} = Q_{H,ht} \cdot \eta_{H,g,n} \times Q_{H,g,n} \quad (6.3)$$

gdje je (za svaku zonu zgrade i svaki vremenski korak):

$Q_{H,ht}$ ukupno prenesena (izmijenjena) toplina kod grijanja, određena izrazom (6.4), u MJ,
 $\eta_{H,g,n}$ bezdimenzijski faktor iskorištenja toplinskih dobitaka, određen prema točki 6.8.4.2,
 $Q_{H,g,n}$ ukupni toplinski dobitci kod grijanja, određeni izrazom (6.5), u MJ.

U mjesečnoj metodi proračunski korak je jedan mjesec. Trajanje sezone grijanja kod mjesečne metode proračuna utvrđuje se prema metodi opisanoj u točki 6.8.7.1. U sezonskoj metodi proračunski korak je sezona grijanja. Trajanje sezone grijanja kod sezonske metode proračuna utvrđuje se prema metodi opisanoj u točki 6.8.7.2.

Ako tijekom danog mjeseca postoje intervali s nultom potrebnom energijom za grijanje, to je uzeto u obzir manjom vrijednošću faktora iskorištenja. To se isto odnosi na sezonsku metodu pri čemu se mjesečne vrijednosti zamjene sezonskim prosjecima.

U navedeni proračun nije uključena potrebna latentna energija za ovlaživanje.

Ukupno prenesena toplina kod grijanja, $Q_{H,ht}$, za svaku zonu zgrade i svaki proračunski korak, dana je izrazom:

$$Q_{H,ht} = Q_{H,tr} + Q_{H,ve} \quad (6.4)$$

gdje je (za svaku zonu zgrade i svaki vremenski korak):

$Q_{H,tr}$ ukupno prenesena toplina transmisijom, određena prema točki 6.8.2, u MJ,
 $Q_{H,ve}$ ukupno prenesena toplina ventilacijom, određena prema točki 6.8.3, u MJ.

Prevladavajuća sila pri prijenosu topline je razlika temperature promatranog prostora i temperature okoliša. Dogovorno se uzima da prenesena toplina ima pozitivan predznak ako je toplinski tok usmjeren izvan promatranog prostora (gubitak topline).

Ukupni toplinski dobitci kod grijanja, $Q_{H,gn}$, za zonu zgrade i za određeni proračunski korak, dani su izrazom:

$$Q_{H,gn} = Q_{int} + Q_{sol} \quad (6.5)$$

gdje je (za svaku zonu zgrade i svaki vremenski korak):

Q_{int} zbroj unutarnjih toplinskih dobitaka u promatranom vremenskom razdoblju, određen prema točki 6.14, u MJ,

Q_{sol} zbroj toplinskih dobitaka od Sunčeva zračenja u promatranom vremenskom razdoblju, određen prema točki 6.15, u MJ.

Za razliku od prijenosa topline, prevladavajuća sila koja uzrokuje toplinski tok izvora topline nije razlika temperature promatranog prostora i temperature izvora topline.

Ponori topline koji odvođe toplinu iz zgrade računaju se kao toplinski dobitci s negativnim predznakom.

Dijagram na slici 6.6 prikazuje tokove energije na razini zone zgrade kod grijanja. Širina strelica odgovara vrijednosti toplinskog toka kojeg predstavlja. Iz dijagrama su vidljivi najvažniji tokovi energije o kojima treba voditi računa kod izrade konačnog projektnog rješenja zgrade.



Slika 6.6 Dijagram tokova energije na razini zone zgrade kod grijanja (godišnja bilanca energije)

6.8.2 Prijenos topline transmisijom

Ukupna prenesena toplina transmisijom kod grijanja, $Q_{H,tr}$, izražena u MJ, proračunava se za svaki mjesec ili sezonu, za svaku zonu zgrade, jednadžbom:

$$Q_{H,tr} = H_{tr,adj} \times (\theta_{int,set,H} - \theta_e) \times t \quad (6.6)$$

gdje je (za svaku zonu zgrade i svaki proračunski korak: svaki mjesec ili sezonu grijanja):

$H_{tr,adj}$ ukupni koeficijent prijenosa topline transmisijom za zonu zgrade, prilagođen za razliku unutarnje i vanjske temperature, određen prema točki 6.12, izražen u W/K,

$\theta_{int,set,H}$ postavna temperatura za grijanje za zonu zgrade. Određuje se na nacionalnoj razini ili prema podacima u tablici 6.2,

θ_e temperatura vanjskog okoliša. U mjesečnoj metodi to je mjesečna srednja temperatura vanjskog zraka, a u sezonskoj metodi to je srednja temperatura vanjskog zraka za utvrđenu sezonu grijanja, u °C,

t trajanje proračunskog koraka, prema tablici 6.1, u Ms.

Izmjena topline ili dio izmjene topline može tijekom određenog razdoblja imati negativan predznak.

6.8.3 Prijenos topline ventilacijom

Ukupna prenesena topline ventilacijom kod grijanja, $Q_{H,ve}$, izražena u MJ, proračunava se za svaki mjesec ili sezonu, za svaku zonu zgrade, jednadžbom:

$$Q_{H,ve} = H_{ve,adj} \times (\theta_{int,set,H} - \theta_e) \times t \quad (6.7)$$

gdje je (za svaku zonu zgrade i svaki proračunski korak: svaki mjesec ili sezonu grijanja):

$H_{ve,adj}$	ukupni koeficijent prijenosa topline ventilacijom za zonu zgrade, prilagođen za razliku unutarnje i vanjske temperature, određen prema točki 6.13, izražen u W/K,
$\theta_{int,set,H}$	postavna temperatura za grijanje za zonu zgrade. Određuje se na nacionalnoj razini ili prema podacima u tablici 6.2,
θ_e	temperatura vanjskog okoliša. U mjesečnoj metodi to je mjesečna srednja temperatura vanjskog zraka, a u sezonskoj metodi to je srednja temperatura vanjskog zraka za utvrđenu sezonu grijanja, u °C,
t	trajanje proračunskog koraka, prema tablici 6.1, u Ms.

Prijenos topline ili dio prijenosa topline može tijekom određenog razdoblja imati negativan predznak. Tada se topline dodaje zoni zgrade. To se događa kad je temperatura dobavnog zraka viša od unutarnje temperature.

6.8.4 Dinamički parametri

6.8.4.1 Uvod

Dinamička metoda proračunava bilancu topline za kratke vremenske korake uzimajući u obzir akumuliranu toplinu u tijelu zgrade i otpuštenu toplinu iz tijela zgrade. U mjesečnoj i sezonskoj metodi dinamički se učinci uzimaju u obzir uvođenjem bezdimenzijskih faktora iskorištenje dobitaka za grijanje, $\eta_{H,gn}$. Najviša vrijednost faktora iskorištenja, $\eta_{H,gn,max} = 1$, bila bi dostignuta kad bi se ukupna dozračena sunčeva energija i svi unosi energije unutarnjih izvora topline mogli pohraniti u tijelu zgrade i u potrebno vrijeme ponovno predati na zrak prostorije. U realnim situacijama, međutim, samo dio te energije je akumuliran, a ostatak je odveden iz prostora ili izmjenom zraka prostora zgrade ili preko ugrađenog sustava hlađenja. Toplinski dobitci ne mogu se, dakle, nikada iskoristiti 100 %. Vrlo visoki Sunčevi i unutarnji dobitci topline vode ka pregrijavanju prostora zgrade.

U razdoblju grijanja, faktorom iskorištenja unutarnjih i Sunčevih toplinskih dobitaka uzima se, dakle, u obzir činjenica da se samo dio ovih toplinskih dobitaka iskorištava za smanjenje potrebne korisne energije za grijanje, a ostatak, ako se ne odstrani, uzrokuje neželjeni porast unutarnje temperature iznad postavnih vrijednosti. Tim iskorištenim dijelom unutarnjih i Sunčevih toplinskih dobitaka nadoknađuju se gubitci topline uslijed prijenosa topline transmisijom i ventilacijom. Zbog drugog „neiskorištenog“ dijela potrebno je hlađenje kako bi se spriječilo neželjeno povišenje unutarnje temperature iznad postavne vrijednosti. Zato je faktor iskorištenja toplinskih dobitaka ujedno i mjera za pregrijavanja prostora.

Učinak tromosti kod prekida grijanja ili njegova isključenja uzima se u obzir odvojeno, prema točki 6.8.5.

6.8.4.2 Faktor iskorištenja toplinskih dobitaka za grijanje

Faktor iskorištenja toplinskih dobitaka za grijanje, $\eta_{H,gn}$, predstavlja udio Sunčevih i unutarnjih dobitaka topline u grijanju zgrade. Određuje se približno izrazima (6.8) do (6.10) koji su dobiveni na bazi nestacionarnog proračuna. Kod mjesečne i sezonske metode, faktor $\eta_{H,gn}$ funkcija je omjera toplinskih dobitaka i toplinskih gubitaka kod grijanja, γ_H , te brojčanog parametra, a_H , koji ovisi o toplinskoj tromosti zgrade, koja se, pak, karakterizira vremenskom konstantom zone zgrade, τ . Faktor iskorištenja toplinskih dobitaka za grijanje, $\eta_{H,gn}$, određuje se prema slijedećim izrazima:

- ako je $\gamma_H > 0$ i $\gamma_H \neq 1$:

$$\eta_{H,gn} = \frac{(1 - y_H^{a_H})}{(1 - y_H^{a_H+1})} \quad (6.8)$$

- ako je $\gamma_H = 1$:

$$\eta_{H,gn} = \frac{a_H}{(a_H + 1)} \quad (6.9)$$

- ako je $\gamma_H < 0$:

$$\eta_{H,gn} = \frac{1}{y_H} \quad (6.10)$$

gdje je (za svaki mjesec ili sezonu grijanja i za svaku zonu zgrade):

γ_H omjer dobitaka i gubitaka topline kod grijanja. To je bezdimenzijska veličina, određena izrazom:

$$\gamma_H = \frac{Q_{H,gn}}{Q_{H,ht}} \quad (6.11)$$

$Q_{H,gn}$ ukupni toplinski dobitak pri grijanju, prema izrazu (6.5), u MJ,

$Q_{H,ht}$ ukupni prijenos (gubitak) topline pri grijanju, prema izrazu (6.4), u MJ,

a_H bezdimenzijski parametar ovisan o vremenskoj konstanti, τ_H , određen izrazom:

$$a_H = a_{H,0} + \frac{\tau}{\tau_{H,0}} \quad (6.12)$$

$a_{H,0}$ referentni parametar, prema tablici 6.3,

τ vremenska konstanta zone zgrade, prema izrazu (6.20), u satima,

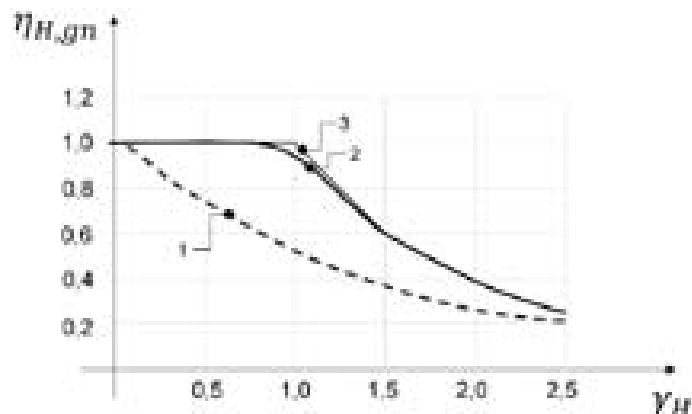
$\tau_{H,0}$ referentna vremenska konstanta, u satima, prema tablici 6.3.

Vrijednosti $a_{H,0}$ i $\tau_{H,0}$ su empirijske vrijednosti, a smiju se odrediti i na nacionalnoj razini, ovisno o svrsi proračuna.

Tablica 6.3 Vrijednosti referentnog parametra $a_{H,0}$ i referentne vremenske konstante $\tau_{H,0}$

Tip metode	$a_{H,0}$	$\tau_{H,0}$ (sati)
Mjesečna proračunska metoda	1,0	15
Sezonska proračunska metoda	0,8	30

Na slici 6.7 prikazana je, za slučaj grijanja zgrade, tipična ovisnost faktora iskorištenja, $\eta_{H,gn}$, o odnosu toplinskih dobitaka i toplinskih gubitaka, γ_H , za različite vrijednosti vremenske konstante zgrade, kod mjesečne metode proračuna.



- 1 – zgrada male toplinske inercije ($\tau = 8$ sati)
 2 – zgrada velike toplinske inercije ($\tau = 7$ dana)
 3 – teoretska vrijednost za beskonačno veliku vremensku konstantu

Slika 6.7 Ovisnost faktora iskorištenja toplinskih dobitaka, $\eta_{H,gn}$, o odnosu toplinskih dobitaka i toplinskih gubitaka γ_H , za zgrade različite toplinske inercije.

Za pretvorbu mjesečnih faktora iskorištenja u sezonski faktor, $\eta_{H,gn,seas}$, može se koristiti odnos:

$$\eta_{H,gn,seas} = \frac{(\sum Q_{H,ht,m} - \sum Q_{H,nd,m})}{\sum Q_{H,gn,m}} \quad (6.13)$$

$Q_{H,ht,m}$, $Q_{H,nd,m}$ i $Q_{H,gn,m}$ su mjesečne vrijednosti za svaki mjesec m koji je unutar utvrđene duljine sezone grijanja.

Faktor iskorištenja određuje se neovisno o sustavu grijanja. Pretpostavlja se dobra regulacija temperature i kontinuirano prilagođavanje snage grijanja. Utjecaj regulacije temperature u prostoru na iskoristivost toplinskih dobitaka uzima se u obzir kod iznalaženja toplinskih gubitaka sustava grijanja kao gubici predaje topline u prostor.

6.8.4.3 Efektivni toplinski kapacitet zgrade

Tijelo zgrade, zbog svoje mase, ima sposobnost da kod zagrijavanja prostora u sebi pohranjuje toplinu i kod hlađenja prostora pohranjenu toplinu ponovno predaje prostoru. Svojstvo građevnog dijela zgrade da u sebi, kod zagrijavanja, pohranjuje toplinu nazivamo **toplinskim kapacitetom** i označava oznakom C . Prostor zgrade s većim toplinskim kapacitetom zagrijava se polaganije, ali se također, kod prestanka dovodenja topline, i hladi polaganije, nego prostor s malim toplinskim kapacitetom.

Visoki toplinski kapacitet zgrade omogućava bolje iskorištenje toplinskih dobitaka od Sunčeva zračenja i unutarnjih izvora topline. Toplinski kapacitet postaje djelotvoran (efektivan) tek ako se mijenja okolna temperatura (npr. temperatura u zgradi zbog Sunčeva zračenja). Količine prihvaćene i otpuštene topline ovise o trajanju oscilacija promjene temperature. Tipičan period oscilacija temperature unutarnjeg prostora zgrade iznosi 24 sata. Toplinu uskladištenu u tijelu zgrade kada unutarnja temperatura oscilira po zakonu sinusoide s periodom od 24 sata i amplitudom 1 K, nazivamo **efektivni toplinski kapacitet** zgrade odnosno zone zgrade, C_m . On je, dakle, jednak promjeni količine topline pohranjene u tijelu zgrade kada se unutarnja temperatura promjeni za 1 K.

U mjesečnoj i sezonskoj metodi, efektivni toplinski kapacitet zgrade za zonu zgrade, C_m u J/K, proračunava se zbrajanjem efektivnih toplinskih kapaciteta svih građevnih dijelova zgrade koji su u izravnom toplinskom dodiru s unutarnjim zrakom promatrane zone. Kod toga se koristi izraz:

$$C_m = \sum_j K_j \times A_j \quad (6.14)$$

gdje je:

- κ_j efektivni toplinski kapacitet po jedinici ploštine građevnog dijela j zgrade, u $J/(m^2K)$. To je karakteristika koja kvantificira svojstvo pohrane topline u građevni dio j zgrade,
 A_j ploština građevnog dijela j zgrade, u m^2 .

Efektivni toplinski kapacitet po jedinici ploštine građevnog dijela zgrade, κ_j , može se odrediti detaljnom metodom koja se osniva na jednadžbi jednodimenzionalnog vođenja topline u višeslojnim ravninskim građevnim dijelovima uz sinusne rubne uvjete ili pojednostavnjenom metodom koja se osniva na proračunu dubine prodiranja toplinskog vala za građevni materijal uz površinu građevnog dijela. Pojednostavnjena metoda proračuna sasvim je prikladna za procjenu utroška energije.

Periodička dubina prodiranja, δ u m, toplinskog vala u homogeni materijal beskonačne debljine koji je izložen na površini sinusnim promjenama temperature, je dubina na kojoj je amplituda promjene temperature smanjena faktorom $1/e$ ($e = 2,718...$ je baza prirodnih logaritama). Proračunavamo je pomoću izraza (4.188).

Ako na promatranjoj strani građevnog dijela zgrade prvi sloj ima debljinu d manju od polovice svoje periodičke dubine prodiranja, te ako je idući sloj od toplinsko-izolacijskog materijala, tada se plošni efektivni toplinski kapacitet građevnog dijela na promatranjoj strani procjenjuje izrazom:

$$K_j = d \times \rho \times c \quad (6.15)$$

Ako na promatranjoj strani građevnog dijela zgrade prvi sloj ima debljinu d veću od dvostruke vrijednosti svoje periodičke dubine prodiranja, tada se sloj može smatrati beskonačno debelim, a plošni efektivni toplinski kapacitet građevnog dijela na promatranjoj strani procjenjuje se izrazom:

$$K_j = \frac{\delta \times \rho \times c}{(2)^{0.5}} \quad (6.16)$$

Daljnje pojednostavnjenje proračuna efektivnog toplinskog kapaciteta je uporaba metode efektivne debljine. Utjecaj akumulacije topline s obzirom na iskorištavanje Sunčeve energije može se uzeti u obzir samo do određene debljine građevnog dijela zgrade, mjerene sa strane površine koja graniči s unutarnjim zrakom. Tu debljinu jedne strane građevnog dijela nazivamo **efektivna debljina**. Uz pretpostavku da je toplinska difuzivnost materijala $a = 0,7 \times 10^{-6} m^2/s$ (približna vrijednost za beton, mort i žbuku), približna vrijednost efektivne debljine je najmanja od slijedećih vrijednosti:

- polovine ukupne debljine promatranog građevnog dijela zgrade,
- debljine sloja između promatrane površine građevnog dijela i prvog toplinsko-izolacijskog sloja,
- najveće efektivne debljina koja za period oscilacija 24 sata iznosi 10 cm.

Sunčevim zračenjem uzrokovan porast unutarnje temperature, zbog ograničenog trajanja Sunčeva zračenja preko dana, uzrokuje efekt akumulacije topline samo do najviše 10 cm dubine građevnog dijela.

Približna vrijednost ukupnog efektivnog toplinskog kapaciteta površina građevnih dijelova zgrade, koja je u dodiru sa zrakom zone, određuje se izrazom:

$$C_m = \sum_j c_j \times \rho_j \times d_j \times A_j \quad (6.17)$$

gdje je d_j efektivna debljina sloja, a A_j ploština građevnog dijela zgrade j u m^2 . Zbrajanje se provodi preko svih površina građevnih dijelova zgrade j , koji su u dodiru s unutarnjim zrakom. Efektivni toplinski kapacitet građevnog dijela koji se u cijelosti nalazi u promatranjoj zoni proračunava se kao zbroj efektivnih toplinskih kapaciteta proračunatih za obje površine građevnog dijela.

U mjesečnoj i sezonskoj metodi efektivni toplinski kapacitet treba obuhvatiti i djelovanje prijelaza topline, R_s . Zato, nakon što je procijenjen prema gornjim izrazima, efektivni toplinski kapacitet građevnog dijela zgrade ispravi se uključivanjem otpora prijelaza topline, R_s u $(m^2 \times K)/W$. Ekvivalentni plošni efektivni toplinski kapacitet, κ'_j , građevnog dijela zgrade j , uključujući otpor prijelaza topline, R_s ili toplinski otpor R sloja zanemarive mase koji prekriva građevni dio velike mase, procjenjuje se iz izraza:

$$\kappa'_j = \left\{ \frac{K_j^2}{1 + \omega^2 \times K_j^2 \times (R + R_s)^2} \right\}^{0.5} \quad (6.18)$$

gdje je:

R_s otpor prijelaza topline, u $m^2 \times K/W$,

κ_j plošni efektivni toplinski kapacitet građevnog dijela velike mase, u $J/(m^2 \times K)$,

ω kružna frekvencija, u rad/s , $\omega = 2\pi / T$, gdje je T period promjena temperature, u s .

Ukupni efektivni toplinski kapacitet zone zgrade, C'_m , izračunat s vrijednostima κ'_j , manji je od C_m . Za grubu procjenu može se uzeti da je $C'_m \approx 0,75 \times C_m$. Ta procjena zadovoljava ako se za radnu temperaturu prihvati da je približno jednaka aritmetičkoj sredini temperature unutarnjeg zraka i srednje površinske temperature.

Za određene tipove zgrada i određene namjene mogu se na nacionalnoj razini koristiti i zadane vrijednosti efektivnog toplinskog kapaciteta, C_m . Ako tih vrijednosti na nacionalnoj razini nema, mogu se upotrijebiti vrijednosti iz tablice 6.4.

Tablica 6.4 Zadane vrijednosti efektivnog toplinskog kapaciteta za mjesečnu i sezonsku metodu

Razred zone zgrade ^a	Mjesečna i sezonska metoda, C_m u J/K
Vrlo lagana ($m' \leq 100 \text{ kg/m}^2$)	$80.000 \times A_f$
Lagana ($100 \text{ kg/m}^2 < m' \leq 250 \text{ kg/m}^2$)	$110.000 \times A_f$
Srednja ($250 \text{ kg/m}^2 < m' \leq 400 \text{ kg/m}^2$)	$165.000 \times A_f$
Teška ($400 \text{ kg/m}^2 < m' \leq 550 \text{ kg/m}^2$)	$260.000 \times A_f$
Vrlo teška ($m' > 550 \text{ kg/m}^2$)	$370.000 \times A_f$
^a smije se specificirati na nacionalnoj razini, vidi [58]	

A_f je ploština kondicionirane površine poda u m^2 .

Kod odabira razreda zone zgrade s obzirom na njenu masu, teškom zonom se smatra zgrada s masivnim unutarnjim i vanjskim građevnim dijelovima (gustoća $\geq 1\,000 \text{ kg/m}^3$), bez ovješanih stropova, bez sloja toplinske izolacije s unutrašnje strane vanjskih građevnih dijelova te zgrade s prostorijama koje nisu velike visine (prostorije velike visine su npr. razne visoke hale i sl.).

Prema našem Tehničkom propisu [58], razred zone zgrade iz tablice 6.4 određuje se prema plošnoj masi pregradnih građevnih dijelova zgrade, m' , navedenoj u zgradama u prvom stupcu tablice 6.4.

6.8.4.4 Vremenska konstanta zgrade

Vremenska konstanta zone zgrade, τ , u satima, karakteristika je unutarnje toplinske tromosti kondicionirane zone za razdoblja grijanja i hlađenja. Proračunava se jednadžbom:

$$\tau = \frac{\left(\frac{C_m}{3600}\right)}{(H_{tr,adj} + H_{ve,adj})} \quad (6.19)$$

gdje je:

C_m efektivni toplinski kapacitet zgrade ili zone zgrade (odnosi se na dinamičko toplinsko ponašanje građevnog dijela zgrade), u J/K,

$H_{tr,adj}$ reprezentativna vrijednost koeficijenta ukupnog prijenosa topline transmisijom, prilagođenog za razliku unutarnje i vanjske temperature, u W/K,

$H_{ve,adj}$ reprezentativna vrijednost koeficijenta ukupnog prijenosa topline ventilacijom, prilagođenog za razliku unutarnje i vanjske temperature, u W/K.

Reprezentativne vrijednosti $H_{tr,adj}$ i $H_{ve,adj}$ su vrijednosti koje su reprezentativne za prevladavajuću sezonu (grijanja ili hlađenja). Primjerice: mjesečna vrijednost za mjesec usred zime u klimi s prevladavajućim grijanjem ili mjesečna vrijednost za mjesec usred ljeta za klimu s prevladavajućim hlađenjem.

Vremenska konstanta, τ , je fiktivna mjera „vremena ohlađivanja“ zone zgrade za 1 K.

6.8.5 Grijanje s prekidima i razdobljima nekorištenja

Vrijednosti postavnih temperatura s kojima se provodi proračun izmjene topline, $Q_{H,ht}$, ovise o načinu grijanja, kod čega se razlikuje:

- kontinuirano grijanje uz konstantnu vrijednost postavne temperature,
- smanjena vrijednost postavne temperature ili potpuno isključenje grijanja tijekom noći i / ili vikendom,
- dulja razdoblja nekorištenja zgrade (npr. kod škola za vrijeme školskih praznika).

Za kontinuirano grijanje tijekom cijelog razdoblja grijanja za proračun se koristi postavna temperatura za grijanje za zonu zgrade u uobičajenom načinu grijanja, $\theta_{int,H,set}$.

Pod prekidom grijanja podrazumijeva se ili smanjenje pogona grijanja ili njegovo potpuno isključenje tijekom noći. Smanjenje pogona grijanja znači smanjenje temperature ogrjevnog medija u polaznomvodu u odnosu na uobičajeni pogon, a cirkulacijske pumpe ostaju u pogonu. Kod smanjenja pogona grijanje ili noćnog isključenja sustava grijanja, smanjivati će se temperatura prostora zgrade. Posljedica smanjenja ili prekida grijanja je, dakle, nestacionarna unutarnja temperatura. Njena vrijednost ovisiti će o efektivnom toplinskom kapacitetu zone zgrade, zatim o specifičnim gubitcima topline zone zgrade te o tromosti samog sustava grijanja. Promjena unutarnje temperature biti će to manja što je viša razina toplinske izolacije i što je veći efektivni toplinski kapacitet.

Grijanje s prekidom smatrati će se kvazikontinuiranim grijanjem s prilagođenom postavnom temperaturom, ako su zadovoljeni slijedeći uvjeti:

- promjene postavne temperature između razdoblja uobičajenog grijanja i razdoblja smanjenog grijanja manje su od 3 K, i
- vremenska konstanta zone zgrade, τ , (vidjeti točku 6.8.4.4) manja je od 0,2 puta trajanje najkraćeg razdoblja smanjenog grijanja.

Prilagođena postavna temperatura za proračun tada je vremenski prosjek postavnih temperatura.

Ako je vremenska konstanta zgrade, τ , veća od trostrukog trajanja najduljeg razdoblja smanjenog grijanja, postavna temperatura za proračun je postavna temperatura uobičajenog načina grijanja.

Ako postoji grijanje s prekidom koje ne ispunjava gornje uvjete, proračun se provodi kao da se radi o kontinuiranom grijanju za razdoblje uobičajenog načina grijanja, a dobiveni rezultat se množi s **faktorom smanjenja za grijanje s prekidom**, $a_{H,red}$. Dakle, potrebna korisna energija za grijanje, izražena u MJ, u slučaju prekidanog grijanja, $Q_{H,nd,interm}$, proračunava se za svaku zonu zgrade i za svaki proračunski korak (mjesec ili sezona grijanja) prema izrazu:

$$Q_{H,nd,interm} = a_{H,red} \times Q_{H,nd,cont} \quad (6.20)$$

Bezdimenzijski faktor smanjenja za grijanje s prekidom, $a_{H,red}$, proračuna se iz jednadžbe:

$$a_{H,red} = 1 - b_{H,red} \times \left(\frac{\tau_{H,0}}{\tau} \right) \times y_H \times (1 - f_{H,hr}) \quad (6.21)$$

gdje je:

$f_{H,hr}$ dio broja sati u tjednu s uobičajenom vrijednosti postavne temperature grijanja (npr. za uobičajeno grijanje 14 sati dnevno, pet dana u tjednu:

$$f_{H,hr} = (14 \times 5) / (24 \times 7) = 0,42)$$

$b_{H,red}$ empirijski faktor korelacije s vrijednošću $b_{H,red} = 3$,

τ vremenska konstanta zone zgrade (vidjeti točku 6.8.4.4), izražena u satima,

$\tau_{H,0}$ referentna vremenska konstanta zone zgrade za grijanje (iz tablice 6.3), izražena u satima,

y_H omjer toplinskih dobitaka i toplinskih gubitaka za grijanje (vidjeti točku 6.8.4.2).

Najmanja vrijednost faktora smanjenja je $a_{H,red} = f_{H,hr}$, a najveća vrijednost iznosi $a_{H,red} = 1$.

U slučaju duljeg razdoblja nekorištenja zone zgrade, u mjesečnoj metodi proračuna, za mjesec u kojem nastupa razdoblje nekorištenja, proračun se provede dva puta, jednom za razdoblje uobičajenog korištenja grijanja, a drugi put za razdoblje nekorištenja, a zatim se dobiveni rezultati linearno interpoliraju u skladu s trajanjem vremena nekorištenja, prema jednadžbi:

$$Q_{H,nd} = (1 - f_{H,nocc}) \times Q_{H,nd,occ} + f_{H,nocc} \times Q_{H,nd,nocc} \quad (6.22)$$

gdje je:

$Q_{H,nd,occ}$ potrebna korisna energija za grijanje, $Q_{H,nd,cont}$ ili $Q_{H,nd,interm}$, izračunata uz pretpostavku da su za sve dane u mjesecu regulacija i termostat postavljeni za razdoblje korištenja, izražena u MJ,

$Q_{H,nd,nocc}$ potrebna korisna energija za grijanje, $Q_{H,nd,cont}$ ili $Q_{H,nd,interm}$, izračunata uz pretpostavku da su za sve dane u mjesecu regulacija i termostat postavljeni za razdoblje nekorištenja, izražena u MJ,

$f_{H,nocc}$ dio mjeseca u kojem nastupa razdoblje nekorištenja (npr. u mjesecu siječnju grijanje neće raditi 10 dana: $f_{H,nocc} = 10/31 = 0,32$).

6.8.6 Godišnja potrebna korisna energija za grijanje

Godišnja potrebna korisna energija za grijanje zone zgrade, $Q_{H,nd,an}$, izražena u MJ, dobije se kao zbroj proračunatih potrebnih korisnih energija po proračunskim vremenskim intervalima:

$$Q_{H,nd,an} = \sum_i Q_{H,nd,i} \quad (6.23)$$

gdje je:

$Q_{H,nd,i}$ potrebna korisna energija za grijanje promatrane zone u proračunskom vremenskom koraku i (mjesec), u MJ, uzimajući u obzir moguće ponderiranje za različite načine grijanja (prekide grijanja ili razdoblja nekorištenja).

U slučaju proračuna s više zona, godišnja potrebna korisna energija za grijanje svih zona zs , koje opslužuje isti sustav grijanja, $Q_{H,nd,an,zs}$, je suma godišnjih potrebnih korisnih energija za zone zs koje su opsluživane istim sustavom grijanja:

$$Q_{H,nd,an,zs} = \sum_z Q_{H,nd,an,z} \quad (6.24)$$

gdje je:

$Q_{H,nd,an,z}$ godišnja potrebna korisna energija za grijanje zone z , izražena u MJ.

U opisanim proračunima nije uključena potrebna latentna toplina za ovlaživanje.

Ako dva ili više sustava grijanja opskrbljuje toplinom naizmjenično istu zonu zgrade, tada izračunatu godišnju potrebnu korisnu energiju za grijanje zone treba podijeliti na dva dijela prema izrazima:

$$\begin{aligned} Q_{H,nd,pref} &= f_{pref} \times Q_{H,nd} \\ Q_{H,nd,npref} &= (1 - f_{pref}) \times Q_{H,nd} \end{aligned} \quad (6.25)$$

gdje je

$Q_{H,nd,pref}$	dio potrebne energije za grijanje koju daje sustav grijanja koji ima prednost, u J,
$Q_{H,nd,npref}$	dio potrebne energije za grijanje koju daje sustav grijanja koji nema prednost, u J,
f_{pref}	dio ukupne potrebne energije koju isporučuje sustav grijanja koji ima prednost, u skladu s njegovim kapacitetom.

Potrebna konačna energija za rad pojedinih sustava grijanja određuje se odvojeno za $Q_{H,nd,pref}$ i $Q_{H,nd,npref}$ koji se dodjeljuju pridruženim sustavima grijanja.

6.8.7 Trajanje sezone grijanja za potrebe proračuna parametara koji ovise o trajanju sezone

6.8.7.1 Mjesečna metoda proračuna

Određivanje trajanja sezone grijanja potrebno je radi određivanja broja sati rada određenih uređaja, koji je ovisan o trajanju sezone (npr. rada pumpi, ventilatora, centralnog predgrijanja,...). Trajanje sezone grijanja, L_H , izraženo u mjesecima, proračunava se prema izrazu:

$$L_H = \sum f_{H,m} \quad (\text{od } m = 1 \text{ do } m = 12) \quad (6.26)$$

gdje je $f_{H,m}$ dio mjeseca koji pripada sezoni grijanja, a proračuna se iz izraza:

$$f_H = \frac{Q_{H,nd}}{(Q_{H,nd} + Q_{C,nd} + Q_{V,pre-heat} + Q_{V,pre-cool})} \quad (6.27)$$

Ovdje je:

$Q_{H,nd}$	mjesečna potrebna korisna energija za grijanje, određena prema točki 6.8.1, izražena u MJ,
$Q_{C,nd}$	mjesečna potrebna korisna energija za hlađenje, određena prema točki 6.9.1, izražena u MJ,
$Q_{V,pre-heat}$	mjesečna potrebna korisna energija za predgrijanje zraka za ventilaciju, izražena u MJ, (vidjeti točku 6.13),
$Q_{V,pre-cool}$	mjesečna potrebna korisna energija za predhlađenje zraka za ventilaciju, izražena u MJ, (vidjeti točku 6.13).

Vrijednost veličine f_H može se odrediti i na slijedeći način:

Najprije se odredi granična vrijednost omjera toplinskih dobitaka i toplinskih gubitaka za grijanje, $\gamma_{H,lim}$, pomoću jednadžbe:

$$\gamma_{H,lim} = \frac{(a_H + 1)}{a_H} \quad (6.28)$$

gdje je a_H bezdimenzijski parametar prema točki 6.8.4.2.

Zatim se za svaki mjesec odredi:

- vrijednost γ_H na početku mjeseca. Ona se proračuna kao srednja vrijednost γ_H promatranog mjeseca i prethodnog mjeseca. Zatim se odredi vrijednost γ_H za kraj mjeseca. Ta se vrijednost proračuna kao srednja vrijednost γ_H promatranog mjeseca i slijedećeg mjeseca. Manju od dviju vrijednosti označimo kao $\gamma_{H,1}$, a veću $\gamma_{H,2}$.

Negativne vrijednosti γ_H zamjenimo vrijednostima najbližeg mjeseca s pozitivnim vrijednostima γ_H .

- Ako je $\gamma_{H,2} < \gamma_{H,lim}$, cijeli mjesec je dio razdoblja grijanja tj. $f_H = 1$.
- Ako je $\gamma_{H,1} > \gamma_{H,lim}$, cijeli mjesec ne pripada razdoblju grijanja tj. $f_H = 0$.
- Inače, dio mjeseca je dio razdoblja grijanja:
 - ako je $\gamma_H > \gamma_{H,lim}$, tada je $f_H = 0,5 \times (\gamma_{H,lim} - \gamma_{H,1}) / (\gamma_H - \gamma_{H,1})$
 - ako je $\gamma_H \leq \gamma_{H,lim}$, tada je $f_H = 0,5 + 0,5 \times (\gamma_{H,lim} - \gamma_H) / (\gamma_{H,2} - \gamma_H)$

6.8.7.2 Sezonska metoda proračuna

Trajanje sezone grijanja ovisi bitno o toplinskim gubitcima i toplinskim dobitcima zone zgrade. Zato ono ne može biti unaprijed propisano već se mora utvrditi posebno za svaku zgradu. Utvrđeno trajanje sezone grijanja služi kao proračunsko razdoblje za proračun bilance topline tijekom sezone grijanja te za određivanja broja sati rada određenih uređaja, koji je ovisan o trajanju sezone (npr. rada pumpi, ventilatora, centralnog predgrijanja,...). Trajanje sezone grijanja može se proračunati metodom navedenom u nastavku.

Sezona grijanja uključuje sve dane za koje toplinski dobitci, proračunani s faktorom iskorištenja dobitaka za grijanje, $\eta_{H,gn,1}$, nisu u ravnoteži s izmjenom topline (toplinskim gubitcima). Takova situacija nastaje kada je

$$\theta_{e,day} \leq \theta_{i,set,H,day} - \frac{(\eta_{H,gn,1} \times Q_{gn,day})}{[(H_{tr,adj} + H_{ve,adj}) \times t_{day}]} \quad (6.29)$$

gdje je

$\theta_{e,day}$	prosječna dnevna vanjska temperatura, u °C,
$\theta_{i,set,H,day}$	postavna temperatura za grijanje, u °C,
$\eta_{H,gn,1}$	faktor iskorištenja dobitaka za grijanje za mjesečnu metodu proračuna, proračunan uz omjer toplinskih dobitaka i toplinskih gubitaka za grijanje, $\gamma_H = 1$
$Q_{gn,day}$	prosječni dnevni ukupni toplinski dobitci (unutarnji i od Sunčeva zračenja), u MJ (mjesečna vrijednost podijeljena s brojem dana u mjesecu),
$H_{tr,adj}$	koeficijent izmjene topline transmisijom, prilagođen za razliku unutarne i vanjske temperature, u W/K,
$H_{ve,adj}$	koeficijent izmjene topline ventilacijom, prilagođen za razliku unutarne i vanjske temperatura, u W/K,
t_{day}	trajanje dana tj. 0,0864 Ms.

Trajanje sezone grijanja dobije se, dakle, usporedbom godišnje promjene temperature vanjskog zraka, $\theta_{e,day}$, i tzv. granične temperature grijanja koja je jednaka desnoj strani nejednadžbe (6.29). **Granična temperatura grijanja** pokazuje od koje se temperature vanjskog zraka zgrada više ne mora grijati sustavom grijanja jer se željena unutarnja temperatura postiže Sunčevim i unutarnjim dobitcima topline. Trajanje sezone grijanja proteže se kroz vremensko razdoblje u kojem je granična temperatura grijanja viša od temperature vanjskog zraka. Da bi se utvrdilo trajanje sezone grijanja polazi se od srednjih mjesečnih temperatura vanjskog zraka i njih se uspoređuje s odgovarajućim mjesečnim graničnim temperaturama grijanja.

Prosječne mjesečne vrijednosti dnevnih vanjskih temperatura i graničnih temperatura grijanja pripisuju se 15. danu svakog mjeseca. Za određivanje graničnih dana za koje je zadovoljena jednadžba (6.29), rabi se linearna interpolacija. Međusobno sjecište temperaturnih krivulja pokazuje početak i kraj sezone grijanja. Postupak utvrđivanja trajanja sezone grijanja shematski je prikazan na slici 6.8.



Slika 6.8 Utvrđivanje trajanja sezone grijanja usporedbom granične temperature grijanja i temperature vanjskog zraka

Primjer 6.1

Za projektiranu obiteljsku kuću izračunat je ukupni koeficijent prijenosa topline (transmisijom i ventilacijom) u iznosu $H = 175 \text{ W/K}$ i vremenska konstanta zgrade $\tau = 56$ sati. U tablici 6.5 dane su srednje mjesečne temperature vanjskog zraka na lokaciji zgrade i izračunati mjesečni dobitci topline (sunčevi i unutarnji), za neke mjesece u godini. Treba proračunati trajanje sezone grijanja.

Tablica 6.5 Ulazni podaci za proračun

Mjesec u godini	Srednja mjesečna temperatura, θ_e , u °C	Izračunati ukupni toplinski dobitci, Q_{gn} , u MJ	Broj dana u mjesecu
...			
Travanj	9,3	4 177	30
Svibanj	13,0	4 272	31
Lipanj	16,7	4 445	30
...			
Kolovoz	17,6	4 458	31
Rujan	15,1	4 150	30
Listopad	10,8	3 470	31
...			

Za mjesečni proračun je, prema izrazi (6.12):

$$a_H = 1 + 56 / 15$$

$$a_H = 4,73$$

Za $\gamma_H = 1$ je, prema izrazu (6.9):

$$\eta_{H,gn,1} = 4,73 / (4,73 + 1)$$

$$\eta_{H,gn,1} = 0,83$$

U mjesecu kolovozu je:

$$Q_{\text{gn,day}} = 4458 / 31 = 143,81 \text{ MJ}$$

Prema izrazu (6.29) je:

$$\theta_{\text{e,day}} \leq 20 - (0,83 \times 143,81) / (175 \times 0,0864) = 20 - 7,9 = 12,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

U mjesecu rujnu je:

$$Q_{\text{gn,day}} = 4150 / 30 = 138,33 \text{ MJ}$$

Prema izrazu (6.29) je:

$$\theta_{\text{e,day}} \leq 20 - (0,83 \times 138,33) / (175 \times 0,0864) = 20 - 7,6 = 12,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

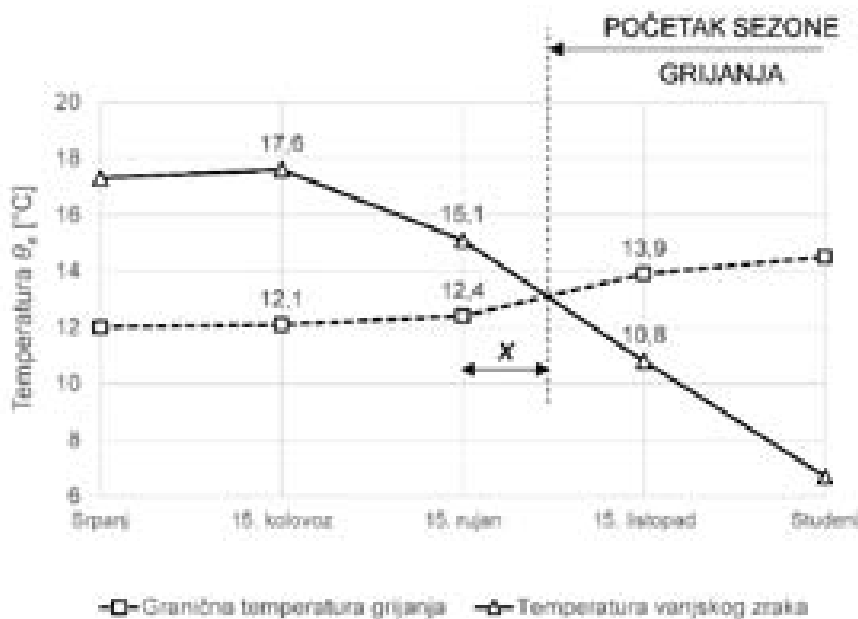
U mjesecu listopadu je:

$$Q_{\text{gn,day}} = 3470 / 31 = 111,94 \text{ MJ}$$

Prema izrazu (6.29) je:

$$\theta_{\text{e,day}} \leq 20 - (0,83 \times 111,94) / (175 \times 0,0864) = 20 - 6,1 = 13,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Na slici 6.9 nacrtan je dio krivulje godišnje promjene srednje temperature vanjskog zraka i krivulje srednjih graničnih temperatura grijanja.



Slika 6.9 Dio godišnje krivulje srednje temperature vanjskog zraka i granične temperature grijanja.

Analitički se sjecište krivulja srednjih vanjskih temperatura i graničnih temperatura grijanja odredi iz jednakosti:

Rješenjem ove linearne jednadžbe dobije se za x vrijednost:

$$x = 14 \text{ dana}$$

Početak sezone grijanja je 15. rujna + 14 dana = 29. rujna. Na jednaki način odredi se kraj sezone grijanja i odatle godišnje trajanje sezone grijanja (u danima). U predmetnom primjeru sezona grijanja traje do 10. svibnja, pa godišnje trajanje sezone grijanja iznosi 222 dana.

6.8.7.3 Stupanj – dan metoda

U mjesečnoj metodi proračuna, mjesečna potrebna energija za grijanje dana je izrazom:

$$Q_{\text{H nd}} = (H_{\text{tr adj}} + H_{\text{ve adj}}) \times \Sigma(\theta_{\text{int set H}} - \theta_{\text{e}}) - \eta_{\text{H gn}} \times Q_{\text{H gn}} \quad (6.30)$$

uz uvjet da je $Q_{\text{H,nd}} \geq 0$. $\theta_{\text{int, set,H}}$ je postavna temperatura za grijanje, a θ_{e} je temperatura vanjskog zraka.

Izraz $\Sigma(\theta_{\text{int, set,H}} - \theta_e)$ koji znači integriranje navedene temperaturne razlike preko promatranog vremenskog intervala, ekvivalentan je $(\theta_{\text{int, set,H}} - \theta_{e,\text{mn}}) \times t$, gdje je $\theta_{e,\text{mn}}$ srednja mjesečna temperatura vanjskog zraka, a t je trajanje vremenskog intervala od jednog mjeseca. Ako tijekom promatranog mjeseca postoje razdoblja kada energija za grijanje nije potrebna, to se uzima u obzir manjom vrijednosti faktora iskorištenja. To isto vrijedi i za sezonsku metodu kod koje su mjesečne srednje vrijednosti zamijenjene sezonskim prosjekom.

U metodi koja koristi temperaturni parametar stupanj-dan, potrebna energija za grijanje dana je izrazom:

$$Q_{\text{H nd}} = (H_{\text{tr adj}} + H_{\text{ve adj}}) \times \Sigma_{\text{pos}}(\theta_{\text{int base}} - \theta_e) \quad (6.31)$$

Ovdje je $\theta_{\text{int,base}}$ prethodno određena (dogovorna) temperatura koja je niža od postavne unutarnje temperature. Ona označava vanjsku temperaturu ispod koje treba započeti s grijanjem prostora zgrade, kako bi se održala zahtijevana unutarnja temperatura. Tu osnovnu (baznu) temperaturu nazivamo i **temperaturni prag**. To je dogovorna unutarnja proračunska temperatura umanjena za povoljan utjecaj unutarnjih i Sunčevih dobitaka. Preporučena vrijednost standardnog temperaturnog praga je 12 °C. Mogu se koristiti i drugi višekratnici od 2 °C, npr. 10 °C, 12 °C, 14 °C, 16 °C, ..., što se određuje nacionalnim propisima.

U izrazu (6.31) $\theta_e = \theta_{d,m}$ je srednja dnevna temperatura vanjskog zraka. Σ_{pos} znači zbrajanje samo za one dane za koje je $\theta_e < \theta_{\text{int,base}}$.

Razliku odabranog temperaturnog praga i srednje dnevne temperature vanjskog zraka ($\theta_{\text{int,base}} - \theta_e$) nazivamo **dnevna temperaturna razlika**. Zbroj svih pozitivnih dnevnih temperaturnih razlika u određenom vremenskom razdoblju nazivamo **akumulirana dnevna temperaturna razlika**. Za negativne dnevne temperaturne razlike uzima se da imaju vrijednost nula. Mjerna jedinica akumulirane dnevne temperaturne razlike je Kelvin puta dan, oznaka K×d.

Akumuliranu dnevnu temperaturnu razliku nazivamo i **stupanj-dan grijanja**. **Broj dana grijanja** je broj dana čija je srednja dnevna temperatura vanjskog zraka manja od određenog temperaturnog praga. Broj dana grijanja i iznos stupanj-dan grijanja povećavaju se odabirom većeg temperaturnog praga.

U približnoj proračunskoj metodi stupanj-dan potrebna energija za grijanje proračunava se bez izričitog uzimanja u obzir učinka unutarnjih dobitaka i dobitaka od Sunčeva zračenja. Taj je nedostatak nadoknađen uzimanjem samo dijela broja dana u proračunu izmjene topline transmisijom i ventilacijom.

Za određena naseljena mjesta u RH, podaci o broju dana grijanja i stupanj-dana grijanja za unutarnju temperaturu $\theta_i = 20$ °C i za tri odabrana temperaturna praga, θ_e , u iznosu 10 °C, 12 °C i 15 °C dani su na službenim internetskim stranicama Ministarstva graditeljstva i prostornog uređenja, www.mgipu.hr/doc/Propisi.

6.9 Mjesečna i sezonska metoda proračuna potrebne korisne energije za hlađenje prostora zone zgrade,

6.9.1 Potrebna korisna energija za hlađenje

Potrebna korisna energija za hlađenje prostora zgrade, $Q_{\text{C,nd}}$, uz uvjet kontinuiranog hlađenja, $Q_{\text{C,nd,cont}}$, za koju se pretpostavlja da je veća ili jednaka nuli, proračunava se za svaku zonu i za svaki proračunski vremenski korak (mjesec ili sezonu hlađenja), pomoću jednadžbe:

$$Q_{\text{C nd}} = Q_{\text{C nd cont}} = Q_{\text{C gn}} - \eta_{\text{C Is}} \times Q_{\text{C ht}} \quad (6.32)$$

gdje je (za svaku zonu zgrade i svaki vremenski korak):

- $Q_{C,ht}$ ukupna prenesena toplina kod hlađenja, određena izrazom (6.33), u MJ,
- $\eta_{C,ls}$ bezdimenzijski faktor iskorištenja toplinskih gubitaka, određen prema točki 6.9.4.2,
- $Q_{C,gn}$ ukupni toplinski dobitci kod hlađenja, određeni izrazom (6.34), u MJ.

U mjesečnoj metodi proračunski korak je jedan mjesec. Trajanje sezone hlađenja kod mjesečne metode proračuna utvrđuje se prema metodi opisanoj u točki 6.9.7.1. U sezonskoj metodi proračunski korak je sezona hlađenja. Trajanje sezone hlađenja kod sezonske metode proračuna utvrđuje se prema metodi opisanoj u točki 6.9.7.2.

Ukupna prenesena toplina kod hlađenja, $Q_{C,ht}$, dana je izrazom:

$$Q_{C,ht} = Q_{C,tr} + Q_{C,ve} \quad (6.33)$$

gdje je (za svaku zonu zgrade i svaki vremenski korak):

- $Q_{C,tr}$ ukupna prenesena toplina transmisijom, određena prema točki 6.9.2, u MJ,
- $Q_{C,ve}$ ukupna prenesena toplina ventilacijom, određena prema točki 6.9.3, u MJ.

Ukupni toplinski dobitci kod hlađenja, $Q_{C,gn}$, za svaku zonu i za određeni vremenski korak, dani su izrazom:

$$Q_{C,gn} = Q_{int} + Q_{sol} \quad (6.34)$$

gdje je (za svaku zonu zgrade i svaki vremenski korak):

- Q_{int} zbroj unutarnjih toplinskih dobitaka u promatranom vremenskom razdoblju, određen prema točki 6.14, u MJ,
- Q_{sol} zbroj toplinskih dobitaka od Sunčeva zračenja u promatranom vremenskom razdoblju, određen prema točki 6.15, u MJ.

6.9.2 Prijenos topline transmisijom

Ukupna prenesena toplina transmisijom kod hlađenja, $Q_{C,tr}$, izražena u MJ, proračunava se za svaki mjesec ili sezonu, za svaku zonu zgrade, jednadžbom:

$$Q_{C,tr} = H_{tr,adj} \times (\theta_{int,set,C} - \theta_e) \times t \quad (6.35)$$

gdje je (za svaku zonu zgrade i svaki vremenski korak: svaki mjesec ili sezonu hlađenja):

- $H_{tr,adj}$ ukupni koeficijent prijenosa topline transmisijom za zonu zgrade, prilagođen za razliku unutarnje i vanjske temperature, određen prema točki 6.12, izražen u W/K,
- $\theta_{int,set,C}$ postavna temperatura za hlađenje za zonu zgrade, u °C. Određuje se na nacionalnoj razini ili prema podacima iz tablice 6.2,
- θ_e temperatura vanjskog okoliša, u °C. U mjesečnoj metodi to je mjesečna srednja temperatura vanjskog zraka, a u sezonskoj metodi to je srednja temperatura vanjskog zraka za utvrđenu sezonu hlađenja,
- t trajanje proračunskog koraka prema tablici 6.1, u Ms

Prenesena toplina ili dio prenesene topline može tijekom određenog razdoblja imati negativan predznak.

Koeficijenti prijenosa topline, H_{tr} , najčešće imaju jednaku vrijednost kod grijanja i kod hlađenja. Ako postoje različita svojstva pojedinih građevnih dijelova ili elemenata zgrade pri grijanju i hlađenju (npr. pokretni zaslони za prozore), moraju se proračunati odvojene vrijednosti za H_{tr} .

6.9.3 Prijenos topline ventilacijom

Ukupna prenesena toplina ventilacijom kod hlađenja, $Q_{C,ve}$, izražena u MJ, proračunava se za svaki mjesec ili sezonu, za svaku zonu zgrade, jednadžbom:

$$Q_{C,ve} = H_{ve,adj} \times (\theta_{int,set,C} - \theta_e) \times t \quad (6.36)$$

gdje je (za svaku zonu zgrade i svaki vremenski korak: svaki mjesec ili sezonu grijanja):

$H_{ve,adj}$	ukupni koeficijent prijenosa topline ventilacijom za zonu zgrade, prilagođen za razliku unutarnje i vanjske temperature, određen prema točki 6.13, izražen u W/K,
$\theta_{int,set,C}$	postavna temperatura za hlađenje za zonu zgrade. Određuje se na nacionalnoj razini ili prema podacima u tablici 6.2, u °C,
θ_e	temperatura vanjskog okoliša, u °C. U mjesečnoj metodi to je mjesečna srednja temperatura vanjskog zraka, a u sezonskoj metodi to je srednja temperatura vanjskog zraka za utvrđenu sezonu hlađenja,
t	trajanje proračunskog koraka prema tablici 6.1, u Ms.

Prenesena toplina ili dio prenesene topline može tijekom određenog razdoblja imati negativan predznak. Tada se toplina dodaje zoni zgrade.

Koeficijenti prijenosa topline, H_{ve} , najčešće imaju jednaku vrijednost kod grijanja i kod hlađenja. Ako postoje različita svojstva pri grijanju i hlađenju (npr. različiti ljetni i zimski protoci ventilacije, jedinica povrata topline i izmjene topline na susjedne ostakljene prostore), moraju se proračunati odvojene vrijednosti za H_{ve} .

6.9.4 Dinamički parametri

6.9.4.1 Uvod

Dinamička metoda proračunava bilancu topline za kratke vremenske korake uzimajući u obzir akumuliranu toplinu u tijelu i otpuštenu toplinu iz tijela zgrade. U mjesečnoj i sezonskoj metodi dinamički se učinci uzimaju u obzir uvođenjem bezdimenzijskih faktora iskorištenja gubitaka za hlađenje. Učinak tromosti kod prekida hlađenja ili njegova isključenja uzima se u obzir odvojeno, prema točki 6.9.5.

U razdoblju hlađenja, faktorom iskorištenja toplinskih gubitaka uzima se u obzir činjenica da se samo dio prijenosa topline transmisijom i ventilacijom iskorištava za smanjenje potrebne korisne energije za hlađenje. „Neiskorišteni“ dio prijelaza topline transmisijom i ventilacijom nastaje tijekom razdoblja kada on nema učinak na potrebno hlađenje (npr. noću), za koje inače postoji potreba tijekom drugih razdoblja (npr. danju).

6.9.4.2 Faktor iskorištenja toplinskih gubitaka za hlađenje

Faktor iskorištenja toplinskih gubitaka za hlađenje, $\eta_{C,ls}$, predstavlja udio transmisijskih i ventilacijskih toplinskih gubitaka u hlađenju zgrade. Određuje se približno izrazima (6.37) do (6.39) koji su dobiveni na bazi nestacionarnog proračuna. Kod mjesečne i sezonske metode, faktor $\eta_{C,ls}$, funkcija je omjera dobitaka i gubitaka topline kod hlađenja, γ_C i brojčanog parametra, a_C , koji ovisi o toplinskoj tromosti zgrade, prema slijedećim izrazima:

$$\text{- ako je } \gamma_C > 0 \text{ i } \gamma_C \neq 1: \quad \eta_{C,ls} = \frac{(1 - \gamma_C^{a_C})}{(1 - \gamma_C^{-(a_C+1)})} \quad (6.37)$$

$$\text{- ako je } \gamma_C = 1: \quad \eta_{C,ls} = \frac{a_C}{(a_C + 1)} \quad (6.38)$$

$$\text{- ako je } \gamma_C < 0: \quad \eta_{C,ls} = 1 \quad (6.39)$$

gdje je (za svaki mjesec ili sezonu i za svaku zonu zgrade):

γ_C omjer dobitaka i gubitaka topline kod hlađenja. To je bezdimenzijska veličina, određena izrazom:

$$\gamma_C = \frac{Q_{C,gn}}{Q_{C,ht}} \quad (6.40)$$

$Q_{C,gn}$ ukupni toplinski dobitci pri hlađenju, prema izrazu (6.34), u MJ,

$Q_{C,ht}$ ukupni prijenos (gubitak) topline transmisijom i ventilacijom pri hlađenju, prema izrazu (6.33), u MJ,

a_C bezdimenzijski parametar ovisan o vremenskoj konstanti, τ_C , određen jednažbom:

$$a_C = a_{C,0} + \frac{\tau}{\tau_{C,0}} \quad (6.41)$$

$a_{C,0}$ referentni parametar, prema tablici 6.6,

τ vremenska konstanta zone zgrade prema izrazu (6.20), u satima,

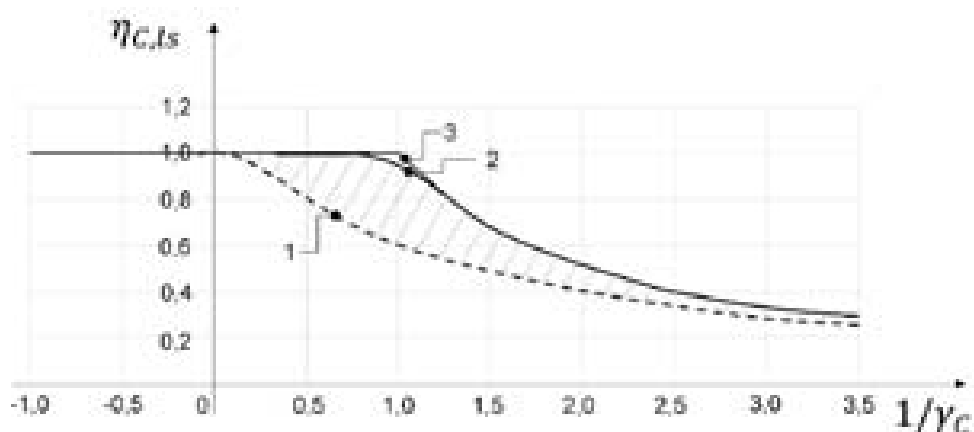
$\tau_{C,0}$ referentna vremenska konstanta, u satima, prema tablici 6.6.

Vrijednosti referentnih parametra $a_{C,0}$ i $\tau_{C,0}$ su empirijske vrijednosti, a smiju se odrediti i na nacionalnoj razini, ovisno o svrsi proračuna.

Tablica 6.6 Vrijednosti referentnog parametra $a_{C,0}$ i referentne vremenske konstante $\tau_{C,0}$

Tip metode	$a_{C,0}$	$\tau_{C,0}$ (sati)
Mjesečna proračunska metoda	1,0	15
Sezonska proračunska metoda	0,8	30

Na slici 6.10 prikazana je, za slučaj hlađenja, tipična ovisnost faktora iskorištenja, $\eta_{C,ls}$, o odnosu toplinskih dobitaka i toplinskih gubitaka, γ_C , za različite vrijednosti vremenske konstante zgrade, τ , kod mjesečne metode proračuna.



1 – zgrada male toplinske inercije (τ do 8 sati)

2 – zgrada velike toplinske inercije (τ preko 7 dana)

3 – teoretska vrijednost za beskonačno veliku vremensku konstantu

Slika 6.10 Ovisnost faktora iskorištenja toplinskih gubitaka, $\eta_{C,ls}$, o odnosu toplinskih dobitaka i toplinskih gubitaka, γ_C , za zgrade različite toplinske inercije

Za pretvorbu mjesečnih faktora iskorištenja u sezonski faktor, $\eta_{C,gn,seas}$, može se koristiti jednažba:

$$\eta_{C,ls,seas} = \frac{(\sum Q_{C,gn,m} - \sum Q_{C,nd,m})}{\sum Q_{C,ht,m}} \quad (6.42)$$

$Q_{C,gn,m}$, $Q_{C,nd,m}$ i $Q_{C,ht,m}$ su mjesečne vrijednosti za svaki mjesec m koji je unutar utvrđene duljine sezone hlađenja.

6.9.4.3 Vremenska konstanta zgrade i efektivni toplinski kapacitet zgrade

Vremenska konstanta zone zgrade, τ u satima, i efektivni toplinski kapacitet zgrade za zonu zgrade, C_m u J/K, karakteristike su unutarnje toplinske tromosti kondicionirane zone za razdoblja grijanja i hlađenja. Način njihova proračuna prikazan je u točkama 6.8.4.3 i 6.8.4.4.

6.9.5 Hlađenje s prekidima i razdobljima nekorištenja

Vrijednosti postavnih temperatura s kojima se provodi proračun izmjene topline, $Q_{C,ht}$, ovise o načinu hlađenja, kod čega se razlikuje:

- kontinuirano hlađenje uz konstantnu vrijednost postavne temperature,
- promjena vrijednost postavne temperature ili potpuno isključenje hlađenja tijekom noći i / ili vikendom,
- dulja razdoblja nekorištenja zgrade (npr. kod škola za vrijeme školskih praznika).

Za kontinuirano hlađenje tijekom cijelog razdoblja hlađenja za proračun se koristi postavna temperatura za hlađenje za zonu zgrade u uobičajenom načinu hlađenja, $\theta_{int,C,set}$.

Hlađenje s prekidom smatrati će se kvazikontinuiranim hlađenjem s prilagođenom postavnom temperaturom, ako su zadovoljeni slijedeći uvjeti:

- promjene postavne temperature između razdoblja uobičajenog hlađenja i razdoblja smanjenog hlađenja manje su od 3 K, i
- vremenska konstanta zgrade (vidjeti točku 6.8.4.4) manja je od 0,2 puta trajanje najkraćeg razdoblja smanjenog hlađenja.

Prilagođena postavna temperatura za proračun tada je vremenski prosjek postavnih temperatura.

Ako je vremenska konstanta zgrade, τ , veća od trostrukog trajanja najduljeg razdoblja smanjenog hlađenja, postavna temperatura za proračun je postavna temperatura uobičajenog načina hlađenja.

Ako postoji hlađenje s prekidom koje ne ispunjava gornje uvjete, proračun se provodi kao da se radi o kontinuiranom hlađenju za razdoblje uobičajenog načina hlađenja, a dobiveni rezultat se množi s **faktorom smanjenja za hlađenje s prekidom**, $a_{C,red}$. Dakle, potrebna korisna energija za hlađenje u slučaju prekidanog hlađenja, $Q_{C,nd,interm}$, proračunava se za svaku zonu zgrade i za svaki proračunski korak (mjesec ili sezonu hlađenja) prema izrazu:

$$Q_{C,nd,interm} = a_{C,red} \times Q_{C,nd,cont} \quad (6.43)$$

Bezdimenzijski faktor smanjenja za hlađenje s prekidom, $a_{C,red}$, proračuna se iz jednadžbe:

$$a_{C,red} = 1 - b_{C,red} \times \left(\frac{\tau_{C,0}}{\tau} \right) \times y_C \times (1 - f_{C,day}) \quad (6.44)$$

gdje je:

- $f_{C,day}$ udio broja dana u tjednu s uobičajenom vrijednosti postavne temperature hlađenja najmanje tijekom dana (npr. za uobičajeno hlađenje 5 dana tjedno: $f_{C,day} = 5 / 7 = 0,71$),
- $b_{C,red}$ empirijski faktor korelacije s vrijednošću $b_{C,red} = 3$,
- τ vremenska konstanta zone zgrade (vidjeti točku 6.9.4.3), izražena u satima,
- $\tau_{C,0}$ referentna vremenska konstanta zone zgrade za hlađenje (vidjeti tablicu 6.6), izražena u satima,
- y_C omjer toplinskih dobitaka i toplinskih gubitaka za hlađenje (vidjeti točku 6.9.4.2).

Najmanja vrijednost faktora smanjenja je $a_{C,red} = f_{C,day}$, a najveća vrijednost iznosi $a_{C,red} = 1$.

U slučaju duljeg razdoblja nekorištenja zone zgrade, u mjesečnoj metodi proračuna, za mjesec u kojem nastupa razdoblje nekorištenja, proračun se provede dva puta, jednom za razdoblje uobičajenog korištenja hlađenja, a drugi put za razdoblje nekorištenja, a

zatim se dobiveni rezultati linearno interpoliraju u skladu s trajanjem vremena nekorištenja, prema jednadžbi:

$$Q_{C,nd} = (1 - f_{C,nocc}) \times Q_{C,nd,occ} + f_{C,nocc} \times Q_{C,nd,nocc} \quad (6.45)$$

gdje je:

$Q_{C,nd,occ}$ potrebna korisna energija za hlađenje, $Q_{C,nd,cont}$ ili $Q_{C,nd,interm}$, izračunata uz pretpostavku da su za sve dane u mjesecu regulacija i termostat postavljeni za razdoblje korištenja, izražena u MJ,
 $Q_{C,nd,nocc}$ potrebna korisna energija za hlađenje, $Q_{C,nd,cont}$ ili $Q_{C,nd,interm}$, izračunata uz pretpostavku da su za sve dane u mjesecu regulacija i termostat postavljeni za razdoblje nekorištenja, izražena u MJ,
 $f_{C,nocc}$ dio mjeseca u kojem nastupa razdoblje nekorištenja (npr. u mjesecu srpnju hlađenje neće raditi 10 dana: $f_{C,nocc} = 10/31 = 0,32$).

6.9.6 Godišnja potrebna korisna energija za hlađenje, mjesečna metoda

Godišnja potrebna korisna energija za hlađenje zone zgrade, $Q_{C,nd,an}$, izražena u MJ, dobije se kao zbroj proračunatih potrebnih korisnih energija po proračunskim vremenskim intervalima, uzimajući u obzir moguće ponderiranje za različite načine hlađenja (prekide hlađenja ili razdoblja nekorištenja):

$$Q_{C,nd,an} = \sum_i Q_{C,nd,i} \quad (6.46)$$

gdje je:

$Q_{C,nd,i}$ potrebna korisna energija za hlađenje promatrane zone u proračunskom vremenskom koraku i (mjesec), u MJ.

U slučaju proračuna s više zona, godišnja potrebna korisna energija za hlađenje svih zona zs , koje opslužuje isti sustav hlađenja, $Q_{C,nd,an,zs}$, je suma godišnjih potrebnih korisnih energija za zone zs koje su opsluživane istim sustavom hlađenja:

$$Q_{C,nd,an,zs} = \sum_z Q_{C,nd,an,z} \quad (6.47)$$

gdje je:

$Q_{C,nd,an,z}$ godišnja potrebna korisna energija za hlađenje zone z , izražena u MJ.

U opisanim proračunima nije uključena potrebna latentna energija za odvlaživanje.

6.9.7 Trajanje sezone hlađenja za potrebe proračuna parametara koji ovise o trajanju sezone

6.9.7.1 Mjesečna metoda proračuna

Određivanje trajanja sezone hlađenja potrebno je radi određivanja broja sati rada određenih uređaja, koji je ovisan o trajanju sezone (npr. rada pumpi, ventilatora, centralnog predhlađenja,...). Trajanje sezone hlađenja, L_C , izraženo u mjesecima, proračunava se prema izrazu:

$$L_C = \sum f_{C,m} \quad (\text{od } m = 1 \text{ do } m = 12) \quad (6.48)$$

gdje je $f_{C,m}$ dio mjeseca koji pripada sezoni hlađenja, a proračuna se iz izraza:

$$f_C = \frac{Q_{C,nd}}{(Q_{H,nd} + Q_{C,nd})} \quad (6.49)$$

gdje je:

$Q_{H,nd}$ mjesečna potrebna korisna energija za grijanje, određena prema točki 6.8.1, izražena u MJ

$Q_{C,nd}$ mjesečna potrebna korisna energija za hlađenje, određena prema točki 6.9.1, izražena u MJ

Vrijednost veličine f_c može se odrediti, slično kao kod grijanja, i na slijedeći način:
Najprije se odredi granična vrijednost omjera toplinskih dobitaka i toplinskih gubitaka za hlađenje, $\gamma_{C,lim}$, pomoću jednadžbe:

$$\left(\frac{1}{\gamma_C} \right)_{lim} = \frac{(a_C + 1)}{a_C} \quad (6.50)$$

gdje je a_C bezdimenzijski parametar prema točki 6.9.4.2.

Zatim se za svaki mjesec odredi:

- vrijednost $1/\gamma_C$ na početku mjeseca. Ona se proračuna kao srednja vrijednost $1/\gamma_C$ promatranog mjeseca i prethodnog mjeseca. Zatim se odredi vrijednost $1/\gamma_C$ za kraj mjeseca. Ta se vrijednost proračuna kao srednja vrijednost $1/\gamma_C$ promatranog mjeseca i slijedećeg mjeseca. Manju od dviju vrijednosti označimo kao $(1/\gamma_C)_1$, a veću $(1/\gamma_C)_2$. Negativne vrijednosti $1/\gamma_C$ zamijenimo vrijednostima najbližeg mjeseca s pozitivnim vrijednostima $1/\gamma_C$.
- Ako je $(1/\gamma_C)_2 < (1/\gamma_C)_{lim}$, cijeli mjesec je dio razdoblja hlađenja tj. $f_c = 1$.
- Ako je $(1/\gamma_C)_1 > (1/\gamma_C)_{lim}$, cijeli mjesec ne pripada razdoblju hlađenja tj. $f_c = 0$.
- Inače, dio mjeseca je dio razdoblja hlađenja:
 - ako je $1/\gamma_C > (1/\gamma_C)_{lim}$, tada je $f_c = 0,5 \times [(1/\gamma_C)_{lim} - (1/\gamma_C)_1] / [(1/\gamma_C) - (1/\gamma_C)_1]$
 - ako je $1/\gamma_C \leq (1/\gamma_C)_{lim}$, tada je $f_c = 0,5 + 0,5 \times [(1/\gamma_C)_{lim} - (1/\gamma_C)] / [(1/\gamma_C)_2 - (1/\gamma_C)]$

6.9.7.2 Sezonska metoda proračuna

Utvrđeno trajanje sezone hlađenja služi kao proračunski vremenski interval za proračun ukupne izmjene topline tijekom sezone hlađenja te za određivanje broja sati rada određenih uređaja koji je ovisan o trajanju sezone (npr. rada pumpi, ventilatora, centralnog predhlađenja,...). Može se proračunati metodom navedenom u nastavku.

Sezona hlađenja uključuje sve dane za koje (pozitivni) prijenos topline, proračunan s faktorom iskorištenja toplinskih gubitaka za hlađenje, $\eta_{C,ls,1}$, nije u ravnoteži s toplinskim dobitcima. Takova situacija nastaje kada je

$$\theta_{e,day} \geq \theta_{i,set,C,day} + \frac{Q_{gn,day}}{[\eta_{C,ls,1} \times (H_{tr,adj} + H_{ve,adj}) \times t_{day}]} \quad (6.51)$$

gdje je

$\theta_{e,day}$	prosječna dnevna vanjska temperatura, u °C,
$\theta_{i,set,H,day}$	postavna temperatura za hlađenje, u °C,
$\eta_{C,ls,1}$	faktor iskorištenja gubitaka za hlađenje za mjesečnu metodu proračuna, proračunan uz omjer toplinskih dobitaka i toplinskih gubitaka za hlađenje, $\gamma_C = 1$,
$Q_{gn,day}$	prosječni dnevni ukupni toplinski dobitci (unutarnji i od Sunčevog zračenja), u MJ, (mjesečna vrijednost podijeljena s brojem dana u mjesecu),
$H_{tr,adj}$	koeficijent prijenosa topline transmisijom, prilagođen za razliku unutarnje i vanjske temperature, u W/K,
$H_{ve,adj}$	koeficijent prijenosa topline ventilacijom, prilagođen za razliku unutarnje i vanjske temperature, u W/K,
t_{day}	trajanje dana tj. 0,0864 Ms.

Prosječne mjesečne vrijednosti dnevnih vanjskih temperatura i graničnih temperatura hlađenja (desna strana jednadžbe (6.51)) pripisuju se 15. danu svakog mjeseca. Za određivanje graničnih dana za koje je zadovoljena jednadžba (6.51), rabi se linearna interpolacija. Postupak je analogan opisanom postupku za utvrđivanje trajanja sezone grijanja iz točke 6.8.7.2.

6.10 Međudjelovanja tijela zgrade i tehničkih sustava te međudjelovanje između više zona

6.10.1 Uvod

Zbog međudjelovanja tijela zgrade i tehničkih sustava te međudjelovanja između toplinski povezanih zona, potrebno je provesti proračune potrebne korisne energije za grijanje i hlađenje u više koraka (metodom iteracije).

6.10.2 Načela proračuna vraćenih toplinskih gubitaka tehničkih sustava

Unutar svakog tehničkog sustava zgrade dolazi do gubitaka topline. **Toplinskim gubitkom sustava** nazivamo toplinski gubitak tehničkog sustava zgrade za grijanje, hlađenje, potrošnu toplu vodu, ovlaživanje, odvlaživanje, ventilaciju ili rasvjetu koji ne doprinosi korisnom izlazu sustava. Svi toplinski gubici sustava nisu nužno izgubljeni. Jedan dio toplinskih gubitaka, koji nazivamo **povratni toplinski gubici sustava**, može se vratiti bilo za smanjenje potrebne korisne energije zgrade, bilo za smanjenje potrošnje konačne energije za rad tehničkog sustava zgrade, ovisno o odabranom pristupu proračuna vraćenih toplinskih gubitaka (holistički ili pojednostavnjeni pristup).

Vraćeni toplinski gubici sustava su dio povratnih toplinskih gubitaka koji je stvarno vraćen bilo za smanjenje potrebne (korisne) energije zgrade, bilo za smanjenje potrošnje energije za rad tehničkog sustava zgrade.

Kod **holističkog** (cjelovitog) **pristupa** proračunski postupak, za sustave grijanja i hlađenja, je slijedeći:

- proračunati potrebnu korisnu energiju za grijanje i potrebnu korisnu energiju za hlađenje, prema točkama 6.8 i 6.9,
- proračunati povratne toplinske gubitke sustava za sustav grijanja i sustav hlađenja, prema poglavlju 7,
- dodati proračunate povratne toplinske gubitke sustava drugim povratnim dobitcima topline (interni i Sunčevi dobitci topline, povratni gubici topline drugih tehničkih sustava zgrade,...), i ponoviti proračun potrebne korisne energije za grijanje i hlađenje zgrade, prema točki a),
- ponavljati proračunske korake a) do c) sve dok promjena potrebne energije između dvije uzastopne iteracije ne bude manja od utvrđene granične vrijednosti (npr. 1%) ili proračun zaustaviti nakon određenog broja iteracija ako je tako određeno na nacionalnoj razini,
- proračunati razliku između potrebne korisne energije za grijanje, odnosno potrebne korisne energije za hlađenje na početku i na kraju iteracije. Dobivene vrijednosti su vraćeni toplinski gubici sustava za grijanje, odnosno hlađenje.

Kod **pojednostavnjenog pristupa** proračunski postupak, za sustave grijanja i hlađenja, je slijedeći:

- proračunati potrebnu korisnu energiju za grijanje i hlađenje prostora zgrade, prema točkama 6.8 i 6.9,
- proračunati povratne toplinske gubitke sustava za sustav grijanja i sustav hlađenja, prema poglavlju 7,
- proračunati vraćene toplinske gubitke sustava tako da se povratni toplinski gubici sustava pomnože s dogovornim faktorom povrata, utvrđenim na nacionalnoj razini. Ako nema vrijednosti na nacionalnoj razini tada faktor povrata iznosi 80 % od faktora iskorištenja toplinskih dobitaka kod proračuna toplinske bilance mjesečnom metodom (vidjeti točku 6.8.4.2 za grijanje i točku 6.9.4.2 za hlađenje),
- oduzeti vraćene toplinske gubitke sustava od ukupnih toplinskih gubitaka sustava za sustav grijanja odnosno hlađenja.

U holističkom pristupu, povratni toplinski gubici sustava uzimaju se u obzir u proračunu potrebne korisne toplinske energije za grijanje odnosno hlađenje prostora, a kod

pojednostavnjenog pristupa, vraćeni toplinski gubici sustava izravno se oduzimaju od toplinskih gubitaka svakog promatranog tehničkog sustava zgrade. Za složenije sustave preporuča se holistički pristup.

6.10.3 Proračun više zona s toplinskom vezom između zona – mjesečna metoda

Osim ulaznih podataka potrebnih za proračun jedne zone ili više toplinski nepovezanih zona, u slučaju toplinski povezanih zona z i y potrebni su i slijedeći podatci:

$H_{tr,zy}$ koeficijent prijenosa topline transmisijom između zona z i y, u W/K,

$H_{ve,z \rightarrow y}$ koeficijent prijenosa topline ventilacijom iz zone z u zonu y, u W/K,

$H_{ve,y \rightarrow z}$ koeficijent prijenosa topline ventilacijom iz zone y u zonu z, u W/K.

Ovdje je:

$$H_{ve,z \rightarrow y} = \rho_a \times c_a \times q_{z \rightarrow y} \quad (6.52)$$

$$H_{ve,y \rightarrow z} = \rho_a \times c_a \times q_{y \rightarrow z} \quad (6.53)$$

$q_{z \rightarrow y}$ neto protok zraka iz zone z u zonu y, u m³/s,

$q_{y \rightarrow z}$ neto protok zraka iz zone y u zonu z, u m³/s.

Koeficijenti prijenosa topline ventilacijom $H_{ve,z \rightarrow y}$ i $H_{ve,y \rightarrow z}$ međusobno se razlikuju ako protok zraka u oba smjera nije jednak.

Ukupnom prijenosu topline kod grijanja prema izrazu (6.4) i/ili ukupnom prijenosu topline kod hlađenja prema izrazu (6.33), kod prijenosa topline transmisijom i ventilacijom iz zone z u zonu y, dodaju se članovi:

$$Q_{tr,zy} = H_{tr,zy} \times (\theta_{z,H/C} - \theta_{y,mn}) \times t \quad (6.54)$$

$$Q_{ve,z \rightarrow y} = H_{ve,z \rightarrow y} \times (\theta_{z,H/C} - \theta_{y,mn}) \times t \quad (6.55)$$

gdje je:

$\theta_{z,H/C}$ postavna unutarnja temperatura, $\theta_{z,H}$ za grijanje, odnosno $\theta_{z,C}$ za hlađenje, za zonu z, u °C,

$\theta_{y,mn}$ stvarna srednja temperatura susjedne zone y, u °C, koja uključuje svako pregrijavanje (kod grijanja zgrade), odnosno pothlađivanje (kod hlađenja zgrade).

Ti doprinosi vrijednostima Q_{tr} i Q_{ve} mijenjaju i omjer toplinskih gubitaka i toplinskih dobitaka, y, kod grijanja i kod hlađenja.

Ukupni prijenos topline transmisijom iz zone z, koja je toplinski povezana s više toplinskih zona y, iznosi, dakle:

$$Q_{tr} = H_{tr,adj} \times (\theta_{int,set,H/C} - \theta_e) \times t + \sum_y H_{tr,zy} \times (\theta_{z,H/C} - \theta_{y,mn}) \times t \quad (6.56)$$

a ukupni prijenos topline ventilacijom je:

$$Q_{ve} = H_{ve,adj} \times (\theta_{int,set,H/C} - \theta_e) \times t + \sum_y H_{ve,z \rightarrow y} \times (\theta_{z,H/C} - \theta_{y,mn}) \times t \quad (6.57)$$

Stvarna srednja temperatura zone y, za slučaj grijanja, dana je izrazom:

$$\theta_{y,mn} = \frac{\left[Q_{H,gn} + Q_{H,nd} + \sum_k \left(H_{H,ht,k} \times \frac{\theta_{a,k}}{b_{tr,k}} \right) \times t \right]}{\left[\sum_k \left(\frac{H_{H,ht,k}}{b_{tr,k}} \right) \times t \right]} \quad (6.58)$$

a za slučaj hlađenja izrazom:

$$\theta_{y,mn} = \frac{\left[Q_{C,gn} - Q_{C,nd} + \sum_k \left(H_{C,ht,k} \times \frac{\theta_{a,k}}{b_{tr,k}} \right) \times t \right]}{\left[\sum_k \left(\frac{H_{C,ht,k}}{b_{tr,k}} \right) \times t \right]} \quad (6.59)$$

$b_{tr,k}$ faktor prilagodbe za komponentu k u ukupnom prijenosu topline kod grijanja, čija je vrijednost različita od 1 ako temperatura s druge strane građevnog dijela zgrade nije

gdje je

$Q_{H,nd}$ potrebna energija za grijanje zgrade za zonu y , izračunata prema izrazu (6.3), u MJ, u skladu s izrazima (6.56) i (6.57),

$H_{H,ht,k}$ komponenta k u ukupnom koeficijentu prijenosa topline kod grijanja za zonu y , prilagođena za razliku unutarnje i vanjske temperature, određena u skladu s točkom 6.12, u W/K, jednaka temperaturi vanjskog zraka. (Budući da koeficijent prijenosa topline u gornjim jednadžbama treba biti neprilagođena vrijednost, potrebno ga je podijeliti s faktorom prilagodbe temperature.),

$Q_{H,gn}$ ukupni dobitak topline pri grijanju za zonu y , izračunat prema izrazu (6.5), u MJ,

$Q_{C,nd}$ potrebna energija za hlađenje zgrade za zonu y , izračunata prema izrazu (6.32), u MJ, u skladu s izrazima (6.56) i (6.57),

$H_{C,ht,k}$ komponenta k u ukupnom koeficijentu prijenosa topline kod hlađenja za zonu y , određena u skladu s točkom 6.12, u W/K,

$Q_{C,gn}$ ukupni dobitak topline pri hlađenju za zonu y , izračunat prema izrazu (6.34), u MJ,

$\theta_{a,k}$ za komponentu k prijenosa topline transmisijom to je temperatura s druge strane građevnog dijela zgrade, $\theta_{e,k}$, u °C, a za komponentu k prijenosa topline ventilacijom to je temperatura dobavnog zraka, $\theta_{a,sup,k}$, u °C,

t vremenski korak proračuna (jedan mjesec), u megasekundama.

Koeficijenti prijenosa topline $H_{H,ht,k}$ i $H_{C,ht,k}$ uključuju prijenos topline transmisijom i ventilacijom prema vanjskom prostoru i susjednim zonama.

Jednadžbe (6.58) i (6.59) se smiju koristiti i za proračun temperature nekondicionirane zone.

Proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje mora se provesti iteracijom (obično u dva ili tri koraka) na sljedeći način:

- 1) pretpostavi se da je stvarna srednja temperatura u svakoj zoni jednaka postavnim temperaturama za grijanje ili hlađenje tih zona,
- 2) proračuna se potrebna energija za grijanje i hlađenje za svaku zonu, uzimajući u obzir doprinos prijenosa topline transmisijom i / ili ventilacijom između zona, kako je gore opisano,
- 3) s dobivenim rezultatima proračuna se za svaku zonu stvarna srednja temperatura kako je ranije opisano,
- 4) ako se stvarna srednja temperatura bilo koje zone razlikuje od pretpostavljene vrijednosti za više od dogovorenog kriterija (npr. dopuštena razlika do 0,3 °C), proračun se ponovi od koraka 2). U protivnom slučaju iteracija je završena.

6.11 Jednostavna satna dinamička metoda proračuna

6.11.1 Uvod

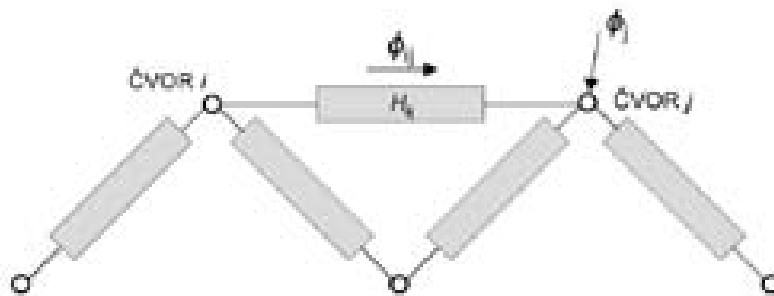
U dinamičkim metodama bilanca topline se proračunava za kratke vremenske intervale (tipičan interval je jedan sat), uzimajući u obzir, pored toplinskih tokova transmisijom i ventilacijom te Sunčevih i unutarnjih toplinskih dobitaka, još i pohranjenu toplinu u tijelu zone zgrade ili otpuštenu toplinu iz tijela zone zgrade.

Proračunski model kod jednostavne satne dinamičke metode utemeljen je na određenim pojednostavnjenjima u prijenosu topline između unutarnjeg i vanjskog okoliša. Osnovne pretpostavke metode su:

- zona zgrade ili promatrana prostorija smatra se zatvorenim prostorom koji je ograden građevnim dijelovima zgrade,
- temperatura zraka je u svim dijelovima ograđenog prostora jednaka,
- toplinsko-fizikalna svojstva svih građevnih materijala su neovisna o vremenu, a materijali su homogeni i izotropni,

- vođenje topline kroz građevne dijelove je jednodimenzionalno,
- koeficijent prijelaza topline ne mijenja se tijekom vremena,
- srednja temperatura zračenja proračuna se kao prosjek temperatura unutarnjih površina svakog građevnog dijela ponderiran prema njegovoj ploštini,
- radna temperatura proračunava se kao aritmetička srednja vrijednost temperature unutarnjeg zraka i srednje temperature zračenja.

Kod proračuna se koristi ekvivalentna mreža čvorova. Promatrana zona zgrade aproksimira se skupom „čvorova“ koji predstavljaju područja homogene temperature. Toplinske veze između pojedinih čvorova predstavljene su ekvivalentnim prijenosima (izmjenama) topline. Određeni čvorovi primaju toplinu od izvora topline (Sunčevo zračenje, unutarnji izvori, ogrjevnja tijela).



Slika 6.11 Shema ekvivalentnih čvorova za zonu zgrade

Na slici 6.11 dan je općeniti prikaz ekvivalentne sheme čvorova za zonu zgrade. Čvorovi 1, ..., m su čvorovi čija je temperatura nepoznata i mora se izračunati u funkciji vremena. Čvorovi m+1, ..., n su čvorovi čija je temperatura dana u funkciji vremena i predstavlja rubne uvjete, npr. temperatura vanjskog zraka ili temperatura tla. Toplinski tok, ϕ_{ij} u W, od čvora i temperature θ_i prema čvoru j temperature θ_j , dan je jednačbom:

$$\phi_{ij} = H_{ij} \times (\theta_i - \theta_j) \quad (6.60)$$

Ovdje je H_{ij} koeficijent prijenosa topline između čvorova i i j , u W/K.

Čvorovi 1, ..., m mogu primiti toplinske tokove ϕ_j ($j = 1, \dots, m$) od izvora topline, npr. Sunčevog zračenja, unutarnjih izvora topline, topline oslobođene sustavom grijanja.

Svaki čvor posjeduje i određeni efektivni toplinski kapacitet, C_j u J/K, koji odgovara pohranjenoj osjetilnoj toplini (latentna se toplota u jednostavnoj metodi ne uzima u obzir).

Za svaki se čvor j može napisati jednačba očuvanja energije u obliku:

$$C_j \times \frac{d\theta_j}{dt} = \sum H_{ij} \times (\theta_i - \theta_j) + \phi_j \quad (i=1, \dots, n; j=1, \dots, m) \quad (6.61)$$

Za rješavanje ovog sustava jednačbi obično se koristi metoda konačnih razlika, s diskretizacijom s vremenskim korakom Δt . Za elementarni vremenski korak Δt treba naći vrijednost $\theta(t+\Delta t)$, ako je poznata vrijednost $\theta(t)$. Razvojem u Taylorov red oko tekuće vrijednosti $\theta(t_0)$ dobije se izraz:

$$\theta(t_0 + \Delta t) = \theta(t_0) + \Delta t \times \theta'(t_0) + \frac{(\Delta t)^2}{2} \times \theta''(t_0) + \quad (6.62)$$

Za rješenje se koristi metoda poznata pod imenom Crank-Nicolson. Zadovoljavajuća približna vrijednost dobije se ako se zadrži samo prva derivacija, koja se procjenjuje središnjom diferencijom pomoću izraza:

$$\theta'(t_0) = \frac{[\theta(t_0 + 1/2\Delta t) - \theta(t_0 - 1/2\Delta t)]}{\Delta t} \quad (6.63)$$

Izraz za derivaciju uvrsti se u sustav jednažbi (6.62), uz aproksimaciju:

$$\theta(t_0 + 1/2\Delta t) = \frac{[\theta(t_0 + \Delta t) + \theta(t_0)]}{2}$$

U nastavku je opisana jednostavna satna dinamička metoda proračuna potrebne energije za grijanje i hlađenje dana u HRN EN ISO 13790 [100].

6.11.2 Opis proračunskog modela

Model zgrade aproksimiran je skupom čvorova koji predstavljaju dijelove zgrade za koje se može prihvatiti da su homogene temperature. Toplinske veze između čvorova predstavljene su ekvivalentnim prijenosima topline. Tako je unutarnji zrak zone predstavljen nepoznatom temperaturom θ_{air} . Unutarnje površine svih građevnih dijelova okrenute prema promatranoj zoni zgrade su nepoznate srednje temperature zračenja, θ_s . Masivni građevni dijelovi u koje je moguće pohraniti toplinu predstavljeni su nepoznatom temperaturom θ_m . Vanjski zrak je predstavljen posebnim čvorom čija je temperatura θ_e funkcija vremena.

Kod jednostavne satne metode razlikuje se, dakle, između temperature unutarnjeg zraka, θ_{air} , i srednje temperature zračenja, θ_s (srednja temperatura unutarnjih površina koje ogradaju promatrani prostor). Za svaki sat tijekom godine proračuna se potrebna snaga grijanja ili hlađenja, $\Phi_{\text{HC,nd}}$, koju treba dovesti ili odvesti iz unutarnjeg zraka kako bi se održala određena najviša ili najniža postavna temperatura. Ako se za $\Phi_{\text{HC,nd}}$ dobije pozitivna vrijednost to znači da je potrebno grijanje prostora, a negativna vrijednost znači da je potrebno hlađenje prostora. Postavna temperatura je ponderirana srednja vrijednost temperature zraka i srednje temperature zračenja s faktorom ponderiranja 0,5 za svaki udio temperature. Potrebna satna energija za grijanje ili hlađenje, $Q_{\text{HC,nd}}$, izražena u MJ, dobije se tako da se potrebna snaga grijanja ili hlađenja, $\Phi_{\text{HC,nd}}$, izražene u W, pomnoži s faktorom 0,036.

Kod izračuna bilance topline, prijenos topline ventilacijom ovisi o temperaturi čvora unutarnjeg zraka, θ_{air} , i temperaturi čvora koji predstavlja temperaturu dobavnog zraka, θ_{sup} .

Koeficijent prijenosa topline transmisijom, H_{tr} , dijeli se na dva dijela: $H_{\text{tr,w}}$ koji obuhvaća prijenos topline kroz ostakljene (prozori, vrata,...) i lagane građevne dijelove te na $H_{\text{tr,op}}$ koji obuhvaća prijenos topline preko preostalih masivnih građevnih dijelova koji posjeduju određeni toplinski kapacitet. $H_{\text{tr,op}}$ se zatim podijeli na $H_{\text{tr,em}}$ i $H_{\text{tr,ms}}$. $H_{\text{tr,em}}$ je dio topline izmijenjen s vanjskim zrakom, a $H_{\text{tr,ms}}$ je dio topline pohranjen u masi promatranog građevnog dijela zgrade.

Toplinski tok prouzročen unutarnjim izvorima topline, Φ_{int} , i toplinski tok uslijed Sunčeva zračenja, Φ_{sol} , podijele se na tri dijela: toplinski tok prema unutarnjem zraku, Φ_{ia} , tok prema unutarnjim površinama građevnih dijelova, Φ_{st} , i tok prema masi tijela zgrade, Φ_{m} , djelujući tako na promjenu njihovih temperatura: θ_{air} , θ_s i θ_m .

Unutarnji i Sunčevi toplinski dobici, Q_{int} i Q_{sol} , izraženi u MJ, dobiju se tako da se vrijednosti Φ_{int} i Φ_{sol} , izražene u W, pomnože s faktorom 0,036.

6.11.3 Glavne varijable

Varijable koje se koriste kod jednostavne satne metode su slijedeće:

- koeficijent prijenosa topline transmisijom ostakljenih i laganih građevnih dijelova zgrade, $H_{\text{tr,w}}$, dan izrazom:

$$H_{\text{tr,w}} = \sum_i A_i \times U_i + \sum_j A_j \times U_j \quad (6.64)$$

gdje je:

- A_i ploština ostakljenog građevnog dijela i , u m^2 ,
- U_i koeficijent prolaska topline ostakljenog građevnog dijela i , u $\text{W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$,
- A_j ploština laganog građevnog dijela j , u m^2 ,
- U_j koeficijent prolaska topline laganog građevnog dijela j , u $\text{W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$,

- koeficijent prijenosa topline transmisijom masivnih građevnih dijelova, $H_{tr,op}$, izračunat prema točki 6.12, razdijeljen na $H_{tr,em}$ i $H_{tr,ms}$, koji se računaju prema slijedećim izrazima:

$$H_{tr,em} = \frac{1}{\left(\frac{1}{H_{tr,op}} - \frac{1}{H_{tr,ms}} \right)} \quad (6.65)$$

$$H_{tr,ms} = h_{ms} \times A_m \quad (6.66)$$

gdje je:

h_{ms} koeficijent izmjene topline, čija vrijednost iznosi: $h_{ms} = 9,1 \text{ W/(m}^2 \times \text{K)}$,
 A_m ploština efektivne mase, izražena u m^2 , proračunata pomoću jednadžbe:

$$A_m = \frac{C_m^2}{(\sum A_j \times K_j^2)} \quad (6.67)$$

C_m efektivni toplinski kapacitet, određen prema točki 6.8.4.3, u J/K ,

A_j ploština građevnog dijela j , u m^2 ,

K_j efektivni toplinski kapacitet po jedinici ploštine građevnog dijela j , određen prema točki 6.8.4.3, u $\text{J/(m}^2 \times \text{K)}$.

Za određene tipove zgrada i određene namjene mogu se na nacionalnoj razini koristiti zadane vrijednosti toplinskog kapaciteta, C_m , i ploštine efektivne mase, A_m . Ako tih vrijednosti na nacionalnoj razini nema, mogu se upotrijebiti vrijednosti iz tablice 6.4.

- ventilacijske karakteristike H_{ve} i θ_{sup} , dobivene prema točki 6.13. Ako zona zgrade prima ventilacijske protoke iz različitih izvora, npr. iz vanjskog zraka i mehaničkog sustava ventilacije, i ako se H_{ve} za svaki sat proračuna u skladu s izrazom (6.161), prilagodba dobavne temperature već je uzeta u obzir u vrijednosti H_{ve} , pa je u tom slučaju $H_{ve} = H_{ve,adj}$, a $\theta_{sup} = \theta_e$,
- koeficijent prijenosa topline transmisijom, $H_{tr,is}$, između unutarnjih površina i unutarnjeg zraka uslijed unutarnjeg strujanja i zračenja, određen izrazom:

$$H_{tr,is} = h_{is} \times A_{tot} \quad (6.68)$$

gdje je:

h_{is} koeficijent prijelaza topline između zraka i površina građevnih dijelova, koje su okrenute prema unutarnjem prostoru. Njegova vrijednost iznosi $h_{is} = 3,45 \text{ W/(m}^2 \times \text{K)}$,

A_{tot} ukupna ploština svih površina građevnih dijelova koje su okrenute prema unutarnjem prostoru, u m^2 . Ona se računa prema približnom izrazu:

$$A_{tot} = A_{at} \times A_f$$

A_f ploština poda kondicioniranog prostora, u m^2 ,

A_{at} bezdimenzijski omjer između ukupne ploštine unutarnjih površina i ploštine poda. Uzima se da je $A_{at} = 4,5$.

Pod na tlu zajedno s tlom modelira se kao jedan građevni dio koji se sastoji od predviđenih slojeva poda, zatim od sloja tla debljine 0,5 m i virtualnog sloja toplinskog otpora R_v , a zanemarivog toplinskog kapaciteta (npr. $1 \text{ J/(kg} \times \text{K)}$). Virtualnom se sloju može dodijeliti debljina 0,1 m pa je tada njegova toplinska provodljivost $\lambda = 0,1 / R_v$.

Toplinski otpor virtualnog sloja R_v , proračuna se iz jednadžbe:

$$R_v = \frac{1}{U} - R_{si} - R_f - R_g \quad (6.69)$$

gdje je:

U stacionarni koeficijent prolaska topline poda na tlu, proračunat metodama iz poglavlja 6.12.3,

R_{si} toplinski otpor unutarnjeg prijelaza topline, u $\text{m}^2 \times \text{K/W}$,

R_f toplinski otpor svih slojeva poda, u $m^2 \times K/W$,
 R_g toplinski otpor sloja tla debljine 0,5 m, u $m^2 \times K/W$.

Rubni uvjet s vanjske strane virtualnog sloja je virtualna temperatura θ_v , koja se može odrediti za svaki mjesec m u godini, pomoću izraza:

$$\theta_{v,m} = \theta_{i,m} - \frac{\phi_m}{(A \times U)} \quad (6.70)$$

ϕ_m iz izraza (6.70) proračuna se prema izrazu (6.119), odnosno (6.128).

Za dani sat vrijednosti svih veličina potrebnih za proračune su poznate, osim potrebne snage grijanja ili hlađenja, $\Phi_{HC,nd}$.

6.11.4 Unutarnji i Sunčevi dobitci topline

U jednostavnoj satnoj metodi zbroj toplinskih tokova iz unutarnjih izvora topline u promatranoj zoni zgrade, Φ_{int} , izražen u W, proračunava se za svaki sat prema izrazu:

$$\phi_{int} = \sum_k \phi_{int,k} + \sum_I (1 - b_{tr,I}) \times \phi_{int,u,I} \quad (6.71)$$

Satne vrijednosti su obično dane kao dnevni ili tjedni režim.

Druga mogućnost proračuna toplinskog toka unutarnjih izvora topline je proračun vremenskog prosjeka za dano razdoblje prema slijedećem izrazu:

$$\phi_{int} = \sum_k \phi_{int,mn,k} + \sum_I (1 - b_{tr,I}) \times \phi_{int,mn,u,I} \quad (6.72)$$

gdje je:

$b_{tr,I}$ faktor prilagodbe za susjedni nekondicionirani prostor s unutarnjim izvorom topline I , definiranim u točki 6.12.4,
 $\phi_{int,k}$ satni toplinski tok iz unutarnjeg izvora topline k , određen u skladu s točkom 6.14, izražen u W,
 $\phi_{int,u,I}$ satni toplinski tok iz unutarnjeg izvora topline I u susjednom nekondicioniranom prostoru, određen u skladu s točkom 6.14, izražen u W,
 $\phi_{int,mn,k}$ vremenski usrednjen toplinski tok iz unutarnjeg izvora topline k , određen u skladu s točkom 6.14, izražen u W,
 $\phi_{int,mn,u,I}$ vremenski usrednjen toplinski tok iz unutarnjeg izvora topline I u susjednom nekondicioniranom prostoru, određen u skladu s točkom 6.14, izražen u W,

Za jednostavnu satnu metodu toplinski tok od Sunčevog zračenja u promatranoj zoni zgrade, ϕ_{sol} , izražen u W, proračunava se za svaki sat prema izrazu:

$$\phi_{sol} = \sum_k \phi_{sol,k} + \sum_I (1 - b_{tr,I}) \times \phi_{sol,u,I} \quad (6.73)$$

Druga mogućnost proračuna toplinskog toka sunčeva izvora topline je proračun vremenskog prosjeka za dano razdoblje prema slijedećem izrazu:

$$\phi_{sol} = \sum_k \phi_{sol,mn,k} + \sum_I (1 - b_{tr,I}) \times \phi_{sol,mn,u,I} \quad (6.74)$$

gdje je:

$b_{tr,I}$ faktor prilagodbe za susjedni nekondicionirani prostor sa Sunčevim izvorom topline I , definiranim u točki 6.12.4,
 $\phi_{sol,k}$ satni toplinski tok iz Sunčevog izvora topline k , određen u skladu s točkom 6.15, izražen u W,
 $\phi_{sol,u,I}$ satni toplinski tok iz Sunčevog izvora topline I u susjednom nekondicioniranom prostoru, određen u skladu s točkom 6.15, izražen u W,
 $\phi_{sol,mn,k}$ vremenski usrednjen toplinski tok iz Sunčevog izvora topline k , određen u skladu s točkom 6.15, izražen u W,

$\Phi_{\text{sol,mn,u,l}}$ vremenski usrednjen toplinski tok iz Sunčevog izvora topline / u susjednom nekondicioniranom prostoru, određen u skladu s točkom 6.15, izražen u W,

Toplinski tokovi iz unutarnjih izvora topline, Φ_{int} , i Sunčeva zračenja, Φ_{sol} , dijele se na:

- toplinski tok prema unutarnjem zraku:

$$\phi_{\text{ia}} = 0,5 \times \phi_{\text{int}} \quad (6.75)$$

- toplinski tok prema unutarnjim površinama građevnih dijelova:

$$\phi_{\text{st}} = \left[1 - \frac{A_{\text{m}}}{A_{\text{tot}}} - \frac{H_{\text{tr w}}}{(9,1 \times A_{\text{tot}})} \right] \times (0,5 \times \phi_{\text{int}} + \phi_{\text{sol}}) \quad (6.76)$$

- toplinski tok prema masi građevnih dijelova:

$$\phi_{\text{m}} = \left(\frac{A_{\text{m}}}{A_{\text{tot}}} \right) \times (0,5 \times \phi_{\text{int}} + \phi_{\text{sol}}) \quad (6.77)$$

Toplinski tokovi Φ_{int} i Φ_{sol} , izraženi u W, dobiju se tako da se Q_{int} i Q_{sol} , izraženi u MJ, podijele s 0,036.

6.11.5 Određivanje temperature zraka i radne temperature za danu vrijednost $\Phi_{\text{HC,nd}}$

Rješenje se osniva na Crank-Nicolsonovoj metodi uzimajući za vremenski korak jedan sat. Temperature su srednje temperature za jedan sat, osim $\theta_{\text{m,t}}$ i $\theta_{\text{m,t-1}}$, koje su trenutačne vrijednosti u vrijeme t i $t-1$.

Za dani vremenski korak, temperatura $\theta_{\text{m,t}}$, izražena u °C, proračunava se na kraju vremenskog koraka iz prethodne vrijednosti $\theta_{\text{m,t-1}}$, prema jednadžbi:

$$\theta_{\text{m,t}} = \frac{\left\{ \theta_{\text{m,t-1}} \left[\left(\frac{C_{\text{m}}}{3600} \right) - 0,5 \times (H_{\text{tr,3}} + H_{\text{tr,em}}) \right] + \phi_{\text{mtot}} \right\}}{\left[\left(\frac{C_{\text{m}}}{3600} \right) + 0,5 \times (H_{\text{tr,3}} + H_{\text{tr,em}}) \right]} \quad (6.78)$$

gdje je:

$$\begin{aligned} \phi_{\text{mtot}} &= \phi_{\text{m}} + H_{\text{tr,em}} \times \theta_{\text{e}} + H_{\text{tr,3}} \times \\ &\times \left\{ \phi_{\text{st}} + H_{\text{tr,w}} \times \theta_{\text{e}} + H_{\text{tr,1}} \times \left[\left(\frac{(\phi_{\text{ia}} + \phi_{\text{HC,nd}})}{H_{\text{ve}}} \right) + \theta_{\text{sup}} \right] \right\} \end{aligned} \quad (6.79)$$

$$H_{\text{tr,1}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{H_{\text{ve}}} + \frac{1}{H_{\text{tr,1s}}} \right)} \quad (6.80)$$

$$H_{\text{tr,2}} = H_{\text{tr,1}} + H_{\text{tr,w}} \quad (6.81)$$

$$H_{\text{tr,3}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{H_{\text{tr,2}}} + \frac{1}{H_{\text{tr,ms}}} \right)} \quad (6.82)$$

θ_{e} i θ_{sup} izraženi su u °C. $H_{\text{tr,em}}$, $H_{\text{tr,w}}$ i H_{ve} izraženi su u W/K, a dobiveni su iz točaka 6.12 i 6.13..

C_{m} je izražen u J/K, a dobiven je iz točke 6.8.4.3 ili tablice 6.7.

Za promatrani vremenski korak, prosječne vrijednosti temperatura dane su izrazima:

$$\theta_{\text{m}} = \frac{(\theta_{\text{m,t}} + \theta_{\text{m,t-1}})}{2} \quad (6.83)$$

$$\theta_{\text{s}} = \frac{\left\{ H_{\text{tr,ms}} \times \theta_{\text{m}} + \phi_{\text{st}} + H_{\text{tr,w}} \times \theta_{\text{e}} + H_{\text{tr,1}} \times \left[\theta_{\text{sup}} + \frac{(\phi_{\text{ia}} + \phi_{\text{HC,nd}})}{H_{\text{ve}}} \right] \right\}}{(H_{\text{tr,ms}} + H_{\text{tr,w}} + H_{\text{tr,1}})} \quad (6.84)$$

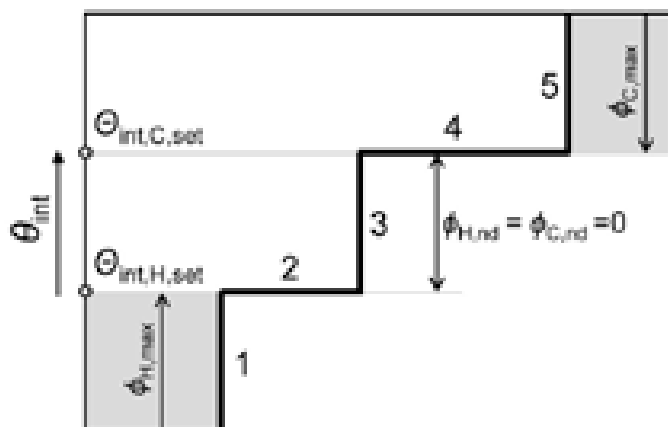
$$\theta_{\text{air}} = \frac{(H_{\text{tr is}} \times \theta_s + H_{\text{ve}} \times \theta_{\text{sup}} + \phi_{\text{ia}} + \phi_{\text{HC nd}})}{(H_{\text{tr is}} + H_{\text{ve}})} \quad (6.85)$$

Radna temperatura se proračuna iz izraza:

$$\theta_{\text{op}} = 0,3 \times \theta_{\text{air}} + 0,7 \times \theta_s \quad (6.86)$$

6.11.5 Proračun unutarnje temperature i zahtijevane snage grijanja i hlađenja

U točki 6.11.4 navedenim jednadžbama može se za svaki sat proračunati unutarnja temperatura za svaku zahtijevanu snagu grijanja ili hlađenja, $\Phi_{\text{HC,nd}}$. Unutarnja temperatura je linearna funkcija $\Phi_{\text{HC,nd}}$. Na slici 6.12 prikazana je promjena temperature zone zgrade prema isporučenoj snazi sustava grijanja / hlađenja. Kod toga može nastati pet različitih situacija, označenih na slici 6.12 brojevima 1 do 5.



Slika 6.12 Ponašanje temperature zone zgrade prema ponašanju sustava grijanja / hlađenja.

- 1) Područje zone zgrade zahtjeva grijanje, ali najveća raspoloživa snaga za grijanje nije dovoljna za postizanje postavne vrijednosti. Proračunata unutarnja temperatura niža je od postavne vrijednosti za grijanje, $\theta_{\text{int,H,set}}$.
- 2) Zona zgrade zahtjeva grijanje, a snaga sustava za grijanje je dovoljna. Unutarnja temperatura je jednaka $\theta_{\text{int,H,set}}$, a proračunata potrebna energija za grijanje je manja od najveće raspoložive vrijednosti.
- 3) Zona zgrade ne zahtjeva ni grijanje ni hlađenje. U pogonu nije ni sustav grijanja ni sustav hlađenja, a proračunava se unutarnja temperatura.
- 4) Zona zgrade zahtjeva hlađenje, a snaga sustava hlađenja je dovoljna. Unutarnja temperatura je jednaka $\theta_{\text{int,C,set}}$, a proračunata potrebna energija za hlađenje manja je od najveće raspoložive vrijednosti.
- 5) Zona zgrade zahtjeva hlađenja, ali najveća raspoloživa snaga hlađenja nije dovoljna za postizanje postavne vrijednosti. Proračunata unutarnja temperatura viša je od postavne vrijednosti za hlađenje, $\theta_{\text{int,C,set}}$.

6.11.6 Postupak proračuna

Ovim se postupkom proračunava stvarna unutarnja temperatura, $\theta_{\text{air,ac}}$, i stvarna snaga za grijanje ili hlađenje, $\Phi_{\text{HC,nd,ac}}$. U svim slučajevima proračunava se i vrijednost $\theta_{\text{m,t}}$ koja se koristi u idućem vremenskom koraku.

Pretpostavlja se da je prvi dan u godini ponedjeljak, a početna temperatura θ_{m} u ponedjeljak 1. siječnja u 00:00 sati da iznosi 18 °C.

1.korak: Provjerava se da li je potrebno grijanje ili hlađenje (slučaj 3 na slici 6.12)

U jednadžbe (6.78), (6.79), (6.84) i (6.85) uvrsti se da je $\Phi_{HC,nd} = 0$ i jednadžbe riješe. Dobivena vrijednost θ_{air} označi se s $\theta_{air,0}$.

Ako je $\theta_{int,H,set} \leq \theta_{air,0} \leq \theta_{int,C,set}$ znači da se ne zahtjeva ni grijanje ni hlađenje, tako da je $\Phi_{HC,nd,ac} = 0$, a $\theta_{air,ac} = \theta_{air,0}$. Daljnji proračun nije potreban. Ako navedeni uvjet nije ispunjen prelazi se na proračunski korak 2.

2.korak: Odredi se postavna vrijednost i proračuna potrebno grijanje i hlađenje

Ako je $\theta_{air,0} > \theta_{int,C,set}$ stavi se da je $\theta_{air,set} = \theta_{air,C,set}$.

Ako je $\theta_{air,0} < \theta_{int,H,set}$ stavi se da je $\theta_{air,set} = \theta_{air,H,set}$.

Zatim se riješe jednadžbe (6.78), (6.79), (6.84) i (6.85) s tim da se uvrsti da je $\Phi_{HC,nd} = \Phi_{HC,nd10}$ gdje je $\Phi_{HC,nd10} = 10 A_f$ (A_f se dobije iz točke 6.6). Dobivena vrijednost θ_{air} označi se s θ_{air10} . θ_{air10} je temperatura zraka dobivena za snagu grijanja od 10 W/m^2 .

Pomoću jednadžbe (6.87), proračuna se $\Phi_{HC,nd,un}$ tj. neograničena potreba za grijanjem ili hlađenjem za postizanje postavne temperature. Za grijanje $\Phi_{HC,nd,un}$ je pozitivna vrijednost, a za hlađenje negativna vrijednost.

$$\phi_{HC,nd,un} = \phi_{HC,nd,10} \times \frac{(\phi_{air,set} - \phi_{air,0})}{(\phi_{air,10} - \phi_{air,0})} \quad (6.87)$$

3.korak: Provjeri se da li je raspoloživa snaga za hlađenje ili grijanje dovoljna (slučaj 2 ili slučaj 4 na slici 6.12)

Ako je $\Phi_{HC,nd,un}$ između $\Phi_{H,max}$ (najveća snaga za grijanje) i $\Phi_{C,max}$ (najveća snaga za hlađenje), tada se prihvaća da je:

$$\begin{aligned} \phi_{HC,nd,ac} &= \phi_{HC,nd,un} \\ \phi_{air,ac} &= \phi_{air,set} \end{aligned}$$

i proračun je završen. Ako to nije ispunjeno prijeđe se na proračunski korak 4.

4.korak: Proračuna se unutarnja temperatura (slučaj 1 ili slučaj 5 iz slike 6.12)

Ako je $\Phi_{HC,nd,un}$ pozitivan broj stavi se da je $\Phi_{HC,nd,ac} = \Phi_{H,max}$. Ako je $\Phi_{HC,nd,un}$ negativan broj, stavi se $\Phi_{HC,nd,ac} = \Phi_{C,max}$. Zatim se proračuna $\theta_{air,ac}$ iz jednadžbi (6.78), (6.79), (6.84) i (6.85).

U ovom slučaju postavna vrijednost temperature nije postignuta.

Potrebna energija za grijanje ili hlađenje za dani sat, $Q_{HC,nd}$, izražena u MJ, jednaka je $0,036 \times \Phi_{HC,nd,ac}$. Vrijednost je pozitivna za potrebe grijanja, a negativna za potrebe hlađenja.

6.11.7 Godišnja potrebna korisna energija za grijanje i hlađenje

Godišnja potrebna korisna energija za grijanje zone zgrade, $Q_{H,nd,an}$, izražena u MJ, dobije se kao zbroj proračunatih potrebnih korisnih energija, $Q_{HC,nd}$, za svaki sat tijekom godine, koje su pozitivne vrijednosti

$$Q_{H,nd,an} = \sum_{i \text{ poz}} Q_{HC,nd,i} \quad (6.88)$$

gdje je:

$Q_{HC,nd,i}$ pozitivna vrijednost potrebne korisne energije u proračunskom koraku i (jedan sat), u MJ.

Godišnja potrebna korisna energija za hlađenje zone zgrade, $Q_{C,nd,an}$, izražena u MJ, dobije se kao zbroj proračunatih potrebnih korisnih energija, $Q_{HC,nd}$, za svaki sat tijekom godine, koje su negativne vrijednosti

$$Q_{C,nd,an} = \sum_{i \text{ neg}} Q_{HC,nd,i} \quad (6.89)$$

gdje je:

$Q_{HC,nd,i}$ negativna vrijednost potrebne korisne energije u proračunskom koraku i (jedan sat), u MJ.

6.12 Ukupni koeficijent prijenosa topline transmisijom

6.12.1 Uvod

Općenito je **koeficijent prijenosa (izmjene) topline**, H , izražen u W/K, definiran kao toplinski tok između dva pregradom odvojena prostora podijeljen s razlikom temperatura tih prostora. Koeficijent prijenosa topline posebno se koristi kao koeficijent prijenosa topline transmisijom i koeficijent prijenosa topline ventilacijom. Kod zgrade /zone koeficijent prijenosa (izmjene) topline zgrade /zone je zbroj ukupnog koeficijenta prijenosa topline transmisijom za zgradu i ukupnog koeficijenta prijenosa topline ventilacijom za zgradu.

Koeficijent prijenosa (izmjene) topline transmisijom, H_{tr} , je toplinski tok zbog transmisije topline kroz materijal građevnog dijela zgrade podijeljen s razlikom temperatura okoliša s obje strane građevnog dijela. Koeficijent prijenosa topline transmisijom ekvivalentan je koeficijentu toplinske veze, L (vidjeti točku 4.4).

Ukupni koeficijent prijenosa topline transmisijom, za zonu zgrade, prilagođen na razliku unutarnje i vanjske temperature, $H_{tr,adj}$, izražen u W/K, proračunava se prema izrazu:

$$H_{tr,adj} = H_D + H_g + H_U + H_A \quad (6.90)$$

gdje je:

- H_D koeficijent prijenosa topline transmisijom između kondicioniranog prostora i vanjskog prostora izravno kroz ovojnici zgrade, izražen u W/K,
- H_g stacionarni koeficijent prijenosa topline transmisijom između kondicioniranog prostora i vanjskog prostora kroz građevne dijelove u dodiru s tlom i tlo, izražen u W/K,
- H_U koeficijent prijenosa topline transmisijom između kondicioniranog prostora i vanjskog prostora kroz nekondicionirane prostore, izražen u W/K,
- H_A koeficijent prijenosa topline transmisijom prema susjednim zgradama, izražen u W/K.

Opći izraz za H_x , koji predstavlja H_D , H_g , H_U ili H_A , je:

$$H_x = b_{tr,x} \times (\sum_i A_i U_i + \sum_k l_k \psi_k + \sum_j X_j) \quad (6.91)$$

gdje je:

- A_i ploština građevnog dijela i toplinske ovojnice zone zgrade, u m^2 ,
- U_i plošni koeficijent prolaska topline građevnog dijela i toplinske ovojnice zone zgrade, u $W/(m^2K)$,
- l_k duljina linijskog toplinskog mosta k , u m ,
- ψ_k duljinski koeficijent prolaska topline linijskog toplinskog mosta k , u $W/(mK)$, određen prema poglavlju 4,
- X_j točkasti koeficijent prolaska topline točkastog toplinskog mosta j , u W/K , određen prema poglavlju 4,
- $b_{tr,x}$ faktor prilagodbe, čija je vrijednost različita od 1 ako temperatura na drugoj strani građevnog dijela zgrade nije jednaka temperaturi vanjskog okoliša, kao, primjerice, u slučaju pregrade prema kondicioniranom ili nekondicioniranom prostoru. Faktorom b prilagođava se koeficijent prijenosa topline umjesto razlika temperatura.

Zbrajanje u jednadžbi (6.91) provodi se po svim građevnim dijelovima zgrade koji odvajaju unutarnji prostor od prostora s druge strane građevnog dijela (vanjski prostor, temeljno tlo, nekondicionirani prostor ili susjedni kondicionirani prostor). Ako postoji više od jednog tipa temeljnog tla ili više od jednog susjednog nekondicioniranog ili kondicioniranog prostora, vrijednosti koeficijenata izmjene topline transmisijom se zbrajaju, uzimajući za svaku komponentu odgovarajuću vrijednost faktora prilagodbe, $b_{tr,x}$.

Konačni izračunati koeficijenti prijenosa topline iskazuju se zaokruženi na tri značajne znamenke.

U slučaju toplinski povezanih zona koje se proračunavaju prema točki 6.10.3, koeficijent prijenosa topline transmisijom za građevne dijelove između zona proračunava se odvojeno.

Prije početka proračuna koeficijenata prijenosa topline transmisijom, toplinska ovojnica dijela zgrade iznad tla modelira se ravninskim i grednim građevnim dijelovima, kako je prikazano na slici 6.13.



Slika 6.13 Modeliranje ovojnice zgrade za proračun koeficijenta prijenosa topline transmisijom.

Ako se proračuni provode po zonama zgrade, granice zona moraju biti jasno definirane, tako da zbroj koeficijenata prijenosa topline transmisijom svih zona bude jednak onom koji bi se dobio kad bi se zgrada proračunala kao jedna zona. Pravila određivanja granica zona u horizontalnom i vertikalnom smjeru, za slučaj primjene sustava vanjskih dimenzija, prikazana su na slikama 6.3 i 6.4.

Ako postoje različita svojstva pri grijanju i pri hlađenju, moraju se koristiti različite vrijednosti koeficijenata izmjene topline transmisijom, H_{tr} , za grijanje i za hlađenje (npr. prozori s pokretnim kaptcima, izmjene topline u temeljnom tlu, izmjene topline prema susjednim ostakljenim prostorima – zimskim vrtovima,...).

6.12.2 Koeficijent prijenosa topline transmisijom izravno između unutarnjeg i vanjskog prostora

Grijane zgrade zimi gube toplinu preko čitave svoje toplinske ovojnice. Taj prijenos topline odvija se dijelom preko građevnih dijelova zgrade koji su s obje strane u dodiru sa zrakom. Koeficijent prijenosa topline transmisijom između kondicioniranog prostora i vanjskog prostora izravno kroz dio ovojnice zgrade koji je obostrano u dodiru sa zrakom, H_D , izražen u W/K, dan je izrazom:

$$H_D = \sum_i A_i U_i + \sum_k l_k \psi_k + \sum_j X_j \quad (6.92)$$

Faktor prilagodbe, $b_{tr,D}$, u ovom slučaju ima vrijednost 1. Simboli u gornjem izrazu imaju značenja kao u izrazu (6.91).

Zbrajanje se mora provesti za sve građevne dijelove zgrade koji odvajaju unutarnji od vanjskog prostora.

Plošni koeficijenti prolaska topline, U_i , ovisno o tipu građevnog dijela, određuju se računski prema metodologiji iz poglavlja 4, a mogu se koristiti i podaci dobiveni mjerenjem.

Duljinski koeficijenti prolaska topline linijskih toplinskih mostova, ψ_k , uzimaju se iz tablica u normi HRN EN ISO 14683 [71] ili odgovarajućih kataloga toplinskih mostova pripremljenih u skladu s tom normom, ili, pak, proračunom u skladu s normom HRN EN ISO 10211 [70].

Točkasti koeficijenti prolaska topline točkastih toplinskih mostova, χ_j , ako već nisu uzeti u obzir kod određivanja plošnih koeficijenata prolaska topline, U_i , proračunaju se u skladu s normom HRN EN ISO 10211 [70].

Ako je glavni toplinsko-izolacijski sloj neprekinut i jednake debljine, mogu se zanemariti duljinski i točkasti koeficijenti prolaska topline, kad se za izračun ploština građevnih dijelova koristi sustav vanjskih dimenzija. Glavni toplinsko-izolacijski sloj je sloj s najvećim toplinskim otporom u građevnim dijelovima koji graniče s potencijalnim toplinskim mostom.

Kod prozora i balkonskih vrata potrebno je odrediti udio ploštine okvira u ukupnoj ploštini prozora odnosno vrata. Ako ove vrijednosti nisu dane na nacionalnoj razini, preporuča se uzeti utvrđenu vrijednost 0,30 za klimatske uvjete u kojima prevladava grijanje, odnosno 0,20 za klimatske uvjete u kojima prevladava hlađenje.

Kod proračuna koeficijenta prijenosa topline transmisijom, može se za prozor s kopcima (rolete, škure,...) računati sa smanjenim koeficijentom prolaska topline prozora, $U_{W,corr}$, tijekom noći, prema izrazu:

$$U_{W,corr} = U_{W+shut} \times f_{shut} + U_W \times (1 - f_{shut}) \quad (6.93)$$

gdje je:

U_{W+shut}	koeficijent prolaska topline prozora zajedno s kapkom, u W/(m ² K),
f_{shut}	bezdimenzionalni udio akumulirane temperaturne razlike za razdoblje sa zatvorenim kapkom,
U_W	koeficijent prolaska topline prozora bez kapka, u W/(m ² K).

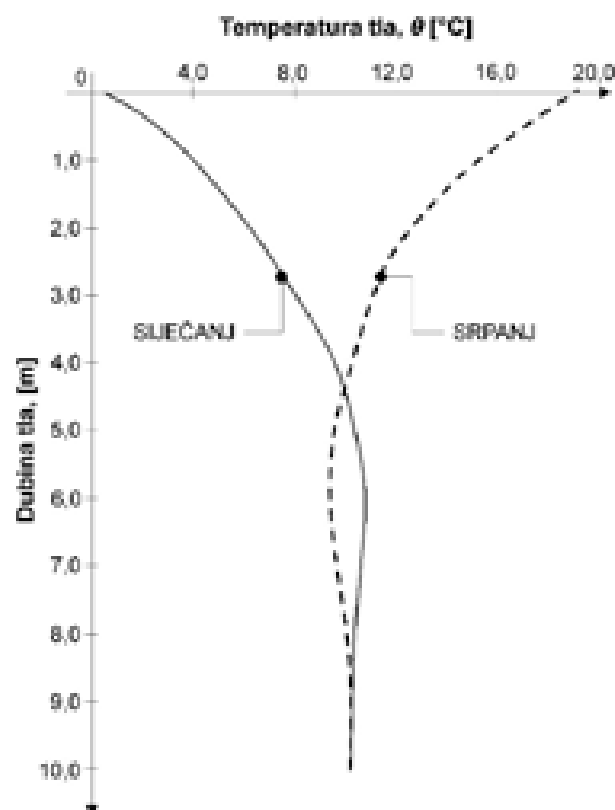
Udio akumulirane temperaturne razlike, f_{shut} , jednak je omjeru akumulirane temperaturne razlike $(\theta_{int,H,set} - \theta_e)$ tijekom svih sati sa zatvorenim kopcima i akumulirane temperaturne razlike $(\theta_{int,H,set} - \theta_e)$ tijekom svih sati proračunskog koraka (mjesec ili sezona).

6.12.3 Koeficijent prijenosa topline transmisijom kroz građevne dijelove u dodiru s tlom

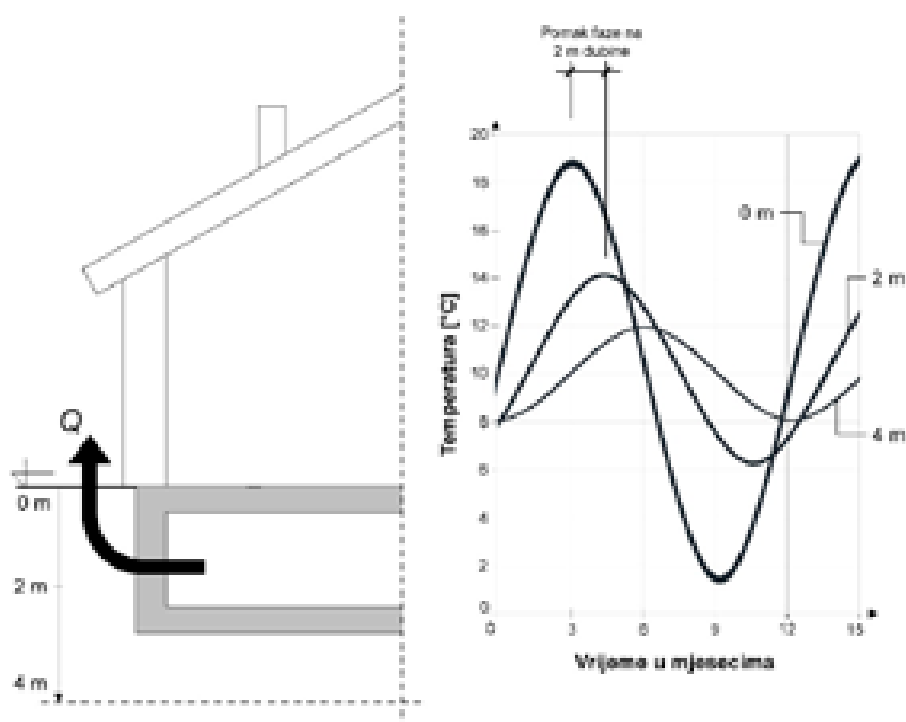
6.12.3.1 Uvod

Zimi se dio topline iz grijane zgrade gubi i preko građevnih dijelova koji su s jedne strane u dodiru s tlom. Ovi građevni dijelovi drugačije se toplinski ponašaju zato što, u usporedbi sa zračnim okolišem, tlo ima veću sposobnost akumulacije topline i u tlu su tijekom godine promjene temperatura relativno male. Zbog toga se koeficijent prolaska topline, U , građevnih dijelova zgrade u dodiru s tlom pronalazi posebnom metodologijom.

Prijenos topline u nekom sustavu uvijek je određen postojećim temperaturnim razlikama. Temperatura tla ovisi o promjeni temperature vanjskog zraka. Zbog velike mase tla i iz toga proizašle toplinske tromosti, dnevne oscilacije temperature vanjskog zraka utječu na promjenu temperature samo gornjeg sloja tla, debljine 50 do 100 cm. Godišnje oscilacije temperature vanjskog zraka imaju pak utjecaja i do dubine preko 10 metara, ovisno o vrsti tla i dubini podzemne vode. Kod toga se godišnja oscilacija temperatura s porastom dubine tla prigušuje i fazno pomiče u odnosu na oscilaciju temperature vanjskog zraka. Na slici 6.14 shematski je prikazana temperaturna krivulja tla u siječnju i srpnju, a na slici 6.15 dan je shematski prikaz promjene prigušenja i faznog pomaka godišnje oscilacije temperatura ovisno o dubini tla.



Slika 6.14 Shematski prikaz temperaturne krivulje tla u siječnju i srpnju

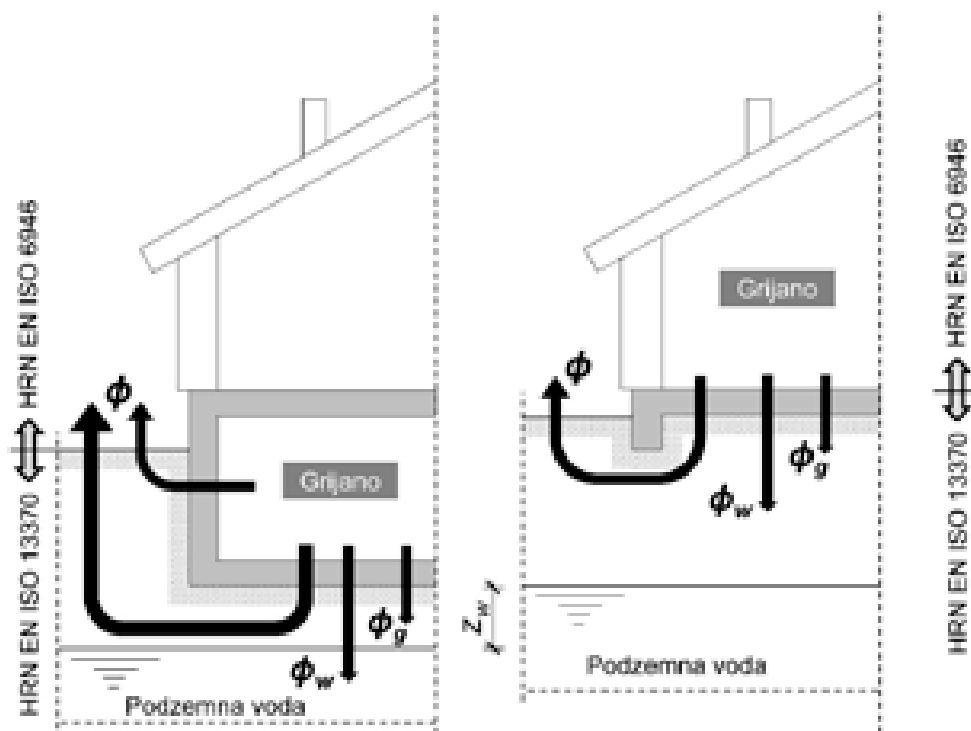


Slika 6.15 Shematski prikaz promjene prigušenja i faznog pomaka godišnje oscilacije temperatura ovisno o dubini u tlu

U nastavku je prikazana metodologija proračuna koeficijenta prolaska topline, U , građevnih dijelova zgrade koji su u dodiru s tlom, prema HRN EN ISO 13370 [103]. Granica koja dijeli zgradu na dio zgrade iznad tla (građevni dijelovi koji neposredno izmjenjuju toplinu s

vanjskim zrakom ili nekondicioniranim prostorom) kod kojeg se proračun koeficijenta U građevnih dijelova provodi prema HRN EN ISO 6946 [66] (vidjeti točku 4) i na dio zgrade u tlu (građevni dijelovi koji izmjenjuju toplinu prema tlu) za koji se prijenos topline proračunava prema HRN EN ISO 13370 [103], nalazi se:

- u visini gornje površine poda (bez podnih obloga) sa strane prostorije, kod podova u dodiru s tlom i uzdignutih podova (sa sanitarnim međuprostorom) te kod negrijane podrumске etaže, odnosno
- u visini okolne površine vanjskog tla, kod grijane podrumске etaže.



Slika 6.16 Prikaz granice između nadzemnog i podzemnog dijela zgrade te prikaz toplinskih tokova kroz građevne dijelove zgrade koji su u dodiru s tlom.

U tehničkoj regulativi iz područja uštede energije i toplinske zaštite često se propisuje najveća dopuštena vrijednost koeficijenta prolaska topline, U , građevnih dijelova zgrade koji su u dodiru s tlom, proračunata prema metodologiji koja vrijedi za građevne dijelove koji obostrano graniče sa zrakom. Kod tog proračun uzima se da je vanjski otpor prijelaza topline, R_{se} , između građevnog dijela i tla jednak nuli, dakle, $R_{se} = 0,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$. U proračun ulaze svi slojevi poda / zida koji se nalaze sa strane prostorije, do sloja hidroizolacije, s izuzetkom slojeva toplinske izolacije od vodoneupojnog materijala (ekstrudirani polistiren, pjenasto staklo,...) koji može biti i s vanjske strane hidroizolacijskog sloja, ali uvijek iznad razine podzemne vode. Ovako izračunati koeficijent prolaska topline, U , služi za usporedbu toplinsko-izolacijskih svojstava građevnih dijelova različitih sastava i često se u tehničkim propisima ograničava njihova najveća dopuštena vrijednost. Prema našem Tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama [58], pod na tlu se mora toplinski izolirati samo u širini 5 metara uz vanjske zidove. Naime, provedene analize gustoće toplinskog toka kroz pod na tlu pokazale su da rubno područje poda ima presudni utjecaj na ukupni toplinski tok kroz pod na tlu. Uspoređujući međusobno toplinske tokove kroz toplinski neizoliran pod, zatim kroz pod toplinski izoliran po čitavoj svojoj površini i pod izoliran samo 5 metara rubno, utvrđeno je da se izolacijom prvih 5 metara rubnog područja poda na tlu postiže oko $\frac{3}{4}$ smanjenja toplinskog toka kroz pod koji je toplinski izoliran po čitavoj svojoj površini [104].

Kako je prikazano na slici 6.16 toplinski tok kroz građevne dijelove u dodiru s tlom sastoji se od tri dijela: toplinski tok kroz građevni dio zgrade i tlo prema vanjskom prostoru, toplinski tok

kroz građevni dio zgrade i tlo prema dubljim slojevima tla i toplinski tok kroz građevni dio i tlo u podzemnu vodu. Ti pojedinačni udjeli u ukupnom toplinskom toku nastupaju istovremeno i međusobno su povezani s tim da je toplinski tok prema vanjskom prostoru dominantan.

Algoritam proračuna toplinskih tokova kroz građevne dijelove zgrade u dodiru s tlom iz HRN EN ISO 13370 [103], proizašao je iz analitičkog i numeričkog rješenja diferencijalne jednačbe dvodimenzionalnog, a djelomično i trodimenzionalnog toplinskog toka, za stacionarne i periodičke promjene rubnih uvjeta. Kod toga se razlikuje stacionarni dio toplinskog toka koji se proračunava sa srednjom godišnjom temperaturom vanjskog i unutarnjeg zraka i nestacionarni dio toplinskog toka koji je uvjetovan godišnjom oscilacijom vanjske odnosno unutarnje srednje mjesečne temperature.

Iznalaženje mjesečnih toplinskih tokova kroz građevne dijelove koji su u dodiru s tlom provodi se u tri računska koraka:

- određivanje koeficijenta prolaska topline U ,
- određivanje stacionarnog koeficijenta prijenosa topline, H_g , i periodičkog koeficijenta prijenosa topline, H_{pe} ,
- određivanje mjesečnih toplinskih tokova, Φ_m .

Kod proračuna se razlikuju slijedeći slučajevi:

- pod na tlu, toplinski neizoliran ili s punoplošnom izolacijom,
- pod na tlu, s rubnom toplinskom izolacijom,
- uzdignuti pod (sa sanitarnim međuprostorom),
- grijani podrum,
- negrijani ili djelomično grijani podrum.

6.12.3.2 Ulazni podaci za proračun

Toplinske karakteristike tla ovise o gustoći tla, sadržaju vode u tlu, veličini zrna, vrsti mineralnih sastojaka zrna te da li je tlo zamrznuto ili nije zamrznuto. To znači da se toplinske karakteristike tla mogu znatno razlikovati ne samo za različite lokacije već i za istu lokaciju na različitim dubinama, a mogu se i mijenjati s vremenom zbog promjene sadržaja vlage ili zamrzavanja / odmrzavanja. Zato vrijednosti za toplinske proračune moraju biti reprezentativne za lokaciju predmetne zgrade i za razdoblje na koje se proračun odnosi.

Podaci o toplinskim karakteristikama tla uzimaju se iz nacionalnih propisa, a ako njih nema mogu se koristiti podaci iz tablice 6.7, ovisno o vrsti tla. Ako je vrsta tla nepoznata onda se za toplinsku vodljivost tla uzima vrijednost $\lambda = 2,0 \text{ W/(m}\times\text{K)}$, a za toplinski kapacitet $\rho \times c = 2,0 \times 10^6 \text{ J/(m}^3\times\text{K)}$. Toplinski kapacitet građevnih materijala slojeva građevnog dijela u dodiru s tlom je relativno mali u usporedbi s onim tla i stoga se zanemaruje.

Tablica 6.7 Toplinske karakteristike tla

Vrsta tla	Gustoća u suhom stanju $\rho \text{ kg/m}^3$	Sadržaj vlage $u \text{ kg/kg}$	Stupanj zasićenosti vlagom, %	Toplinska vodljivost $\lambda \text{ W/(m}\times\text{K)}$	Reprezentativna vrijednost $\lambda \text{ W/(m}\times\text{K)}$	Toplinski kapacitet $\rho \times c \text{ J/(m}^3\times\text{K)}$
prah	1400 - 1800	0,10 – 0,30	70 - 100	1,0 – 2,0	1,5	$3,0 \times 10^6$
glina	1200 - 1600	0,20 – 0,40	80 - 100	0,9 – 1,4	1,5	$3,0 \times 10^6$
suhi pijesak	1700 - 2000	0,04 – 0,12	20 - 80	1,1 – 2,2	2,0	$2,0 \times 10^6$
vlažan pijesak	1700 - 2100	0,10 – 0,18	85 - 100	1,5 – 2,7	2,0	$2,0 \times 10^6$
stijena	2000 - 3000	< 0,03		2,5 – 4,5	3,5	$2,0 \times 10^6$

Za vrijednosti toplinske vodljivosti građevnih materijala i proizvoda dijela zgrade u tlu koriste se projektne vrijednosti (vidjeti točku 3.10), pri čemu treba uzeti u obzir konkretne uvjete vlažnosti i temperature.

Vrijednosti otpora prijelaza topline uzimaju se prema tablici 4.2.

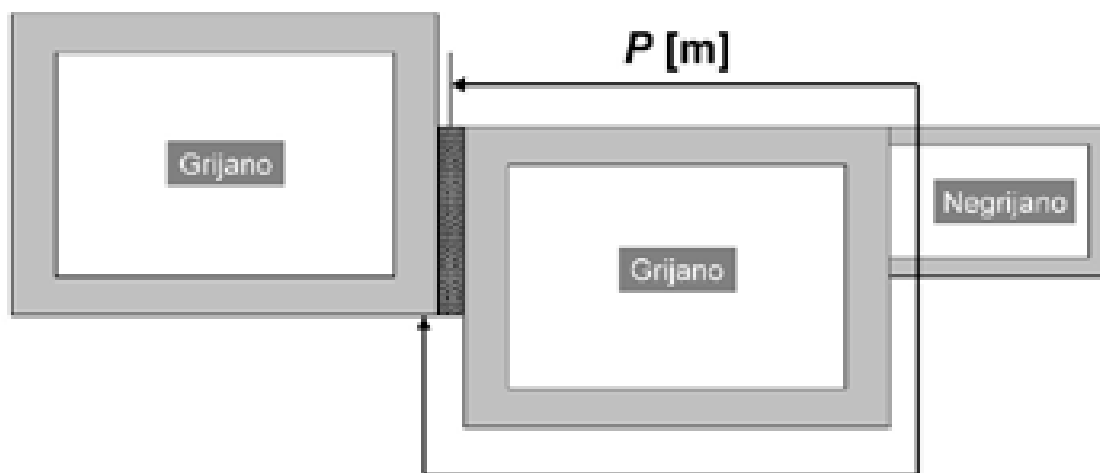
Ako u različitim prostorijama iznad predmetnog poda u dodiru s tlom postoje različite temperature, tada treba računati s prostorno prosječnom vrijednosti određenom ponderiranjem temperature svakog prostora s ploštinom površine toga prostora u dodiru s tlom.

Za proračun toplinskih tokova potrebno je poznavati srednju godišnju unutarnju i vanjsku temperaturu te vrijednosti srednjih mjesečnih unutarnjih i vanjskih temperatura za svaki mjesec. Za uzdignuti pod sa sanitarnim međuprostorom koji je prirodno ventiliran potrebno je još poznavati i brzinu vjetra izmjerenu na visini 10 m iznad razine terena.

U formulama za proračun toplinskog toka u tlu koristi se pojam „**karakteristična dimenzija poda**“, B' u metrima, definiran kao ploština poda na tlu odnosno poda podruma, A , u m^2 , podijeljena s polovicom izloženog opsega poda, P , u metrima:

$$B' = \frac{A}{(0,5 \times P)} \quad (6.94)$$

P je tzv. izloženi opseg poda tj. ukupna duljina vanjskog zida koji dijeli grijani dio zgrade od vanjskog ili od negrijanog prostor. U P ne ulazi duljina eventualno postojećeg pregradnog zida koji odvaja promatrani grijani dio zgrade od drugih grijanih dijelova zgrade (vidjeti sliku 6.17).



Slika 6.17 Shematski prikaz izloženog poda P (tlocrt)

Karakteristična dimenzija poda, B' , karakterizira oblik i veličnost zgrade. Veličina B' pokazuje da li se radi o uskoj podnoj ploči s velikim toplinskim tokovima na rubovima ili o više kvadratnom obliku koji pokazuje u prosjeku dulje putove toplinskih tokova do vanjskog zraka što će kod proračuna dovesti do većeg toplinskog otpora građevnog dijela u dodiru s tlom.

Radi pojednostavnjenja izraza za koeficijent prolaska topline građevnih dijelova u dodiru s tlom, uveden je pojam „ekvivalentne debljine“. Toplinski otpor građevnog dijela (poda na tlu, poda podruma, podrumskog zida) predstavljen je **ekvivalentnom debljinom**, koja je jednaka debljini sloja tla koji ima jednaki toplinski otpor kao promatrani građevni dio. Oznaka za ekvivalentnu debljinu za podove je d_t , u metrima, a za zidove u dodiru s tlom d_w , u metrima.

Formule za proračun koeficijenta prolaska topline, U , dane u HRN EN ISO 13370 [103] promatraju toplinski tok kroz građevni dio u dodiru s tlom uključivši i tlo. Kod njih se za vanjski otpor prijelaza topline između tla i vanjskog zraka uvrštava vrijednost $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2 \times \text{K/W}$.

6.12.3.3 Metode proračuna prijenosa topline preko tla

Prijenos topline preko tla karakteriziran je:

- toplinskim tokom koji je povezan s površinom poda, a ovisi o sastavu poda (debljini slojeva poda i vrsti materijala slojeva),
- toplinskim tokom koji je povezan s opsegom poda, a ovisi o toplinskom mostu na rubu poda,
- godišnjim periodičkim toplinskim tokom koji je također povezan s opsegom poda, a proizlazi iz toplinske tromosti tla.

Stacionarni (ili prosječni godišnji) koeficijent prijenosa topline kroz tlo, H_g u W/K, dan je jednačbom:

$$H_g = A \times U + P \times \psi_g \quad (6.95)$$

gdje je:

- A ploština poda na tlu, u m^2 , izračunata sustavom vanjskih dimenzija,
 U koeficijent prolaska topline preko tla između unutarnjeg i vanjskog prostora, u $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$, izračunat prema posebnim formulama danim u nastavku,
 P izloženi opseg poda, u m, jednak ukupnoj duljini zida koji dijeli grijanu zgradu od vanjskog prostora ili od negrijanog prostora (isključuje se duljina zidova koji odvajaju promatrani dio zgrade od drugih grijanih dijelova zgrade),
 ψ_g duljinski koeficijent prolaska topline toplinskog mosta na spoju zida i poda, određen proračunom prema HRN EN ISO 10211 [70] ili uzet iz tablica u HRN EN ISO 14683 [71].

Ako postoje nekondicionirani prostori, koeficijent H_g se proračuna kao da nekondicioniranih prostora nema (tj. kao da se radi o vanjskom prostoru).

Prijenos topline preko tla može se proračunati na godišnjoj bazi koristeći samo stacionarni koeficijent prijenosa topline kroz tlo, H_g , (konstantni dio - vezan za godišnju prosječnu razliku unutarnje i vanjske temperature) ili na sezonskoj ili mjesečnoj bazi koristeći dodatne periodičke koeficijente, H_{pe} , (promjenjivi dio - vezan za mjesečne promjene razlike unutarnje i vanjske temperature), kojima se uzima u obzir toplinska tromost tla.

U točki 6.12.3.10 dana je metoda proračuna koeficijenta prijenosa topline za mjesečno razdoblje, $H_{g,m}$, uzimajući u obzir toplinsku tromost tla. Ti se mjesečni koeficijenti, $H_{g,m}$, mogu povezati s godišnjim prosječnim koeficijentom, H_g , s pomoću faktora prilagodbe, $b_{tr,m}$, na način da je za svaki mjesec m :

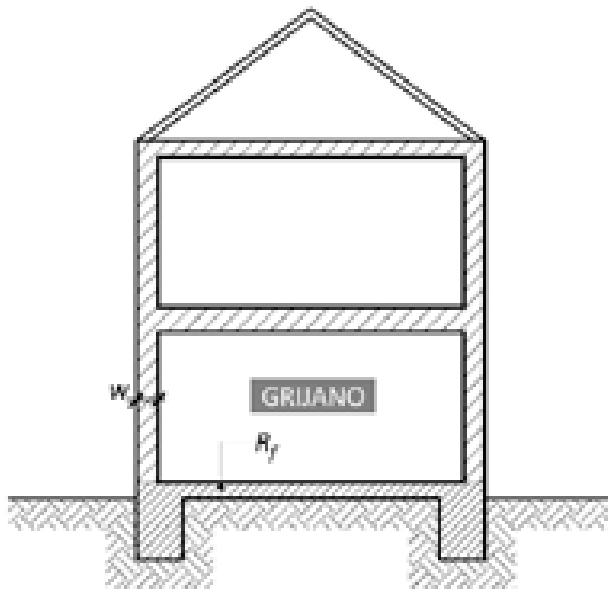
$$b_{tr,m} = \frac{H_{g,m}}{H_g} \quad (6.96)$$

Vrijednost faktora $b_{tr,m}$ razlikuje se po mjesecima. U pravilu vrijednost faktora b_{tr} je zimi manja od 1, a ljeti veća od 1, jer je tijekom zime razlika temperature kroz tlo manja od razlike temperatura unutarnjeg i vanjskog zraka, a ljeti je ta razlika veća. Ako je prosječna mjesečna vanjska temperatura viša od unutarnje temperature, vrijednost b_{tr} može biti negativna.

Druga mogućnost je da se vrijednost faktora b_{tr} odredi na nacionalnoj razini kao mjesečne ili sezonske vrijednosti (različite za razdoblje grijanja i razdoblje hlađenja).

6.12.3.4 Proračun koeficijenta prolaska topline, U , kroz pod na tlu, između unutarnjeg i vanjskog prostora

Pod na tlu odnosi se na sve podove (prizemlja) kod kojih je podna ploča u dodiru s tlom na cijeloj svojoj površini (vidjeti sliku 6.18). Podna ploča može biti toplinski neizolirana ili izolirana ispod, iznad ili unutar podne ploče na cijeloj svojoj površini.



Slika 6.18 Shematski prikaz presjeka zgrade s podom na tlu

Ekvivalentna debljina poda na tlu, d_t u m, određena je izrazom:

$$d_t = w + \lambda \times (R_{si} + R_f + R_{se}) \quad (6.97)$$

gdje je:

- w ukupna debljina zida, uključivo sve slojeve, u m,
- R_f ukupni toplinski otpor slojeva poda, u $(m^2 \times K)/W$,
- R_{si} unutarnji otpor prijelaza topline, u $(m^2 \times K)/W$, obično $R_{si} = 0,17 m^2 \times K/W$,
- R_{se} vanjski otpor prijelaza topline, u $(m^2 \times K)/W$, obično $R_{se} = 0,04 m^2 \times K/W$,
- λ toplinska vodljivost nesmrznutog tla, u $W/(m \times K)$.

Toplinski otpor slojeva betona, uključivo betonsku podlogu te tankih podnih obloga smije se zanemariti.

Koeficijent prolaska topline kroz pod i tlo između unutarnjeg i vanjskog zraka, U , u $W/(m^2 \times K)$, određuje se, ovisno o vrijednosti toplinske izolacije poda, sljedećim formulama:

- ako je $d_t < B'$ (toplinski neizolirani i umjereno izolirani podovi)

$$U = \left[\frac{2 \times \lambda}{(\pi \times B' + d_t)} \right] \times \ln \left[\left(\frac{\pi \times B'}{d_t} \right) + 1 \right] \quad (6.98)$$

- ako je $d_t \geq B'$ (dobro toplinski izolirani podovi)

$$U = \frac{\lambda}{(0,457 \times B' + d_t)} \quad (6.99)$$

Ako se prikazuje kao konačan rezultat, koeficijent prolaska topline, U , mora se zaokružiti na dvije značajne znamenke. U međuproračunima mora se računati s najmanje tri značajne znamenke.

Stacionarni (ili prosječni godišnji) koeficijent prijenosa topline kroz tlo, H_g , proračunava se pomoću jednadžbe (6.95).

Primjer 6.2

Grijana zgrada bez podruma, pravokutnog tlocrta, duljine 10 m i širine 7 m, temeljena je na pjeskovitom tlu ($\lambda = 2,00 \text{ W/(m}\times\text{K)}$). Pod na tlu se sastoji od armirano betonske ploče debljine 30 cm ($\lambda = 2,60 \text{ W/(m}\times\text{K)}$), s punoplošnim toplinsko-izolacijskim slojem s $\lambda = 0,040 \text{ W/(m}\times\text{K)}$, debljine 10 cm. Debljina vanjskog zida je 40 cm. Linijski toplinski most na spoju vanjskog zida i poda na tlu je tipa GF1 s duljinskim koeficijentom prolaska topline za sustav vanjskih dimenzija $\psi = 0,65 \text{ W/(m}\times\text{K)}$. Izračunati stacionarni koeficijent prijenosa topline kroz pod na tlu, H_g .

Ploština poda na tlu je: $A = 10 \times 7 = 70 \text{ m}^2$.

Izloženi opseg poda je: $P = 10 + 7 + 10 + 7 = 34 \text{ m}$.

Karakteristična dimenzija poda, prema izrazu (6.94), je: $B' = 70/17 = 4,118 \text{ m}$.

Toplinski otpor slojeva poda na tlu je: $R_t = 0,30/2,60 + 0,10/0,04 = 2,615 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Ekvivalentna debljina poda na tlu, prema izrazu (6.97), je:

$$d_t = 0,40 + 2,0 \times (0,17 + 2,615 + 0,04) = 6,05 \text{ m}$$

Budući da je $d_t = 6,05 \text{ m} > B' = 4,118 \text{ m}$, koeficijent prolaska topline kroz pod i tlo između unutarnjeg i vanjskog zraka proračunati će se prema jednadžbi (6.99):

$$U = 2,0 / (0,457 \times 4,118 + 6,05)$$

$$U = 0,252 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

Stacionarni koeficijent prijenosa topline kroz tlo, prema jednadžbi (6.95), iznosi:

$$H_g = 70 \times 0,252 + 34 \times 0,65$$

$$H_g = 17,64 + 22,10$$

$$H_g = 39,74 \text{ W/K}$$

6.12.3.5 Proračun koeficijenata prolaska topline, U , kroz pod na tlu s rubnom toplinskom izolacijom, između unutarnjeg i vanjskog prostora

Pod na tlu može imati rubnu toplinsku izolaciju postavljenu horizontalno ili vertikalno po opsegu poda (vidjeti slike 6.19 i 6.20). Širina ili visina rubne izolacije, D , relativno je mala u odnosu na širinu zgrade.

Učinak rubne toplinske izolacije obrađuje se kao duljinski koeficijent prolaska topline, $\psi_{g,e}$, koji ima negativnu vrijednost.

Zidovi temelja od materijala male gustoće s toplinskom vodljivošću, λ , manjom od toplinske vodljivosti okolnog tla, obrađuju se kao vertikalna rubna toplinska izolacija.

U slučaju da je predviđena ugradnja i horizontalne i vertikalne rubne toplinske izolacije, koeficijent $\psi_{g,e}$ proračuna se posebno za svaki tip rubne izolacije, i za daljnje proračune se uzme onaj koji pruža veće smanjenje gubitka topline.

Dodatna ekvivalentna debljina, d' u m, uslijed prisustva rubne toplinske izolacije, određena je izrazom:

$$d' = R' \times \lambda \quad (6.100)$$

gdje je:

λ toplinska vodljivost tla, u $\text{W/(m}\times\text{K)}$,

R' dodatni toplinski otpor sloja rubne toplinske izolacije (ili zida temelja), u $\text{m}^2\text{K/W}$, tj. razlika između toplinskog otpora sloja rubne izolacije, R_n , i toplinskog otpora tla (ili sloja poda) kojeg zamjenjuje, jednake debljine:

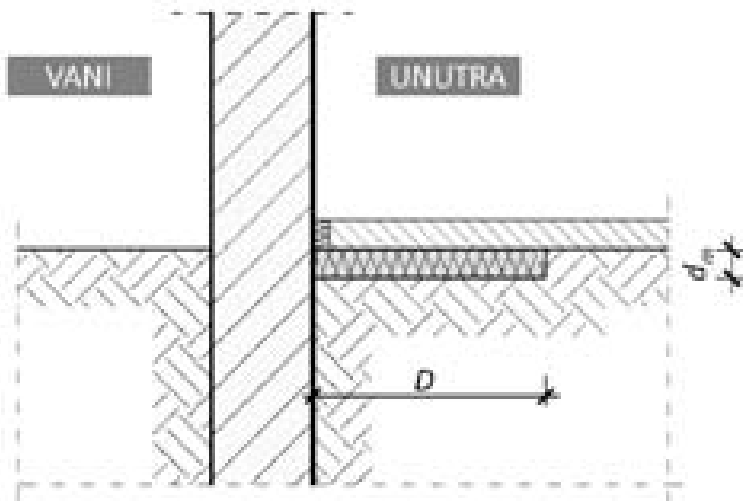
$$R' = R_n - \frac{d_n}{\lambda} \quad (6.101)$$

d_n je debljina rubne izolacije, u m.

U slučaju poda na tlu s rubnom toplinskom izolacijom, jednačba (6.95) za proračun stacionarnog koeficijent prijenosa topline kroz tlo, H_g , u W/K, mijenja se u formulu:

$$H_g = A \times U + P \times (\psi_g + \psi_{g,e}) \quad (6.102)$$

a) – Horizontalna rubna toplinska izolacija



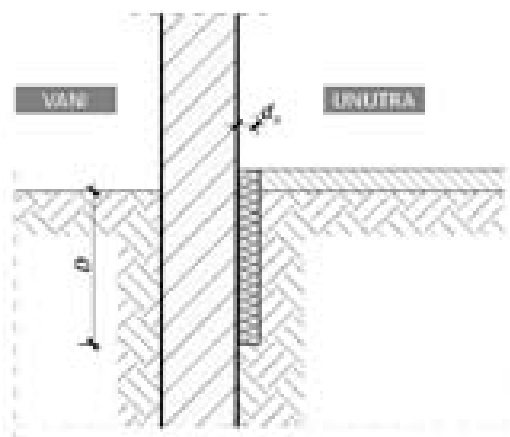
Slika 6.19 Shematski prikaz horizontalne rubne toplinske izolacije poda na tlu (presjek)

Duljinski koeficijent prolaska topline, $\psi_{g,e}$, određuje se formulom:

$$\psi_{g,e} = \left(\frac{-\lambda}{\pi} \right) \times \left[\ln \left(\frac{D}{d_t} + 1 \right) - \ln \left(\frac{D}{(d_t + d')} + 1 \right) \right] \quad (6.103)$$

Slika 6.19 prikazuje položaj rubne toplinske izolacije ispod slojeva poda. Ista formula vrijedi i za položaj dodatnog izolacijskog sloja iznad poda, unutar poda ili izvan zgrade.

b) – Vertikalna rubna izolacija



Slika 6.20 Shematski prikaz vertikalne rubne toplinske izolacije poda na tlu (presjek)

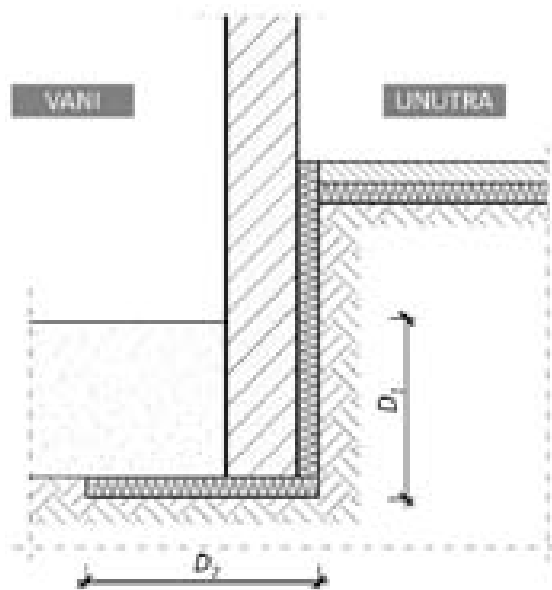
Duljinski koeficijent prolaska topline, $\psi_{g,e}$, određuje se formulom:

$$\psi_{g,e} = \left(\frac{-\lambda}{\pi} \right) \times \left[\ln \left(\frac{2D}{d_t} + 1 \right) - \ln \left(\frac{2D}{(d_t + d')} + 1 \right) \right] \quad (6.104)$$

Slika 6.20 prikazuje položaj rubne toplinske izolacije s unutrašnje strane zida temelja. Ista jednadžba vrijedi i za položaj dodatnog izolacijskog sloja s vanjske strane ili unutar zida temelja.

Primjer 6.3

Za zgradu iz primjera 6.2 temelj je zaštićen vertikalnom rubnom toplinskom izolacijom na unutarnjoj površini temeljnog zida, do dubine $D_1 = 50$ cm. Ovaj sloj toplinske izolacije nastavlja se ispod temelja i čini horizontalnu rubnu izolaciju izvan zgrade duljine $D_2 = 60$ cm (vidjeti sliku 6.21). Vertikalna i horizontalna rubna toplinska izolacija debljine su po 10 cm s projektnom toplinskom vodljivošću materijala, $\lambda = 0,050$ W/(m×K). Izračunati stacionarni koeficijent prijenosa topline kroz pod na tlu, H_g .



Slika 6.21 Primjer poda na tlu s rubnom toplinskom izolacijom – shematski prikaz (presjek)

Toplinski otpor sloja rubne izolacije je: $R_n = 0,10/0,05 = 2,0$ m²×K/W.

Dodatni toplinski otpor sloja rubne toplinske izolacije, prema izrazu (6.101) je:

$$R' = 2,0 \cdot \frac{0,1}{2,0} = 1,95 \text{ m}^2 \times \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

Dodatna ekvivalentna debljina uslijed prisustva rubne toplinske izolacije, prema izrazu (6.100), je:

$$d' = 1,95 \times 2,0 = 3,9 \text{ m}$$

Za vertikalnu rubnu izolaciju, prema izrazu (6.104), duljinski koeficijent prolaska topline, $\psi_{g,e}$, iznosi:

$$\psi_{g,e} = - \left(\frac{2,0}{3,142} \right) \times \left[\ln \left(\frac{2 \times 0,5}{6,05} + 1 \right) - \ln \left(\frac{2 \times 0,5}{(6,05 + 3,9)} + 1 \right) \right]$$

$$\psi_{g,e} = - 0,193 \text{ W(m} \times \text{K)}$$

Za horizontalnu rubnu izolaciju, prema izrazu (6.103), duljinski koeficijent prolaska topline, $\psi_{g,e}$, iznosi:

$$\psi_{g,e} = - \left(\frac{2,0}{3,142} \right) \times \left[\ln \left(\frac{0,6}{6,05} + 1 \right) - \ln \left(\frac{0,6}{(6,05 + 3,9)} + 1 \right) \right]$$

$$\psi_{g,e} = - 0,119 \text{ W(m} \times \text{K)}$$

Kako je $d_t = 6,05$ m > $B' = 4,118$ m, koeficijent prolaska topline kroz pod i tlo između unutarnjeg i vanjskog zraka proračunati će se prema formuli (6.99):

$$U = \frac{2,0}{(0,457 \times 4,118 + 6,05)}$$

$$U = 0,252 \frac{W}{(m^2 \times K)}$$

Budući da je veći učinak vertikalne toplinske izolacije, to prema jednadžbi (6.102), stacionarni koeficijent prijenosa topline kroz tlo, iznosi:

$$H_g = 70 \times 0,252 - 34 \times 0,193$$

$$H_g = 17,64 - 6,56$$

$$H_g = 11,08 \frac{W}{K}$$

6.12.3.6 Proračun koeficijenta prolaska topline, U , kroz uzdignuti pod, između unutarnjeg i vanjskog prostora

Uzdignuti pod (sa sanitarnim međuprostorom) je pod odmaknut od tla (vidjeti sliku 6.22). Za slučaj kad je prostor ispod poda prirodno ventilirana vanjskim zrakom, koeficijent prolaska topline, U , u $W/(m^2 \times K)$, kroz uzdignuti pod, između unutarnjeg i vanjskog zraka, dan je formulom:

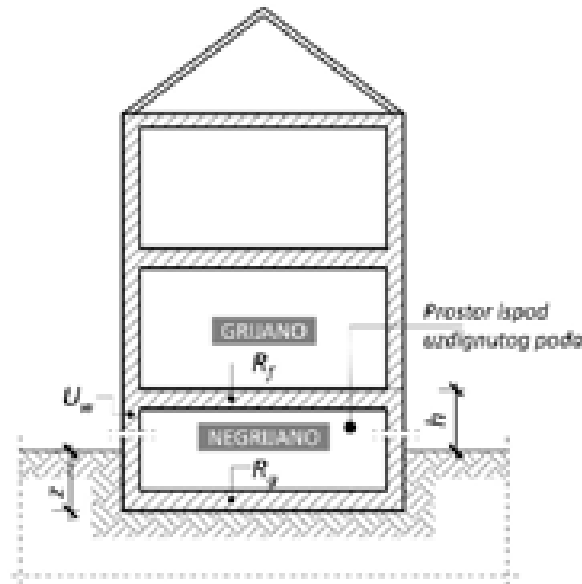
$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_f} + \frac{1}{U_g + U_x} \quad (6.105)$$

gdje je:

U_f koeficijent prolaska topline uzdignutog dijela poda, u $W/(m^2 \times K)$, (između unutarnjeg prostora i prostora ispod uzdignutog poda),

U_g koeficijent prolaska topline za toplinski tok kroz tlo, u $W/(m^2 \times K)$,

U_x ekvivalentni koeficijent prolaska topline između prostora ispod uzdignutog poda i vanjskog prostora, uzimajući u obzir toplinski tok kroz zidove prostora ispod uzdignutog poda i ventilaciju toga prostora, u $W/(m^2 \times K)$.



Slika 6.22 Shematski prikaz presjeka zgrade s uzdignutim podom

Proračun koeficijenta U_f mora obuhvatiti učinak svih toplinskih mostova. Za slučaj grijane zgrade uzimaju se otpori prijelaza topline za smjer toplinskog toka prema dolje, a kod hladene zgrade za smjer toplinskog toka prema gore.

Koeficijent U_g proračunamo pomoću formule:

$$U_g = \left[\frac{2 \times \lambda}{(\pi \times B' + d_g)} \right] \times \ln \left[\left(\frac{\pi \times B'}{d_g} \right) + 1 \right] \quad (6.106)$$

gdje je:

$$d_g = w + \lambda \times (R_{si} + R_g + R_{se}) \quad (6.107)$$

R_g je toplinski otpor eventualnog sloja toplinske izolacije u podnožju prostora ispod uzdignutog poda. Ako oko podnožja prostora ispod poda postoji rubna izolacija, koeficijent U_g proračunamo pomoću formule:

$$U_g = U_{g0} + \frac{2\psi_{g,e}}{B'} \quad (6.108)$$

gdje je U_{g0} koeficijent prolaska topline poda bez rubne toplinske izolacije.

Ako je dubina prostora ispod uzdignutog poda za više od 0,5 m ispod razine okolnog terena, tada koeficijent U_g proračunamo po formuli:

$$U_g = U_{bf} + \left(\frac{z \times P \times U_{bw}}{A} \right) \quad (6.109)$$

gdje je:

U_{bf} koeficijent prolaska topline poda prostora ispod uzdignutog poda, u $W/(m^2 \times K)$, izračunat prema izrazu (6.112) ili (6.113),

U_{bw} koeficijent prolaska topline zidova prostora ispod uzdignutog poda koji su u dodiru s tlom, u $W/(m^2 \times K)$, izračunat prema izrazu (6.115).

Koeficijent prolaska topline U_x proračunamo pomoću formule:

$$U_x = 2 \times h \times \frac{U_w}{B'} + 1450 \times \epsilon \times v \times \frac{f_w}{B'} \quad (6.110)$$

gdje je:

h visina gornje površine uzdignutog poda iznad razine okolnog terena, u m,

U_w koeficijent prolaska topline zidova prostora ispod uzdignutog poda, koji se nalaze iznad razine okolnog terena, u $W/(m^2 \times K)$,

ϵ ploština ventilacijskih otvora po duljini opsega prostora ispod uzdignutog poda, u m^2/m ,

v prosječna brzina vjetra na visini 10 m iznad terena, u m/s,

f_w faktor zaklonjenosti od vjetra.

Ako se visina h mijenja duž vanjskog ruba poda, u jednadžbu (6.110) se uvrštava njena prosječna vrijednost.

Faktor zaklonjenosti od vjetra predstavlja odnos brzine vjetra u blizini razine tla, uzimajući u obzir zaklonjenost susjednim zgradama i drugim preprekama i brzine vjetra na visini 10 m (uz pretpostavku da nema zapreka strujanju vjetra). Ako vrijednosti nisu dane u nacionalnom propisu, mogu se koristiti vrijednosti iz tablice 6.8.

Tablica 6.8 Vrijednosti faktora zaklonjenosti od vjetra

Lokacija zgrade	Primjer	Faktor zaklonjenosti f_w
Zaklonjena	Središte grada	0,02
Prosječna	Predgrađe	0,05
Izložena	Selo	0,10

Stacionarni (ili prosječni godišnji) koeficijent prijenosa topline kroz tlo, H_g , proračunava se pomoću jednadžbe (6.95).

Primjer 6.4

Pod zgrade iz primjera 6.2 izveden je kao uzdignuti pod sa sanitarnim međuprostorom. Zgrada je locirana u predgrađu. Visina gornje površine uzdignutog poda iznad razine okolnog terena iznosi $h = 0,30$ m. Ploština otvora za ventilaciju, po duljini opsega prostora ispod uzdignutog poda, iznosi $\varepsilon = 0,002$ m²/m. Prosječna brzina vjetra na visini 10 m je $v = 4$ m/s. Zidovi prostora ispod uzdignutog poda su od armiranog betona, debljine 30 cm, bez dodatnog sloja toplinske izolacije. Izračunati koeficijent prolaska topline, U , kroz uzdignuti pod između unutarnjeg i vanjskog zraka.

Prema podacima iz primjera 6.2, koeficijent prolaska topline uzdignutog dijela poda (između unutarnjeg prostora i prostora ispod uzdignutog poda) iznosi:

$$U_f = \frac{1}{(0,17 + 2,615 + 0,04)} = 0,354 \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \times \text{K})}$$

Koeficijent prolaska topline zidova prostora ispod uzdignutog poda iznosi:

$$U_w = \frac{1}{\left(0,13 + \frac{0,30}{2,60} + 0,04\right)} = 3,504 \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \times \text{K})}$$

Ekvivalentna debljina poda na tlu (neizoliran: $R_g = 0$), prostora ispod uzdignutog poda, iznosi:

$$d_g = 0,3 + 2,0 \times (0,17 + 0 + 0,04) = 0,720 \text{ m}$$

Prema jednadžbi (6.106), koeficijent prolaska topline za toplinski tok kroz tlo, je:

$$U_g = \left[2 \times \frac{2,0}{(3,142 \times 4,118 + 0,720)} \right] \times \ln \left(3,142 \times \frac{4,118}{0,720} + 1 \right)$$

$$U_g = 0,862 \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \times \text{K})}$$

Ekvivalentni koeficijent prolaska topline između prostora ispod uzdignutog poda i vanjskog prostora, uzimajući u obzir toplinski tok kroz zidove prostora ispod uzdignutog poda i ventilaciju toga prostora, prema jednadžbi (6.110) iznosi:

$$U_x = 2 \times 0,30 \times \frac{3,504}{4,118} + 1450 \times 0,002 \times 4 \times \frac{0,05}{4,118}$$

$$U_x = 0,651 \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \times \text{K})}$$

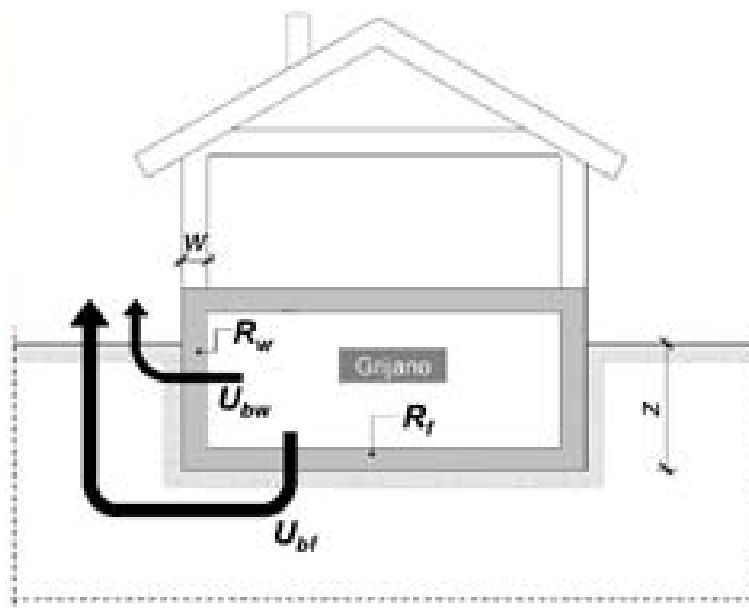
Koeficijent prolaska topline, U , kroz uzdignuti pod, između unutarnjeg i vanjskog zraka, prema jednadžbi (6.105) iznosi:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{0,354} + \frac{1}{(0,862 + 0,651)} = 3,486 \text{ m}^2 \times \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$U = 0,287 \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \times \text{K})}$$

6.12.3.7 Proračun koeficijenta prolaska topline, U , kroz grijani podrum, između unutarnjeg i vanjskog prostora

Shematski prikaz presjeka zgrade s grijanim podrumom dan je na slici 6.23.



Slika 6.23 Shematski prikaz presjeka zgrade s grijanim podrumom

Ekvivalentna debljina poda podruma, d_t u m, iznosi:

$$d_t = w + \lambda \times (R_{si} + R_f + R_{se}) \quad (6.111)$$

gdje je:

w debljina zidova zgrade na razini terena, uključivo sve slojeve, u m,
 R_f toplinski otpor poda podruma, u $(m^2 \times K)/W$.

Koeficijent prolaska topline za pod podruma, U_{bf} , u $W/(m^2 \times K)$, proračuna se, ovisno o toplinskoj izolaciji poda podruma, pomoću jednadžbi:

- ako je $(d_t + 0,5z) < B'$ (toplinski neizolirani ili umjereno izolirani podovi podruma)

$$U_{bf} = \frac{2 \times \lambda}{(\pi \times B' + d_t + 0,5z)} \ln \left[\frac{(\pi \times B')}{(d_t + 0,5z)} + 1 \right] \quad (6.112)$$

- ako je $(d_t + 0,5z) \geq B'$ (dobro toplinski izolirani podovi podruma)

$$U_{bf} = \frac{\lambda}{(0,457 \times B' + d_t + 0,5z)} \quad (6.113)$$

z je dubina donjeg ruba podne ploče podruma ispod gornjeg ruba tla.

Ekvivalentna debljina zidova podruma, d_w u m, iznosi:

$$d_w = \lambda \times (R_{si} + R_w + R_{se}) \quad (6.114)$$

gdje je R_w toplinski otpor zidova podruma u dodiru s tlom, uključujući sve slojeve, u $(m^2 \times K)/W$.

Koeficijent prolaska topline za zidove podruma, U_{bw} , u $W/(m^2 \times K)$, proračuna se pomoću formule:

$$U_{bw} = \frac{2 \times \lambda}{(\pi \times z)} \times \frac{1 + 0,5d_t}{(d_t + z)} \times \ln \left(\frac{z}{d_w} + 1 \right) \quad (6.115)$$

Gornja jednačica vrijedi kada je $d_w \geq d_t$, što je obično slučaj. Ako je međutim, $d_w < d_t$, tada d_t u gornjoj jednačici treba zamijeniti s d_w .

Stacionarni (ili prosječni godišnji) koeficijent prijenosa topline kroz tlo (iz cijelog podruma), H_g u W/K, između unutarnjeg i vanjskog prostora, dan je izrazom:

$$H_g = (A \times U_{bf}) + (z \times P \times U_{bw}) + (P \times \psi_g) \quad (6.116)$$

Za zgradu koja ima dio zgrade s podom na tlu, a dio zgrade s podrumom, približna vrijednost ukupnog gubitka topline kroz tlo može se odrediti proračunom zgrade kao da ima podrum po cijeloj svojoj površini, ali s dubinom podruma jednakoj polovici stvarne dubine podrumljenog dijela.

Primjer 6.5

Zgrada s grijanim podrumom, pravokutnog tlocrta, duljine 10 m i širine 7 m, nalazi se ispod razine tla, $z = 2,5$ m. Tlo je pjeskovito ($\lambda = 2,00$ W/(m×K)). Pod i zidovi podruma se sastoje od armirano betonskog sloja debljine 30 cm ($\lambda = 2,60$ W/(m×K)), s punoplošnim toplinsko-izolacijskim slojem s $\lambda = 0,040$ W/(m×K), debljine 10 cm. Izračunati stacionarni koeficijent prijenosa topline kroz grijani podrum, H_g .

Ploština poda podruma je: $A = 10 \times 7 = 70$ m².

Izloženi opseg poda podruma je: $P = 10 + 7 + 10 + 7 = 34$ m.

Karakteristična dimenzija poda podruma, prema izrazu (6.94), je: $B' = 70/17 = 4,118$ m.

Toplinski otpor slojeva poda na tlu je: $R_t = 0,30/2,60 + 0,10/0,04 = 2,615$ m²×K/W.

Toplinski otpor slojeva zida prema tlu je: $R_w = 0,30/2,60 + 0,10/0,04 = 2,615$ m²×K/W.

Ekvivalentna debljina poda podruma, prema izrazu (6.111), je:

$$d_t = 0,40 + 2,0 \times (0,17 + 2,615 + 0,04) = 6,050 \text{ m}$$

Ekvivalentna debljina zidova podruma, prema izrazu (6.114), je:

$$d_w = 2,0 \times (0,13 + 2,615 + 0,04) = 5,570 \text{ m}$$

Budući da je $d_t + 0,5 \times z = 7,3$ m $> B' = 4,118$ m, koeficijent prolaska topline kroz pod podruma između unutarnjeg i vanjskog zraka proračunati će se prema formuli (6.113):

$$U_{bf} = \frac{2,0}{(0,457 \times 4,118 + 6,05 + 0,5 \times 2,5)}$$

$$U_{bf} = 0,218 \frac{W}{(m^2 \times K)}$$

Koeficijent prolaska topline kroz zidove podruma prema tlu, između unutarnjeg i vanjskog zraka, proračunati će se prema formuli (6.115):

$$U_{bw} = \frac{2 \times 2,0}{(3,142 \times 2,5)} \times \frac{1 + 0,5 \times 5,570}{(5,570 + 2,5)} \times \ln \left(\frac{2,5}{5,570} + 1 \right)$$

$$U_{bw} = 0,254 \frac{W}{(m^2 \times K)}$$

Stacionarni koeficijent prijenosa topline kroz tlo, prema izrazu (6.116), iznosi:

$$H_g = 70 \times 0,218 + 2,5 \times 34 \times 0,254$$

$$H_g = 15,26 + 21,59$$

$$H_g = 36,85 \frac{W}{K}$$

6.12.3.8 Proračun koeficijenta prolaska topline, U , kroz negrijani podrum, između unutarnjeg i vanjskog prostora

Koeficijent prolaska topline kroz negrijani podrum, U , u $W/(m^2 \times K)$, između unutarnjeg i vanjskog prostora, dan je formulom:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_f} + \frac{A}{[(A \times U_{bf}) + (z \times P \times U_{bw}) + (h \times P \times U_w) + (0,33 \times n \times V)]} \quad (6.117)$$

gdje je:

U_f koeficijent prolaska topline poda iznad negrijanog podruma (između grijanog prostora i podruma),

U_w koeficijent prolaza topline zidova podruma iznad razine okolnog terena,

A ploština poda podruma, u m^2 , izračunata sustavom vanjskih dimenzija,

z dubina donjeg ruba podne ploče podruma ispod gornjeg ruba okolnog terena, u m,

P izloženi opseg poda, u m,

n broj izmjena zraka podruma, u h^{-1} ,

V obujam zraka u podrumu, u m^3 ,

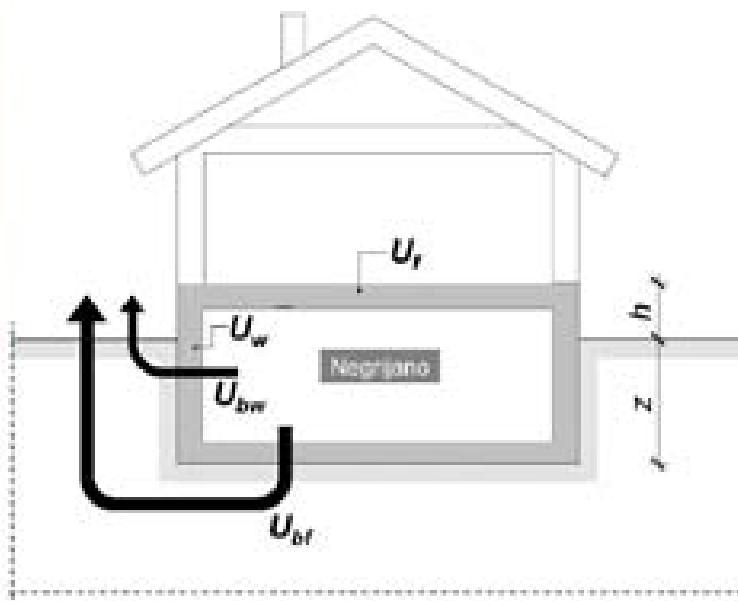
h visina gornje površine poda iznad podruma iznad razine okolnog terena, u m.

Ako u nacionalnim tehničkim propisima nema podataka o ventilaciji podruma, može se za broj izmjena zraka na sat, uzeti vrijednost $n = 0,3$

Koeficijenti prolaska topline U_f i U_w proračunavaju se u skladu s poglavljem 4.

Koeficijenti prolaska topline U_{bf} i U_{bw} proračunavaju se pomoću jednadžbi (6.112), (6.113) i (6.115).

Stacionarni (ili prosječni godišnji) koeficijent prijenosa topline kroz tlo, H_g , u W/K , između unutarnjeg i vanjskog prostora, dan je izrazom (6.95).



Slika 6.24 Shematski prikaz presjeka zgrade s negrijanim podrumom

6.12.3.9 Djelomično grijani podrum

Toplinski tok za podrum koji se grije samo u jednom svom dijelu, može se proračunati slijedećim postupkom:

- proračuna se toplinski tok za potpuno grijani podrum,
- proračuna se toplinski tok za negrijani podrum,

- c) kombinacijom toplinskih tokova iz a) i b) u razmjeru ploština grijanog i negrijanog dijela podruma koji su u dodiru s tlom odredi se toplinski tok djelomično grijanog podruma.

6.12.3.10 Proračun toplinskog toka kroz tlo odvojeno za svaki mjesec

Za nestacionarno promatranje, kao što je npr. proračun mjesečnih toplinskih tokova ili proračun najvećeg toplinskog toka kod proračuna opterećenja grijanja, HRN EN ISO 13370 [103] iznalazi „vanjski periodički koeficijent prijenosa topline“, H_{pe} , i „unutarnji periodički koeficijent prijenosa topline“, H_{pi} . Kod prihvaćanja konstantne unutarnje temperature preko čitave godine interesira nas za daljnje promatranje samo „vanjski periodički koeficijent prijenosa topline“, H_{pe} , uvjetovan vanjskom oscilacijom temperature.

Da bi se uzeo u obzir učinak velike toplinske tromosti tla, prijenos topline prikazuje se stacionarnom ili prosječnom komponentom i godišnjom periodičkom komponentom. Stacionarna komponenta vezana je na razliku godišnje prosječne unutarnje temperature i godišnje prosječne vanjske temperature. Periodička komponenta vezana je za amplitudu promjene srednje mjesečne unutarnje i vanjske temperature oko njihovih prosječnih godišnjih vrijednosti.

Za daljnje proračune pretpostavlja se da je unutarnja temperatura, θ_i , konstantna tijekom godine, a da se vanjska temperatura mijenja oko svoje prosječne godišnje vrijednosti po sinusnoj funkciji slijedećeg oblika:

$$\theta_{e,m} = \theta_{e,a} - \theta_{e,amp} \times \cos \left[2\pi \times \frac{(m - \tau)}{12} \right] \quad (6.118)$$

gdje je:

$\theta_{e,m}$ mjesečna srednja vanjska temperatura za mjesec m , u °C

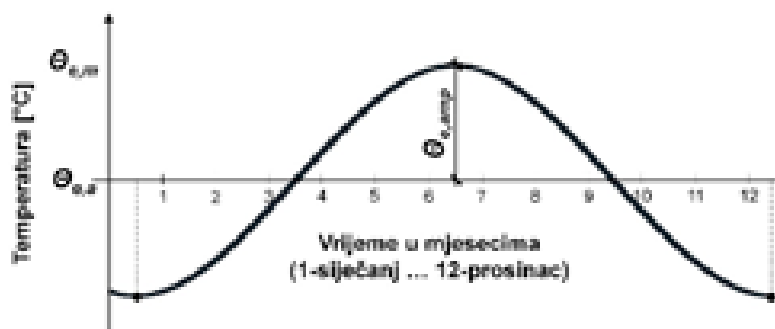
$\theta_{e,a}$ godišnja prosječna vanjska temperatura, u °C, (zbroy mjesečnih srednjih vrijednosti podijeljen s 12)

$\theta_{e,amp}$ amplituda promjene mjesečne srednje vanjske temperature, u K. Ta je amplituda definirana kao polovina razlike najviše i najniže vrijednosti srednje temperature za pojedine mjesece

m broj mjeseca (za siječanj $m = 1$, za prosinac $m = 12$)

τ broj mjeseca u kojem nastupa najniža vanjska temperatura (po potrebi se τ smije izraziti decimalnim brojem). τ treba ocijeniti analizom prosječne vanjske temperature za svaki mjesec, prema meteorološkim podacima. Ako nema posebnih podataka, uzima se da je $\tau = 1$. To pretpostavlja da najniža temperatura nastupa sredinom siječnja, a najviša sredinom srpnja.

U proračunima se zahtijevaju samo prosječna godišnja temperatura i godišnja amplituda. Te se vrijednosti mogu izvesti iz srednjih mjesečnih vrijednosti.



Slika 6.25 Prikaz promjene vanjske temperature tijekom godine

Pod pretpostavkom konstantne unutarnje temperature, prosječni toplinski tok u mjesecu m , Φ_m u W, preko građevnog dijela koji je u dodiru s tlom, dan je izrazom:

$$\phi_m = H_g \times (\theta_{i,a} - \theta_{e,a}) + H_{pe} \times \theta_{e,amp} \times \cos \left[2\pi \times \frac{(m - \tau - \beta)}{12} \right] \quad (6.119)$$

gdje je:

- H_g stacionarni (ili prosječni godišnji) koeficijent prijenosa topline kroz tlo, u W/K,
- H_{pe} vanjski periodički koeficijent prijenosa topline, u W/K, koji je posljedica oscilacija vanjske temperature,
- $\theta_{i,a}$ godišnja prosječna unutarnja temperatura, u °C,
- β vremenski zaostatak (pomak faze) oscilacija toplinskog toka prema oscilaciji vanjske temperature, u mjesecima.

H_{pe} uključuje učinak toplinskih mostova na rubu poda. Ako se on proračunava bez učinka prijenosa topline na rubovima, mora mu se dodati izraz $P \times \psi_g$.

Oscilacija periodičkog toplinskog toka je u zaostatku prema promjeni vanjske temperature. β je pozitivan broj.

U nastavku dani izrazi za H_{pe} odnose se na slučajeve bez prijenosa topline po rubovima (toplinski neizolirani podovi i izolirani podovi sa zanemarivim toplinskim mostovima na rubovima poda).

Koeficijent vanjskog periodičkog prijenosa topline ovisan je o **periodičkoj dubini prodora**, δ u metrima. Periodička dubina prodora, δ , znači dubinu u tlu na kojoj se (za jednodimenzionalan toplinski tok) amplituda temperature smanjuje s faktorom $1/e$ u odnosu na onu na površini, pri čemu je e baza prirodnih logaritama ($e = 2,718...$). Za godišnji period oscilacija δ je dan izrazom:

$$\delta = \left[\frac{(3,15 \times 10^7 \times \lambda)}{(\pi \times \rho \times c)} \right]^{0,5} \quad (6.120)$$

gdje je $(3,15 \times 10^7)$ broj sekunda u godini.

U tablici 6.9 dane su približne vrijednosti za δ koje se smiju koristiti za ove proračune.

Tablica 6.9 Periodična dubina prodora

Kategorija	Opis	δ (m)
1	glina ili prah	2,2
2	pijesak ili šljunak	3,2
3	homogena stijena	4,2

Fazna razlika je vrijeme između najviše ili najniže periodičke temperature i najvećeg ili najmanjeg toplinskog toka koji je posljedica te temperature. Približna vrijednost fazne razlike β za podove na tlu, dana je izrazom:

$$\beta = 1,5 - 0,42 \times \ln \left[\frac{\delta}{(d_t + 1)} \right] \quad (6.121)$$

Rubna toplinska izolacija može znatno povećati vremenski zaostatak u odnosu na promjenu vanjske temperature, posebno ako je postavljena vertikalno ili izvan zgrade.

Za uzdignute podove učinci su manji jer toplinski tok ventilacijom nema vremenski zaostatak.

Za podume čija je dubina usporediva ili veća od δ , u izrazu (6.121) treba zamijeniti d_t s d_w .

Točna vrijednost vremenskog zaostatka između toplinskog toka i promjene temperature ne utječe znatno na rezultate proračuna energije. U tablici 6.10 dane su vrijednosti fazne razlike koje se mogu koristiti u većini proračuna, s relativno malim pogreškama.

Tablica 6.10 Fazne razlike u mjesecima

Tip poda	β
Pod na tlu bez rubne toplinske izolacije	1
Pod na tlu s unutarnjom horizontalnom rubnom izolacijom	1
Pod na tlu s vertikalnom ili vanjskom rubnom izolacijom	2
Uzdignuti pod	0
Grijan ili negrijan podrum	1

Pod na tlu: toplinski neizoliran ili izoliran po cijeloj površini

Koeficijent periodičkog prijenosa topline vezan za promjenu vanjske temperature za godišnji period oscilacija, H_{pe} , u W/K, dan je izrazom:

$$H_{pe} = 0,37 \times P \times \lambda \times \ln \left(\frac{\delta}{d_t + 1} \right) \quad (6.122)$$

Pod na tlu s rubnom toplinskom izolacijom

Koeficijent periodičkog prijenosa topline, H_{pe} , u W/K, sastoji se od dva izraza, jedan je vezan na rub poda, a drugi na sredinu poda.

Za podove s horizontalnom rubnom toplinskom izolacijom je:

$$H_{pe} = 0,37 \times P \times \lambda \times \left[(1 - e^{-D/\delta}) \times \ln \left(\frac{\delta}{(d_t + d')} + 1 \right) + e^{-D/\delta} \times \ln \left(\frac{\delta}{d_t} + 1 \right) \right] \quad (6.123)$$

Za podove s vertikalnom rubnom toplinskom izolacijom je:

$$H_{pe} = 0,37 \times P \times \lambda \times \left[(1 - e^{-2D/\delta}) \times \ln \left(\frac{\delta}{(d_t + d')} + 1 \right) + e^{-2D/\delta} \times \ln \left(\frac{\delta}{d_t} + 1 \right) \right] \quad (6.124)$$

Ako temelj ima više od jedne vrste rubne toplinske izolacije (vertikalne ili horizontalne, unutarnje ili vanjske) proračuna se H_{pe} gornjim izrazima posebno za svaku rubnu toplinsku izolaciju i za daljnji proračun prihvati najmanja vrijednost.

Uzdignuti pod

Koeficijent periodičkog prijenosa topline, H_{pe} , u W/K, dan je izrazom:

$$H_{pe} = U_f \times \frac{\left[0,37 \times P \times \lambda \times \ln \left(\frac{\delta}{d_g} + 1 \right) + U_x \times A \right]}{\left(\frac{\lambda}{\delta} + U_x + U_f \right)} \quad (6.125)$$

Grijani podrum

Koeficijent periodičkog prijenosa topline zbog promjene vanjske temperature u godišnjem periodu oscilacija, H_{pe} , u W/K, sastoji se od dva dijela, jedan je vezan na pod podruma, a drugi na zidove podruma. Proračunava se izrazom:

$$H_{pe} = 0,37 \times P \times \lambda \times \left[e^{-z/\delta} \times \ln \left(\frac{\delta}{d_t} + 1 \right) + 2(1 - e^{-z/\delta}) \times \ln \left(\frac{\delta}{d_w} + 1 \right) \right] \quad (6.126)$$

Negrijani podrum

Koeficijent periodičkog prijenosa topline zbog promjene vanjske temperature u godišnjem periodu oscilacija, H_{pe} , u W/K, dan je izrazom:

$$H_{pe} = A \times U_f \times \frac{\left[0,37 \times P \times \lambda \times (2 - e^{-z/\delta}) \times \ln \left(\frac{\delta}{d_t} + 1 \right) + h \times P \times U_w + 0,33 \times n \times V \right]}{\left[(A + z \times P) \times \frac{\lambda}{\delta} + h \times P \times U_w + 0,33 \times n \times V + A \times U_f \right]} \quad (6.127)$$

6.12.3.11 Proračun toplinskog toka kroz tlo primjenom prosječnih mjesečnih temperatura

Ako su mjesečne srednje vanjske temperature poznate, mjesečni toplinski tok, ϕ_m , u W, proračuna se iz izraza:

$$\phi_m = H_g \times (\theta_{i,a} - \theta_{e,a}) + H_{pe} \times (\theta_{e,a} - \theta_{e,m}) \quad (6.128)$$

U gornjem izrazu pretpostavljeno je da je fazna razlika β jednaka nula.

6.12.3.12 Proračun toplinskog toka kroz tlo tijekom sezone grijanja (ili hlađenja)

Za proračun sezonskog prijenosa topline obično se učinak fazne razlike između toplinskog toka i promjena temperature može zanemariti. Prosječan toplinski tok kroz tlo u sezoni grijanja, ϕ , u W, određuje se iz prosjeka izraza s kosinusom u jednadžbi (6.119) za sezonu grijanja:

$$\phi = H_g \times (\theta_{i,a} - \theta_{e,a}) + \gamma \times H_{pe} \times \theta_{e,amp} \quad (6.129)$$

gdje vrijednost faktora γ ovisi o duljini sezone grijanja, prema izrazu:

$$\gamma = \frac{12}{(n \times \pi)} \times \sin \left(\frac{n \times \pi}{12} \right) \quad (6.130)$$

n je broj mjeseci u sezoni grijanja.

Primjena jednadžbe (6.129) primjerena je za proračune gubitka topline na sezonskoj, a ne na mjesečnoj osnovi.

Prosječni toplinski tok u sezoni hlađenja dobije se iz izraza:

$$\phi = H_g \times (\theta_{i,a} - \theta_{e,a}) - \gamma \times H_{pe} \times \theta_{e,amp} \quad (6.131)$$

gdje je faktor γ dan izrazom (6.130), a n je broj mjeseci sezone hlađenja.

Kao poseban slučaj izraza (6.129) dobije se prosječni godišnji toplinski tok ϕ_{av} , za koji vrijedi $n = 12$ i time je $\gamma = 0$. Dobije se:

$$\phi_{av} = H_g \times (\theta_{i,a} - \theta_{e,a}) \quad (6.132)$$

6.12.3.13 Proračun prosječnog godišnjeg toplinskog toka kroz tlo

Ako $\theta_{e,amp}$ ili duljina sezone grijanja nisu poznati, ili ako se gubici kroz tlo zahtijevaju samo približno, prosječni godišnji toplinski tok kroz tlo, ϕ_a , može se uzeti da je konstantan, jednak stacionarnoj komponenti:

$$\phi_a = H_g \times (\theta_{i,a} - \theta_{e,a}) \quad (6.133)$$

6.12.3.14 Najveći mjesečni toplinski tok

Iz jednadžbe (6.119) s

$$\cos \left[\frac{2\pi(m - \tau - \beta)}{12} \right] = 1 \quad (6.134)$$

najveći mjesečni toplinski tok, $\Phi_{\max}$ u W, dan je izrazom:

$$\phi_{\max} = H_g \times (\theta_{i,a} - \theta_{e,a}) + H_{pe} \times \theta_{e,amp} \quad (6.135)$$

Taj izraz odgovara konstantnoj unutarnjoj temperaturi i najvećem doprinosu od promjena vanjske temperature. Izraz (6.135) je zbroj stacionarnog toplinskog toka i amplitude periodičkog toplinskog toka. Vrijednost $\Phi_{\max}$ može se koristiti za dimenzioniranje sustava grijanja. Ona uzrokuje međutim neznatno predimenzioniranje, budući da $\Phi_{\max}$ građevnih dijelova u dodiru s tlom u većini slučajeva ne nastupa istovremena s $\Phi_{\max}$ građevnih dijelova koji graniče s vanjskim zrakom, već s vremenskim pomakom od 1-2 mjeseca.

6.12.3.15 Mjesečni koeficijent prijenosa topline kroz tlo

Koeficijent prijenosa topline kroz tlo, $H_{g,m}$, u W/K, u mjesecu m , dan je izrazom:

$$H_{g,m} = \frac{\phi_m}{(\theta_{i,m} - \theta_{e,m})} \quad (6.136)$$

gdje je:

Φ_m mjesečni toplinski tok, u W, izračunat izrazom (6.119) ili (6.128),

$\theta_{i,m}$ srednja mjesečna unutarnja temperatura za mjesec m , u °C,

$\theta_{e,m}$ srednja mjesečna vanjska temperatura za mjesec m , u °C.

6.12.3.16 Ukupni prijenos topline tijekom sezone grijanja i hlađenja

Ukupni prijenos topline kroz tlo može se prikazati kao zbroj mjesečnih vrijednosti:

$$Q = \sum Q_m \text{ (od } m = m_1 \text{ do } m = m_2) \quad (6.137)$$

$$Q_m = 86\,400 \times N_m \times \phi_m \quad (6.138)$$

gdje je:

Q ukupno prenesena količina topline, u J,

Q_m količina topline prenesena u mjesecu m , u J,

N_m broj dana u mjesecu m ,

Φ_m srednji toplinski tok u mjesecu m , u W,

m_1 prvi mjesec u sezoni grijanja ili hlađenja,

m_2 posljednji mjesec u sezoni grijanja ili hlađenja,

86 400 broj sekundi u danu.

Za slučaj prosječnog toplinskog toka, Φ , iz jednadžbi (6.129) ili (6.131), za čitav period grijanja / hlađenja dobije se:

$$Q = 86\,400 \times N \times \phi \quad (6.139)$$

gdje je N ukupan broj dana u sezoni grijanja / hlađenja.

Primjer 6.6

Za zgradu iz primjera 6.2 odrediti mjesečne toplinske tokove i izmijenjenu toplinu kroz pod na tlu. Zgrada je locirana u Zagrebu, u pjeskovitom terenu. Srednja postavna unutarnja temperatura za grijanje je $\theta_i = 20$ °C. Pretpostavlja se da je linijski toplinski most na spoju vanjskog zida i poda na tlu jednak nuli.

Srednje mjesečne vanjske temperature za grad Zagreb su dane u tablici 6.11.

Tablica 6.11 Srednje mjesečne vanjske temperature za grad Zagreb

Mjesec	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	God.
Temp. θ_e °C	1,0	2,9	7,1	11,7	16,8	20,3	21,9	21,3	16,3	11,4	6,5	1,4	11,6

Amplituda promjene srednje mjesečne vanjske temperature iznosi:

$$\theta_{e,amp} = \frac{(21,9 - 1,0)}{2} = 10,45 \text{ K}$$

Prema primjeru 6.2 je:

Ploština poda na tlu je: $A = 70 \text{ m}^2$.

Izloženi opseg poda je: $P = 34 \text{ m}$.

Karakteristična dimenzija poda, je: $B' = 4,118 \text{ m}$.

Toplinski otpor slojeva poda na tlu je: $R_f = 2,615 \text{ m}^2 \times \text{K/W}$.

Ekvivalentna debljina poda na tlu, je: $d_t = 6,05 \text{ m}$.

Koeficijent prolaska topline kroz pod i tlo između unutarnjeg i vanjskog zraka je: $U = 0,252 \text{ W/(m}^2 \times \text{K)}$

Stacionarni koeficijent prijenosa topline kroz tlo iznosi:

$$H_g = 70 \times 0,252 = 17,64 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Prema tablici 6.10, periodička dubina prodora je $\delta = 3,2 \text{ m}$.

Prema izrazu (6.122), koeficijent periodičkog prijenosa topline iznosi:

$$H_{pe} = 0,37 \times 34 \times 2,0 \times \ln \left(\frac{3,2}{6,05} + 1 \right)$$

$$H_{pe} = 10,68 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

Za $\tau = 1$ i $\beta = 1$ (tablica 6.11) toplinski tok za svaki mjesec, prema (6.119), je:

$$\phi_m = 17,64 \times (20 - 11,6) + 10,68 \times 10,45 \times \cos \left(6,284 \times \frac{(m - 1)}{12} \right)$$

$$\phi_m = 148,176 + 111,606 \times \cos \left(6,284 \times \frac{(m - 2)}{12} \right)$$

Rezultati proračuna mjesečnog toplinskog toka, ϕ_m , dani su u tablici 6.12.

Tablica 6.12 Mjesečni toplinski tokovi i izmijenjena toplota kroz pod na tlu

Mjesec	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Toplinski tok ϕ_m W	245	260	245	204	148	92	52	37	52	92	148	204
Broj sati	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
Q_m kW×h	182	175	182	147	110	66	39	28	37	68	107	152

6.12.3.17 Utjecaj tekuće podzemne vode

Učinak tekuće podzemne vode može se ocijeniti množenjem stacionarnog toplinskog toka faktorom G_w . Da bi se odredio taj faktor zahtjeva se poznavanje dubine ispod razine tla na kojoj se nalazi razina podzemne vode i poznavanje brzine njenog tečenja. Za podove na tlu i podruma koeficijent stacionarnog prijenosa topline za tlo, H_g , pomnoži se s G_w . Za uzdignute podove koeficijent prolaska topline, U_g , pomnoži se s faktorom G_w .

Vrijednosti faktora G_w dane su u tablici 6.13 kao funkcija bezdimenzijskih omjera z_w/B' , l_c/B' i d_t/B' , gdje je:

z_w dubina razine podzemne vode ispod razine tla, u m

l_c proračunska duljina kojom se povezuju toplinski tok vođenjem i toplinski tok uslijed podzemne vode, u m

Duljina l_c dana je izrazom:

$$I_c = \frac{\lambda}{(\rho_w \times c_w \times q_w)} \quad (6.140)$$

Ovdje je:

q_w srednja brzina kretanja podzemne vode, u m/s

ρ_w gustoća vode, u kg/m³

c_w specifični toplinski kapacitet vode, u J/(kg×K).

$\rho_w \times c_w = 4,18 \times 10^6$ J/(m³K) pri 10 °C.

Ako je $l_c \gg B'$ prevladava toplinski tok vođenjem, a ako je $l_c \ll B'$ prevladava toplinski tok podzemne vode.

Tablica 6.13 Vrijednosti faktora G_w

z_w / B'	l_c / B'	G_w		
		$d_t / B' = 0,1$	$d_t / B' = 0,5$	$d_t / B' = 1,0$
0,0	1,0	1,01	1,01	1,00
0,0	0,2	1,16	1,11	1,07
0,0	0,1	1,33	1,20	1,13
0,0	0,0	-	1,74	1,39
0,5	1,0	1,00	1,00	1,00
0,5	0,1	1,06	1,04	1,02
0,5	0,02	1,11	1,07	1,05
0,5	0,0	1,20	1,12	1,08
1,0	0,1	1,05	1,03	1,02
2,0	0,0	1,02	1,01	1,00

Utjecaj podzemne vode je za većinu slučajeva zanemariv. Za visoku razinu podzemne vode i veliku brzinu tečenja može se toplinski tok podzemnom vodom uzeti u obzir s faktorom G_w s kojim se množi stacionarni koeficijent prijenosa topline, kako je gore opisano.

6.12.3.18 Podovi na tlu s ugrađenim sustavom grijanja ili hlađenja

Toplinski tok iz poda s ugrađenim sustavom grijanja ili hlađenja čiji je toplinski izlaz jednoliko raspodijeljen može se proračunati u skladu s prethodno izloženim metodama uz slijedeće izmjene:

- unutarnju temperaturu θ_i treba zamijeniti prosječnom temperaturom u ravnini ugrađenog ogrjevnog odnosno rashladnog elementa, θ_h ,
- u proračun d_t treba uvrstiti samo toplinski otpor sloja ispod ugrađenog ogrjevnog / rashladnog elementa, debljinu zida i otpor vanjskog prijelaza topline.

Srednja temperatura u ravnini ugrađenog ogrjevnog ili rashladnog elementa može se procijeniti na jedan od niže opisanih načina.

- a) Ako je poznat prosječni ulazni toplinski tok u sustav podnog grijanja, Φ_h , (ili izlazni toplinski tok kod hlađenja), proračuna se toplinski tok kroz pod s temperaturom prostorije kao unutarnjom temperaturom i dobivena vrijednost se označi kao Φ_1 . Zatim se proračuna srednja temperatura u ravnini ogrjevnog / rashladnog elementa θ_h iz izraza:

$$\theta_h = \theta_i + R_i \times \frac{(\phi_h - \phi_1)}{A} \quad (6.141)$$

gdje je:

θ_i srednja temperatura prostorije, u °C,

R_i toplinski otpor slojeva između unutarnjeg prostora i ravnine ogrjevnog / rashladnog elementa, u m²×K/W,

A ploština poda, u m².

- b) Ako prosječni ulazni toplinski tok u sustav podnog grijanja (ili izlazni toplinski tok kod hlađenja) nije poznat, tada se iz proračuna toplinske bilance u prostoriji (ne uključujući toplinske gubitke kroz tlo) odredi neto potrebna toplina Φ_2 . Srednja temperatura u ravnini ogrjevnog / rashladnog elementa tada je

$$\theta_h = \theta_i + R_i \times \frac{\phi_2}{A} \quad (6.142)$$

6.12.3.19 Hladne komore (i klizališta)

Hladne komore su zgrade u kojima se unutarnja temperatura održava ispod 0 °C. Tlo ispod poda hladne komore treba zaštititi od smrzavanja. Zato se pod hladne komore toplinski izolira, a ispod sloja toplinske izolacije postavlja se sustav plošnog grijanja kako bi se osiguralo da će temperatura tla biti iznad 0 °C (uobičajena proračunska temperatura je 5 °C).

Proračuni dani u nastavku provode se uz pretpostavku konstantne temperature na površini tla, a mogu poslužiti za:

- dimenzioniranje ogrjevnih elemenata za zaštitu od smrzavanja tla
- dimenzioniranja uređaja za hlađenje
- određivanja godišnje potrošnje energije.

Ljeti se temperatura tla može povećati iznad proračunske vrijednosti, ali je taj utjecaj minimalan.

Prijenos topline nastaje od ogrjevnih elemenata kroz tlo na vanjski zrak i od ogrjevnih elemenata u hlađeni prostor.

Toplinski tok preko tla može se proračunati ranije opisanim metodama uz slijedeće izmjene:

- unutarnju temperaturu, θ_i , zamjeni se s proračunskom temperaturom površine tla (npr. 5 °C),
- u proračun d_i ulaze samo toplinski otpori slojeva ispod ogrjevnog elementa, debljina zida i otpor vanjskog prijelaza topline.

Toplinski tok, Φ_f , u W, od ogrjevnih elemenata u hlađeni prostor, dan je izrazom:

$$\phi_f = \frac{A \times (\theta_g - \theta_i)}{(R_{si} + R_i)} \quad (6.143)$$

gdje je:

θ_i srednja unutarnja temperatura u hladnoj komori, u °C,

θ_g srednja temperatura površine tla, u °C,

R_i toplinski otpor svih slojeva poda između ravnine ogrjevnih elemenata i unutarnje površine poda, u m²×K/W,

R_{si} otpor unutarnjeg prijelaza topline, u m²×K/W.

6.12.3.20 Toplinski tok kroz pod za pojedinačne prostorije

Ako je potrebno izračunati toplinski tok za pojedinačne prostorije u zgradi, u kojoj neke prostorije imaju vanjske zidove, a neke nemaju, tada se ukupni toplinski tok kroz pod podijeli na dva dijela: dio koji se odnosi na prostorije s vanjskim zidovima (rubno područje) i dio koji se odnosi na prostorije bez vanjskih zidova (središnje područje). Da bi se odredio ukupni toplinski tok pojedinih prostorija, treba dodati doprinos zidova i drugih elemenata.

Najprije se proračuna stacionarni toplinski tok za čitav pod na tlu, ϕ_t . Zatim se ta vrijednost podijeli na toplinski tok rubnog područja, ϕ_e , i središnjeg područja, ϕ_m , pomoću izraza:

$$\phi_e = \frac{\phi_t \times A_e}{\left[\frac{A_m \times (b + d_t)}{(0,5 \times B' + d_t)} + A_e \right]} \quad (6.144)$$

$$\phi_m = \phi_t - \phi_e \quad (6.145)$$

$$q_e = \frac{\phi_e}{A_e} \quad (6.146)$$

$$q_m = \frac{\phi_m}{A_m} \quad (6.147)$$

gdje je:

- q_e gustoća toplinskog toka za prostorije na rubu zgrade, u W/m^2 ,
- q_m gustoća toplinskog toka za prostorije u središtu zgrade, u W/m^2 ,
- A_e ukupna ploština poda prostorija na rubu zgrade, u m^2 ,
- A_m ukupna ploština poda prostorija u središtu zgrade, u m^2 ,
- b prosječna širina prostorija na rubu zgrade, u m,
- B' karakteristična dimenzija cijelog poda zgrade, prema izrazu (6.94), u m,
- d_t ekvivalentna debljina poda na tlu, u m.

Periodički prijenos topline zbog godišnje promjene vanjske temperature treba primijeniti samo na prostorije na rubu zgrade.

6.12.4 Koeficijent prijenosa topline transmisijom kroz nekondicionirane prostore

Budući da nekondicionirani prostor ima temperaturu različitu od temperature vanjskog prostora, koeficijent prijenosa topline transmisijom, H_U u W/K , između kondicioniranog prostora i vanjskog prostora kroz nekondicionirani prostor, određuje se izrazom:

$$H_U = H_{iu} \times b \quad (6.148)$$

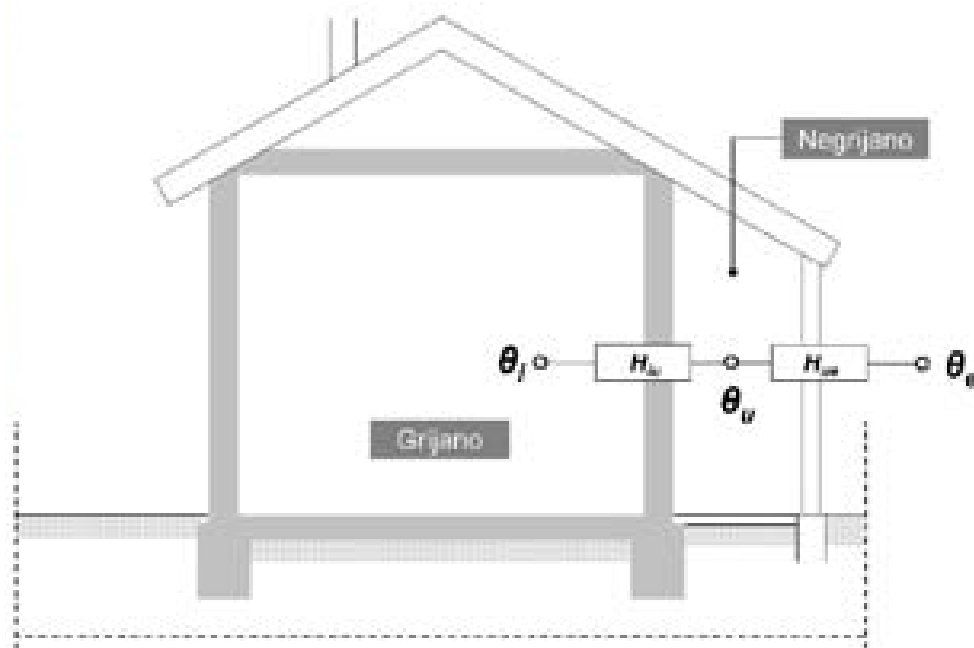
$$b = \frac{(\theta_i - \theta_u)}{(\theta_i - \theta_e)} = \frac{H_{ue}}{(H_{iu} + H_{ue})} \quad (6.149)$$

gdje je:

- θ_i temperatura kondicioniranog prostora, u $^{\circ}C$,
- θ_u temperatura nekondicioniranog prostora, u $^{\circ}C$,
- θ_e temperatura vanjskog zraka, u $^{\circ}C$,
- H_{iu} koeficijent izravnog prijenosa topline između kondicioniranog i nekondicioniranog prostora, u W/K ,
- H_{ue} koeficijent prijenosa topline između nekondicioniranog prostora i vanjskog okoliša, u W/K .

Faktor b u jednadžbi (6.148) omogućuje da nekondicionirani prostori imaju različitu temperaturu od vanjske temperature. U izrazu (6.149) nisu uzeti u obzir eventualni toplinski tokovi nastali u nekondicioniranom prostoru (npr. dobitci od Sunčevog zračenja). Oni se uzimaju posebno u obzir.

U koeficijentima H_{iu} i H_{ue} nije uključen prijenos topline preko tla.



Slika 6.26 Prijenos topline transmisijom kroz nekondicionirani prostor, s prikazom ekvivalentne električne mreže

Koeficijenti H_{iu} i H_{ue} uključuju prijenos topline transmisijom i ventilacijom, a računaju se pomoću izraza:

$$H_{iu} = H_{tr,iu} + H_{ve,iu} \quad (6.150)$$

$$H_{ue} = H_{tr,ue} + H_{ve,ue} \quad (6.151)$$

Koeficijenti prijenosa topline transmisijom, $H_{tr,ue}$ i $H_{tr,iu}$, proračunaju se u skladu s točkom 6.12.2, a koeficijenti prijenosa topline ventilacijom, $H_{ve,ue}$ i $H_{ve,iu}$, iz izraza:

$$H_{ve,iu} = \rho \times c_p \times q_{iu} \quad (6.152)$$

$$H_{ve,ue} = \rho \times c_p \times q_{ue} \quad (6.153)$$

gdje je:

ρ gustoća zraka, u kg/m^3 ,

c_p specifični toplinski kapacitet zraka, u $\text{Wh}/(\text{kg} \times \text{K})$,

q_{iu} protok zraka između kondicioniranog i nekondicioniranog prostora, u m^3/h ,

q_{ue} protok zraka između nekondicioniranog i vanjskog prostora, u m^3/h .

Pretpostavlja se da je $q_{iu} = 0$.

Protok zraka između negrijanog prostora i vanjskog okoliša proračunava se pomoću izraza:

$$q_{ue} = V_u \times n_{ue} \quad (6.154)$$

gdje je:

n_{ue} dogovoran broj izmjena zraka između nekondicioniranog prostora i vanjskog okoliša, u h^{-1} ,

V_u obujam zraka nekondicioniranog prostora, u m^3 .

Broj izmjena zraka, n_{ue} , jest vrijednost iz tablice 6.14, koja najbolje odgovara promatranom nekondicioniranom prostoru.

Tablica 6.14 Dogovoran broj izmjena zraka između nekondicioniranog prostora i vanjskog okoliša

Broj	Tip zrakonepropusnosti	n_{ue}, h^{-1}
1	Nema vrata ni prozora, svi spojevi građevnih dijelova dobro brtve, nema predviđenih ventilacijskih otvora	0,1
2	Svi spojevi građevnih dijelova dobro brtve, nema predviđenih ventilacijskih otvora	0,5
3	Svi spojevi građevnih dijelova dobro brtve, predviđeni su mali otvori za ventilaciju	1
4	Zrakopropustan prostor zbog nekih lokalnih otvorenih spojeva ili stalnih ventilacijskih otvora	3
5	Zrakopropustan prostor zbog brojnih otvorenih spojeva ili velikih i brojnih stalnih ventilacijskih otvora	10

Ako je poznata izmjena zraka pri 50 Pa, n_{50} , ili ekvivalentna ploština mjesta propuštanja zraka, A_I , broj izmjena zraka, n , može se procijeniti slijedećim empirijskim izrazima:

$$n = \frac{n_{50}}{20} \text{ ili } n = \frac{A_I}{(10 \times V_u)} \quad (6.155)$$

gdje je A_I u cm^2 , a V_u u m^3 .

Tada se za vrijednost n uzima vrijednost koja je najbliža vrijednosti n_{ue} iz tablice 6.14.

Dogovorna vrijednost za toplinski kapacitet zraka je $\rho \times c_p = 1200 \text{ J/(m}^3\text{K)}$ ili $0,33 \text{ Wh/(m}^3\text{K)}$.

Temperatura u nekondicioniranom prostoru

Bilanca topline u nekondicioniranom prostoru uz pretpostavku stacionarnih uvjeta dana je jednadžbom:

$$H_{iu} \times (\theta_i - \theta_u) + H_{ue} \times (\theta_e - \theta_u) + \phi = 0 \quad (6.156)$$

Rješenjem jednadžbe po θ_u dobije se:

$$\theta_u = \frac{(\phi + \theta_i \times H_{iu} + \theta_e \times H_{ue})}{(H_{iu} + H_{ue})} \quad (6.157)$$

gdje je:

θ temperatura, u $^{\circ}C$,

ϕ toplinski tok nastao u nekondicioniranom prostoru (npr. dobitci od Sunčevog zračenja),

H koeficijent prijenosa topline, u W/K .

Indeks i odnosi se na unutarnji prostor, indeks e na vanjski prostor, a indeks u na nekondicionirani prostor.

6.12.5 Koeficijent prijenosa topline transmisijom prema susjednim zgradama

Za temperaturu susjedne zgrade različitu od temperature promatrane zgrade, prijenos topline na susjednu zgradu je dan izrazom:

$$H_a = b \times H_{ia} \quad (6.158)$$

gdje je:

H_{ia} koeficijent izravnog prijenosa topline između kondicioniranog prostora i susjedne zgrade.

$$b = \frac{(\theta_i - \theta_a)}{(\theta_i - \theta_e)} \quad (6.159)$$

Ovdje je:

- θ_i unutarnja temperatura promatrane zgrade, u °C
- θ_a unutarnja temperatura susjedne zgrade, u °C
- θ_e vanjska temperatura, u °C.

Vrijednost b može biti i negativna.

6.13 Ukupni koeficijent prijenosa topline ventilacijom

Koeficijent prijenosa topline ventilacijom, H_{ve} , izražen u W/K, je toplinski tok prouzročen ulazom zraka u kondicionirani prostor infiltracijom ili ventilacijom, podijeljen razlikom temperatura unutarnjeg i dobavnog zraka. Za slučaj infiltracije temperatura dobavnog zraka je jednaka vanjskoj temperaturi.

Koeficijent prijenosa topline infiltracijom proračunava se pomoću izraza:

$$H_{ve} = \rho_a \times c_a \times q_{ve} \quad (6.160)$$

gdje je:

- $\rho_a \times c_a$ toplinski kapacitet zraka po obujmu. Ako je protok zraka, q_{ve} , izražen u m³/s, onda je $\rho_a \times c_a = 1200$ J/(m³×K), a ako je izražen u m³/h, onda je $\rho_a \times c_a = 0,33$ Wh/(m³×K),
- q_{ve} protok zraka kroz grijani ili hlađeni prostor, u m³/s ili m³/h. Proračunavamo ga u skladu s HRN EN 15242 [88].

Predznak koeficijenta H_{ve} uvijek je pozitivan. Dogovorno je predznak toplinskog toka pozitivan ako je temperatura dobavnog zraka niža od temperature unutrašnjeg zraka (gubitak topline).

Ukupni koeficijent prijenosa topline ventilacijom, prilagođen za razliku unutarnje i vanjske temperature, $H_{ve,adj}$, izražen u W/K, proračunava se iz pomoću izraza:

$$H_{ve,adj} = \rho_a \times c_a \times (\sum_k b_{ve,k} \times q_{ve,k,mn}) \quad (6.161)$$

gdje je:

- $\rho_a \times c_a$ toplinski kapacitet zraka po obujmu i iznosi 1200 J/(m³×K),
- $q_{ve,k,mn}$ protok zraka komponente protoka zraka k , vremenski usrednjen (za vremensko razdoblje od 24 sata), u m³/s,
- $b_{ve,k}$ faktor prilagodbe temperature za protok zraka komponente k . $b_{ve,k}$ je različit od jedan ako temperatura dobavnog zraka dovedenog u zonu zgrade, $\theta_{sup,k}$, nije jednaka temperaturi vanjskog zraka (npr. slučaj predgrijanja, predhlađenja ili povrata topline iz otpadnog zraka). Faktorom prilagodbe, $b_{ve,k}$, prilagođava se vrijednost koeficijenta prijenosa topline, $H_{ve,adj}$ umjesto razlike temperatura,
- k oznaka za svaku od relevantnih komponenata protoka zraka, kao što su infiltracija zraka, prirodna ventilacija, mehanička ventilacija,...

Vremenski usrednjen protok zraka komponente protoka zraka k , $q_{ve,k,mn}$, izražen u m³/s, proračunava se pomoću izraza:

$$q_{ve,k,mn} = f_{ve,t,k} \times q_{ve,k} \quad (6.162)$$

gdje je:

- $q_{ve,k}$ protok zraka komponente protoka zraka k za vrijeme njena rada određen prema poglavlju 5, izražen u m³/s
- $f_{ve,t,k}$ dio radnog vremena komponente protoka zraka k , proračunan kao udio broja sati rada po danu (za cijelo vrijeme rada je $f_{ve,t,k} = 24/24 = 1$; za 12 sati rada $f_{ve,t,k} = 12/24 = 0,5$)

Kod mjesečne i sezone metode proračuna, ako je grijanje / hlađenje prekinuto, učinak prekida uzima se u obzir faktorom smanjenja potrebne energije za grijanje / hlađenje s prekidom, a dio radnog vremena komponente protoka zraka proračunava se uz pretpostavku kontinuiranog grijanja / hlađenja, čime se zanemaruju dani sa smanjenim postavnim temperaturama ili isključenim grijanjem / hlađenjem.

U slučaju različitih uvjeta za grijanje i hlađenje, npr. različiti protoci zraka za ventilaciju ljeti i zimi, korištenje jedinice za povrat topline i pri prijelazu topline na susjedni ostakljeni prostor, moraju se koristiti odvojene vrijednosti ulaznih podataka za proračun koeficijenta H_{ve} .

Ventilacija i infiltracija zraka izvana

Za infiltraciju i ventilaciju zrakom iz vanjskog prostora, temperatura dobavnog zraka u zoni zgrade, $\theta_{sup,k}$, jednaka je temperaturi vanjskog zraka, θ_e . Stoga je faktor prilagodbe temperature, $b_{ve,k}$, za protok zraka iz vanjskog prostora

$$b_{ve,k} = 1 \quad (6.163)$$

Ventilacija i infiltracija zraka iz susjednih nekondicioniranih prostora

Za ventilaciju i infiltraciju zraka iz susjednih nekondicioniranih prostora, pretpostavlja se također da je temperatura dobavnog zraka, $\theta_{sup,k}$, jednaka temperaturi vanjskog zraka, θ_e , pa je i u tom slučaju

$$b_{ve,k} = 1 \quad (6.164)$$

Ventilacija iz susjednih ostakljenih prostora

Ako tijekom sezone grijanja komponenta protoka zraka ulazi u promatrani kondicionirani prostor preko susjednog ostakljenog prostora (zimski vrt, veranda,...), smije se za faktor prilagodbe temperature uzeti da je

$$b_{ve,k} = b_{tr,x} \quad (6.165)$$

gdje je $b_{tr,x}$ faktor prilagodbe temperature za transmisijski prijenos topline na susjedni ostakljeni prostor. Obično je vrijednost $b_{ve,k}$ različita za sezonu grijanja i hlađenja ili za pojedine mjesece.

Ventilacija i infiltracija zraka iz susjedne zgrade

Za ventilaciju i infiltraciju zraka iz susjedne zgrade, temperatura dobavnog zraka, $\theta_{sup,k}$, je temperatura zraka u susjednoj zgradi, a faktor prilagodbe temperature će iznositi

$$b_{ve,k} = \frac{\theta_{int,set} - \theta_{sup,k}}{\theta_{int,set} - \theta_e} \quad (6.166)$$

gdje je:

- $\theta_{int,set}$ postavna temperatura za promatranu zonu zgrade, za grijanje ili hlađenje, u °C,
- $\theta_{sup,k}$ temperatura dobavnog zraka, jednaka postavnoj temperaturi susjedne zgrade, za grijanje ili hlađenje, u °C,
- θ_e temperatura vanjskog zraka, u °C.

Proračun s više toplinski povezanih zona

Za proračun s više toplinski povezanih zona, temperatura dovedenog zraka ventilacijom i infiltracijom iz susjedne kondicionirane zone, $\theta_{sup,k}$, jednaka je stvarnoj temperaturi susjedne kondicionirane zone, proračunatoj u skladu s točkom 6.10.3.

Koeficijent prijenosa topline ventilacijom, $H_{ve,k}$, mora se osnivati na temperaturi dobavnog zraka, $\theta_{sup,k}$, na mjestu ulaza u zonu zgrade.

Jedinica povrata topline

Faktor prilagodbe temperature, $b_{ve,k}$, za protok zraka iz jedinice povrata topline mehaničkog sustava ventilacije, je

$$b_{ve,k} = (1 - f_{ve,frac,k} \times \eta_{hru}) \quad (6.167)$$

gdje je

η_{hru} korisnost jedinice povrata topline,

$f_{ve,frac,k}$ udio protoka promatrane komponente protoka zraka k koji prolazi kroz jedinicu povrata topline.

Ako je poznata temperatura dobavnog zraka iz jedinice povrata topline, $\theta_{sup,k}$, korisnost η_{hru} se može odrediti pomoću izraza

$$\eta_{hru} = \frac{(\theta_{sup,k} - \theta_e)}{(\theta_{int,set} - \theta_e)} \quad (6.168)$$

gdje je

$\theta_{sup,k}$ temperatura dobavnog zraka iz jedinice povrata topline, u °C,

$\theta_{int,set}$ postavna temperatura za zonu zgrade za grijanje ili hlađenje, u °C.

Ako postoje u nizu dva sustava za povrat topline, ukupna korisnost povrata topline, $\eta_{ve,k}$, dana je izrazom

$$\eta_{ve,k} = \eta_{ve,k1} + \eta_{ve,k2} - (\eta_{ve,k1} \times \eta_{ve,k2}) \quad (6.169)$$

gdje je

$\eta_{ve,k1}$ korisnost povrata topline sustava 1,

$\eta_{ve,k2}$ korisnost povrata topline sustava 2.

Centralno predgrijanje ili predhlađenje kod sustava mehaničke ventilacije

Ako temperatura dobavnog zraka kod sustava mehaničke ventilacije s centralnim predgrijanjem ili prethlađenjem nije regulirana unutarnjom temperaturom zone zgrade, tada se koeficijent prijenosa topline ventilacijom, $H_{ve,k}$, temelji na temperaturi dobavnog zraka, $\theta_{sup,k}$, na mjestu gdje zrak izlazi iz centralne jedinice za pripremu zraka i ulazi u zonu zgrade. U tom slučaju se faktor prilagodbe, $b_{ve,k}$, za zrak nakon centralnog predgrijanja ili predhlađenja proračuna prema izrazu:

$$b_{ve,k} = \frac{\theta_{int,set} - \theta_{sup,k}}{\theta_{int,set} - \theta_e} \quad (6.170)$$

gdje je:

$\theta_{int,set}$ postavna temperatura za promatranu zonu zgrade, za grijanje ili hlađenje, u °C,

$\theta_{sup,k}$ temperatura dobavnog zraka na mjestu ulaza zraka u zonu zgrade, u °C,

θ_e temperatura vanjskog zraka, u °C.

Utrošak energije za centralno predgrijanje ili prethlađenje (konačna energija), u gornjem slučaju, proračunava se kod proračuna potrebne energije za rad sustava ventilacije, dakle, odvojeno od utroška energije za grijanje / hlađenje zone zgrade. Potrebnu korisnu energiju za predgrijanje ili prethlađenje zraka za ventilaciju, $Q_{v,pre-heat}$ ili $Q_{v,pre-cool}$, izraženu u megadžulima, proračunamo iz razlike temperature vanjskog zraka i temperature dobavnog zraka nakon predgrijanje ili predhlađenje prema izrazima:

$$- \text{ za predgrijanje: } Q_{v,pre-heat} = \rho_a \times c_a \times f_{ve,t,k} \times q_{ve,k} \times (\theta_{sup,k} - \theta_e) \times t \quad (6.171)$$

$$- \text{ za predhlađenje: } Q_{v,pre-cool} = \rho_a \times c_a \times f_{ve,t,k} \times q_{ve,k} \times (\theta_e - \theta_{sup,k}) \times t \quad (6.172)$$

gdje je, za svaku zonu z i za svaki proračunski korak:

- $f_{ve,t,k}$ dio radnog vremena komponente protoka zraka k , proračunan kao dio broja sati po danu (za cijelo radno vrijeme $f_{ve,t,k} = 1$),
- $q_{ve,k}$ protok zraka komponente protoka zraka k koji je predgrijan ili predhlađen na mjestu ulaza zraka u zonu zgrade, na dobavnu temperaturu, $\theta_{sup,k}$, izražen u m^3/s ,
- θ_e temperatura vanjskog zraka, u $^{\circ}C$,
- $\theta_{sup,k}$ temperatura dobavnog zraka na mjestu ulaza zraka u zonu zgrade, nakon predgrijanja ili predhlađenja, u $^{\circ}C$,
- t trajanje proračunskog koraka, u megasekundama.

$\rho_a \times c_a = 1200 \text{ J/(m}^3 \times K\text{)}$ je toplinski kapacitet zraka po obujmu.

Kod mjesečne ili sezone metode, u slučaju prekida grijanja ili hlađenja, kada se učinak prekida uzima u obzir s faktorom smanjenja potrebne energije za grijanje ili hlađenje, dio vremena $f_{ve,t,k}$ proračunamo uz pretpostavku kontinuiranog grijanja ili hlađenja, zanemarujući dane sa sniženom postavnom temperaturom grijanja ili hlađenja ili njihovim potpunim isključenjem.

Ako osim predgrijanja i predhlađenja postoji i povrat topline, to se uzima u obzir zamjenom temperature vanjskog zraka, θ_e , s temperaturom zraka iz jedinice za povrat topline.

U slučaju kada sustav grijanja ili hlađenja koji opskrbljuje zonu zgrade također podmiruje i potrebnu korisnu energiju za predgrijanje ili predhlađenje, tada je potrebna korisna energija za centralno predgrijanje ili predhlađenje uključena u proračun potrebne korisne energije za grijanje ili hlađenje kao njen sastavni dio. U ovom slučaju unutarnja temperatura zone zgrade utječe na temperaturu dobavnog zraka preko sustava grijanja ili sustava hlađenja. Zato se ona ne može uzeti kao ulazni podatak za proračun bilance energije zgrade, jer je njena vrijednost ovisna o bilanci energije. Temperatura dobavnog zraka nije, dakle, ulazni već je izlazni podatak bilance energije. U ovom se slučaju koeficijent prijenosa topline, $H_{ve,k}$, mora temeljiti na temperaturi vanjskog zraka tj. $\theta_{sup,k} = \theta_e$, što znači da je

$$b_{ve,k} = 1.$$

6.14 Unutarnji toplinski dobitci

6.14.1 Općenito

Toplinski dobitci su toplina koja je nastala u kondicioniranom prostoru ili je ušla u taj prostor, a nije energija namjerno upotrijebljena za grijanje ili hlađenje prostora. Toplinski dobitci uključuju unutarnje toplinske dobitke i toplinske dobitke od Sunčeva zračenja. Ponori topline koji izvlače toplinu iz zgrade smatraju se dobitcima s negativnim predznakom. Za razliku od prijenosa topline, za izvor ili ponor topline razlika temperature promatranog prostora i temperature izvora / ponora nije prevladavajuća sila koja uzrokuje toplinski tok. U ljetnim uvjetima toplinski dobitci pozitivnog predznaka predstavljaju dodatno toplinsko opterećenje prostora.

Unutarnji toplinski dobitci su toplina koju u zgradi stvaraju korisnici (osjetilna toplina metabolizma) i uređaji (npr. kućanski uređaji, uredska oprema,...) ali ne i uređaji namjerno upotrijebljeni za grijanje i hlađenje prostora ili pripremu potrošne tople vode. Povratni toplinski gubitci tehničkih sustava promatraju se kao dio unutarnjih toplinskih dobitaka, osim ako su uzeti u obzir izravno kao smanjenje toplinskog gubitka sustava.

6.14.2 Ukupni unutarnji toplinski dobitci

Za mjesečnu i sezonsku metodu proračuna, ukupni toplinski dobitci iz unutarnjih toplinskih izvora u promatranoj zoni zgrade, za razmatrani mjesec ili sezonu, Q_{int} , u megadžulima, proračunavaju se prema jednadžbi:

$$Q_{int} = [\sum_k \Phi_{int,mn,k}] \times t + [\sum_l (1 - b_{tr,l}) \times \Phi_{int,mn,u,l}] \times t \quad (6.173)$$

gdje je:

- $b_{tr,l}$ faktor prilagodbe za susjedni nekondicionirani prostor s unutarnjim izvorom topline l (vidjeti točku 6.12.4),
 $\Phi_{int,mn,k}$ vremenski usrednjen toplinski tok iz unutarnjeg izvora topline k , u W,
 $\Phi_{int,mn,u,l}$ vremenski usrednjen toplinski tok iz unutarnjeg izvora topline l , u susjednom nekondicioniranom prostoru, u W,
 t trajanje razmatranog mjeseca ili sezone, u megasekundama.

Susjedni nekondicionirani prostor je nekondicionirani prostor izvan granica zone proračuna potrebne korisne energije za grijanje i hlađenje. Ako nekondicionirani prostor graniči s više kondicioniranih proračunskih zona, mora se vrijednost toplinskog toka unutarnjeg izvora topline l nekondicioniranog prostora, $\Phi_{int,mn,u,l}$, podijeliti na kondicionirane zone razmjerno plošinama podova kondicioniranih zona

U obzir se moraju uzeti toplinski dobitci iz slijedećih unutarnjih izvora topline k u promatranoj zoni zgrade ili izvori l u susjednom nekondicioniranom prostoru, izraženi u vatima:

- unutarnji dobitci topline od korisnika, $\Phi_{int,Oc}$, (toplina metabolizma korisnika),
- unutarnji toplinski tok (disipacija) od uređaja, $\Phi_{int,A}$,
- unutarnji toplinski tok (disipacija) od rasvjete, $\Phi_{int,L}$,
- unutarnji toplinski tok (disipacija ili apsorpcija) od sustava tople i hladne vode i odvodnje, $\Phi_{int,WA}$,
- unutarnji toplinski tok (disipacija ili apsorpcija) od sustava za grijanje, hlađenje i ventilaciju, $\Phi_{int,HVAC}$,
- unutarnji toplinski tok od procesa i dobara, $\Phi_{int,Proc}$.

Dio topline disipirane u tehničkom sustavu smije se vratiti u zgradu ili u sam sustav.

Hladni izvor koji odvodi toplinu iz zone zgrade mora se promatrati kao izvor s negativnom vrijednosti.

Ako značajniji izvor topline ima toplinski tok koji je prevladavajuća funkcija razlike temperatura izvora i unutarnjeg okoliša, toplinu iz tog izvora ne smije se zbrojiti s unutarnjim toplinskim dobitcima, nego se taj prijenos topline mora dodati prijenosu topline transmisijom na razini zone zgrade. Npr. izvor topline konstantne temperature 25 °C davati će veliku količinu topline unutarnjem prostoru ako je temperatura prostora 16 °C. Taj izvor neće davati nikakvu toplinu ako je temperatura prostora 25 °C, a odvoditi će toplinu ako je prostor zgrade na temperaturi višoj od 25 °C.

Na nacionalnoj se razini smije odlučiti o zanemarivanju toplinskog toka iz unutarnjih izvora topline u nekondicioniranom prostoru (osim ostakljenih prostora).

6.14.3 Unutarnji toplinski dobitci od korisnika i od uređaja

Na nacionalnoj se osnovi moraju odrediti satni i tjedni rasporedi toplinskog toka za toplinu nastalu metabolizmom korisnika, $\Phi_{int,Oc}$, i toplinu disipiranu uređajima, $\Phi_{int,A}$, kao funkcija uporabe zgrade, zauzetosti prostora i svrhe proračuna.

Ako nema obvezujućih nacionalnih odredbi, mogu se koristiti tablice 6.15, 6.16 i 6.17 u kojima su dani tipični režimi korištenja s pridruženim vrijednostima za različite unutarnje izvore topline.

Tablica 6.15 Toplinski tokovi od korisnika i uređaja – vrijednosti za stambene zgrade [100]

Dani	Sati	Stambene zgrade	
		Dnevni boravak i kuhinja $(\Phi_{\text{int,Oc}} + \Phi_{\text{int,A}}) / A_f$ W/m ²	Druge kondicionirane površine (npr. spavaće sobe) $(\Phi_{\text{int,Oc}} + \Phi_{\text{int,A}}) / A_f$ W/m ²
Ponedjeljak do petak	7,00 do 17,00	8,0	1,0
	17,00 do 23,00	20,0	1,0
	23,00 do 7,00	2,0	6,0
	Prosjek	9,0	2,67
Subota i nedjelja	7,00 do 17,00	8,0	2,0
	17,00 do 23,00	20,0	4,0
	23,00 do 7,00	2,0	6,0
	Prosjek	9,0	3,83
Tjedni prosjek		9,0	3,0

A_f je ploština kondicionirane površine poda, u m².

Tablica 6.16 Toplinski tokovi od korisnika i uređaja – vrijednosti za uredske zgrade [100]

Dani	Sati	Uredske zgrade	
		Uredski prostori (60% kondicionirane površine poda) $(\Phi_{\text{int,Oc}} + \Phi_{\text{int,A}}) / A_f$ W/m ²	Druge prostorije, predvorje, hodnici (40% kondicionirane površine poda) $(\Phi_{\text{int,Oc}} + \Phi_{\text{int,A}}) / A_f$ W/m ²
Ponedjeljak do petak	7,00 do 17,00	20,0	8,0
	17,00 do 23,00	2,0	1,0
	23,00 do 7,00	2,0	1,0
	Prosjek	9,5	3,92
Subota i nedjelja	7,00 do 17,00	2,0	1,0
	17,00 do 23,00	2,0	1,0
	23,00 do 7,00	2,0	1,0
	Prosjek	2,0	1,0
Tjedni prosjek		7,4	3,1

A_f je ploština kondicionirane površine poda, u m².

Tablica 6.17 Primjeri dogovornih ulaznih podataka vezanih na korištenje [100]

Ulazni podaci	Tip zgrade												Jedinica
	Obiteljske kuće	Višestambene zgrade	Uredske zgrade	Zgrade za obrazovanje	Bolnice	Restorani	Trgovine	Sportske zgrade	Dvorane za skupove	Industrijske zgrade	Trgovačke kuće	Zatvor, plivački bazeni	
Postavna temperatura zimi	20	20	20	20	22	20	20	18	20	18	18	28	°C
Postavna temperatura ljeti	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	28	°C
Ploština poda po osobi (korištenje)	60	40	20	10	30	5	10	20	5	20	100	20	m ² /osoba
Prosječni toplinski tok po osobi	70	70	80	70	80	100	90	100	80	100	100	60	W/osoba
Metabolički dobitak po ploštini kondicionirane površine poda	1,2	1,8	4,0	7,0	2,7	20,0	9,0	5,0	16,0	5,0	1,0	3,0	W/m ²
Vrijeme prisutnosti po danu (mjesečni prosjek)	12	12	6	4	16	3	4	6	3	6	6	4	h
Godišnja uporaba električne energije po ploštini kondicionirane površine poda ^a	20	30	20	10	30	30	30	10	20	20	6	60	kWh/m ²
Dio uporabe električne energije u kondicioniranom dijelu zgrade	0,7	0,7	0,9	0,9	0,7	0,7	0,8	0,9	0,8	0,9	0,9	0,7	-
Protok vanjskog zraka po ploštini kondicionirane površine poda ^a	0,7	0,7	0,7	0,7	1,0	1,2	0,7	0,7	1,0	0,7	0,3	0,7	m ³ /(h×m ²)
Protok vanjskog zraka po osobi	42	28	14	7	30	6	7	14	5	14	30	14	m ³ /(h ×osoba)
Potreba grijanja tople vode po ploštini kondicionirane površine poda ^a	10	20	10	10	30	60	10	80	10	10	1,4	80	kWh/m ²

^a Ove se brojke odnose na bruto ploštinu kondicionirane površine proračunanu sustavom vanjskih dimenzija

6.14.4 Toplina koju disipiraju ili apsorbiraju sustavi hladne i tople vode i odvodnje

Unutarnji toplinski tok zbog povratnih toplinskih gubitaka iz sustava hladne i tople vode i odvodnje, $\Phi_{\text{int,WA}}$ u W, zbroj je triju izraza prema slijedećim jednadžbama:

$$\Phi_{\text{int,WA}} = \Phi_{\text{int,W,circ}} + \Phi_{\text{int,W,other}} + \Phi_{\text{int,MSW}} \quad (6.174)$$

$$\Phi_{\text{int,W,circ}} = q_{\text{int,W,circ}} \times L_{\text{W,circ}} \quad (6.175)$$

gdje je:

$\Phi_{\text{int,W,circ}}$	unutarnji toplinski tok zbog povratnih gubitaka od stalnog ili vremenski kontroliranog sustava razvoda tople vode, u W,
$\Phi_{\text{int,W,other}}$	unutarnji toplinski tok zbog povratnih toplinskih gubitaka od sustava tople vode, osim razvoda tople vode, u W,
$\Phi_{\text{int,MSW}}$	unutarnji toplinski tok zbog povratnih toplinskih gubitaka od hladne vode i odvodnje, u W,
$q_{\text{int,W,circ}}$	unutarnji toplinski tok, vremenski usrednjen, od povratnih toplinskih gubitaka sustava razvoda tople vode po metru dužnom, u W/m,
$L_{\text{W,circ}}$	duljina cijevi sustava razvoda tople vode u promatranoj zoni zgrade, u m.

Toplinski tokovi $\Phi_{\text{int,W,other}}$ i $\Phi_{\text{int,MSW}}$ smiju se zanemariti.

6.14.5 Toplina koju disipiraju sustavi grijanja, hlađenja i ventilacije

Unutarnji toplinski tokovi zbog povratnih toplinskih gubitaka iz sustava grijanja, hlađenja i ventilacije, $\Phi_{\text{int,HVAC}}$, u W, zbroj je triju izraza:

$$\Phi_{\text{int,HVAC}} = \Phi_{\text{int,H}} + \Phi_{\text{int,C}} + \Phi_{\text{int,V}} \quad (6.176)$$

gdje je:

$\Phi_{\text{int,H}}$	unutarnji toplinski tok zbog povratnih toplinskih gubitaka iz sustava za grijanje prostora, u W,
$\Phi_{\text{int,C}}$	unutarnji toplinski tok zbog povratnih toplinskih gubitaka iz sustava za hlađenje prostora, u W,
$\Phi_{\text{int,V}}$	unutarnji toplinski tok zbog povratnih toplinskih gubitaka iz sustava za ventilaciju, u W.

Prije proračuna povratnih toplinskih gubitaka iz sustava za grijanje i hlađenje, treba proračunati potrebnu korisnu energiju za grijanje i hlađenje bez tih komponenti u unutarnjim toplinskim dobicima (vidjeti točku 6.10.2).

Vrijednost unutarnjeg toplinskog toka zbog povratnih toplinskih gubitaka iz sustava za grijanje prostora, $\Phi_{\text{int,H}}$, sastoji se od topline disipirane u promatranoj zoni zgrade, od izvora pomoćne energije (pumpe, ventilatori, elektronika,...) i topline disipirane podsustavima za predaju topline u prostor, razvod topline, pohranu topline i proizvodnju topline. Vrijednost se određuje metodama opisanim u poglavlju 7 kao prosječna vrijednost po mjesecu ili prosječna vrijednost za sezonu grijanja.

Vrijednost unutarnjeg toplinskog toka zbog povratnih toplinskih gubitaka iz sustava za hlađenje prostora, $\Phi_{\text{int,C}}$, sastoji se od topline disipirane u promatranoj zoni zgrade, od izvora pomoćne energije (pumpe, ventilatori, elektronika,...) i topline disipirane podsustavima za predaju rashladne energije u prostor, razvod rashladne energije, pohranu rashladne energije i proizvodnju rashladne energije. Vrijednost se određuje metodama opisanim u poglavlju 7 kao prosječna vrijednost po mjesecu ili prosječna vrijednost za sezonu grijanja.

Vrijednost unutarnjeg toplinskog toka zbog povratnih toplinskih gubitaka iz sustava za ventilaciju prostora, $\Phi_{\text{int,V}}$, sastoji se od topline sustava za ventilaciju disipirane u promatranoj zoni zgrade, od izvora pomoćne energije i propuštanja kanala s ventiliranim zrakom. Vrijednost se određuje metodama opisanim u poglavlju 7 kao prosječna vrijednost po mjesecu ili prosječna vrijednost za sezonu grijanja.

6.14.6 Toplina iz procesa i dobara

Vrijednost unutarnjeg toplinskog toka zbog povratnih gubitaka iz procesa i dobara, $\Phi_{\text{int,PROC}}$, sastoji se od topline određenih procesa i / ili pohranjenih dobara u promatranoj zoni zgrade. Vrijednosti se određuju na nacionalnoj razini ovisno o uporabi zgrade i svrsi proračuna.

6.15 Toplinski dobitci od Sunčevog zračenja

6.15.1 Uvod

Ukupno Sunčevo zračenje na površinu Zemlje, za vedrog neba, iznosi oko 1000 W/m². Dio tog Sunčevog zračenja može se pasivno koristiti kao toplinski dobitak zgrade, preko:

- transparentnih površina u toplinskoj ovojnici zgrade (npr. prozori),
- negrijanih ostakljenih prostora (zimskih vrtova) smještenih uz zgradu,
- neprozirnih vanjskih građevnih dijelova zgrade,
- transparentne toplinske izolacije ovojnice zgrade.

Vrijednost Sunčevih toplinskih dobitaka ovisna je o:

- lokaciji i orijentaciji površine koja prima Sunčevo zračenje,
- nagibu prijemne površine prema horizontalnoj ravnini,
- efektivnoj sabirnoj ploštini površine koja prima Sunčevo zračenje.

Kod zgrade koja je optimalno orijentirana u odnosu na Sunčeve toplinske dobitke može se znatno smanjiti potrošnja energije za grijanje prostora zgrade. Pretežni dio Sunčeva zračenja koje kroz ostakljenu plohu prodire u prostoriju apsorbiraju građevni dijelovi koji ograđuju prostor i ono se pretvara u dugovalno toplinsko zračenje. Staklo nije propusno za dugovalno toplinsko zračenje pa toplina ostaje zarobljena u prostoriji povećavajući njenu temperaturu. Ta pojava se zimi te u proljeće i jesen koristi za smanjenje potrebne energije za grijanje prostorije, ali ljeti, ona teži ka neželjenom pregrijavanju prostorije, što je potrebno ograničiti pomoću odgovarajućih mjera zaštite ostakljenih površina od Sunčeva zračenja tijekom ljeta.

6.15.2 Proračunski postupak

Za mjesečnu i sezonsku metodu, zbroj toplinskih dobitaka od Sunčevih izvora u promatranoj zoni zgrade, za promatrani mjesec ili sezonu, Q_{sol} , u MJ, proračunava se pomoću izraza:

$$Q_{\text{sol}} = [\sum_k \Phi_{\text{sol,mn,k}}] \times t + [\sum_l (1 - b_{\text{tr,l}}) \times \Phi_{\text{sol,mn,u,l}}] \times t \quad (6.177)$$

gdje je:

$b_{\text{tr,l}}$	faktor prilagodbe za susjedni nekondicionirani prostor s unutarnjim izvorom topline / (vidjeti točku 6.12.4),
$\Phi_{\text{sol,mn,k}}$	vremenski usrednjen toplinski tok iz Sunčevog izvora topline k , u W,
$\Phi_{\text{sol,mn,u,l}}$	vremenski usrednjen toplinski tok iz Sunčevog izvora topline l , u susjednom nekondicioniranom prostoru, u W,
t	trajanje razmatranog mjeseca ili sezone, u megasekundama.

Susjedni nekondicionirani prostor je nekondicionirani prostor izvan granica zone za koju se proračunava potrebna korisna energija za grijanje i hlađenje. Ako nekondicionirani prostor graniči s više kondicioniranih proračunskih zona, mora se vrijednost toplinskog toka Sunčevog izvora topline nekondicioniranog prostora, $\Phi_{\text{sol,mn,u,l}}$, podijeliti na kondicionirane zone razmjerno plošinama podova kondicioniranih zona

Toplinski dobitci od Sunčevih izvora topline rezultat su Sunčeva zračenja dostupnog na promatranoj lokaciji, orijentaciji sabirnih površina, stalnim i pomičnim sjenilima, prolasku i apsorpciji Sunčeva zračenja i toplinskim karakteristikama prijenosa topline sabirnih površina. Koeficijent koji uključuje karakteristike i ploštinu sabirne površine, uključivo i utjecaj elemenata za zaštitu od sunca (sjenila), nazivamo **efektivna sunčana sabirna ploština**.

6.15.3 Toplinski tok Sunčevih dobitaka preko građevnog dijela zgrade

Toplinski tok Sunčevih dobitaka preko građevnog dijela zgrade k , $\Phi_{\text{sol},k}$ u W, dan je izrazom:

$$\Phi_{\text{sol},k} = F_{\text{sh},\text{ob},k} \times A_{\text{sol},k} \times I_{\text{sol},k} - F_{\text{r},k} \times \Phi_{\text{r},k} \quad (6.178)$$

gdje je:

$F_{\text{sh},\text{ob},k}$	faktor smanjenja za efektivnu sunčanu sabirnu ploštinu površine k , zbog osjenjenja vanjskim preprekama, određen u skladu s točkom 6.15.7,
$A_{\text{sol},k}$	efektivna sabirna ploština površine k dane orijentacije i kuta nagiba, u promatranoj zoni ili prostoru, u m^2 , određena u skladu s točkom 6.15.4 (za ostakljene površine) i točkom 6.15.8 (za neprozirne građevne dijelove),
$I_{\text{sol},k}$	srednja energija Sunčevog zračenja u vremenskom koraku proračuna (za jedan mjesec) po metru kvadratnom sabirne ploštine površine k , za danu orijentaciju i kut nagiba, u W/m^2 ,
$F_{\text{r},k}$	faktor oblika između građevnog dijela zgrade i neba,
$\Phi_{\text{r},k}$	izvanredni toplinski tok zbog toplinskog zračenja prema nebu iz građevnog dijela zgrade k , u W, određen u skladu s točkom 6.15.9.

Efektivna sunčana sabirna ploština, A_{sol} , jednaka je ploštini crnog tijela koje ima isti Sunčev toplinski dobitak kao promatrana površina.

Vrijednosti faktora oblika za zračenje između građevnog dijela zgrade i neba su:

$F_{\text{r}} = 1$ za horizontalne krovove bez elemenata za zaštitu od sunca (sjenila),

$F_{\text{r}} = 0,5$ za vertikalne zidove bez elemenata za zaštitu od sunca (sjenila).

6.15.4 Efektivna sunčana sabirna ploština za ostakljene (prozirne) građevne dijelove

Efektivna sunčana sabirna ploština ostakljenih građevnih dijelova ovojnice zgrade (npr. prozora), A_{sol} u m^2 , dana je izrazom:

$$A_{\text{sol}} = F_{\text{sh},\text{gl}} \times g_{\text{gl}} \times (1 - F_{\text{F}}) \times A_{\text{w},\text{p}} \quad (6.179)$$

gdje je:

$F_{\text{sh},\text{gl}}$	faktor smanjenja za pomične elemente za zaštitu od Sunčeva zračenja (pomična sjenila),
g_{gl}	prolazak ukupne Sunčeve energije kroz prozirni dio građevnog dijela zgrade, određen u skladu s točkom 6.15.5
F_{F}	udio ploštine okvira tj. omjer ploštine projiciranog okvira i ukupne ploštine projiciranog ostakljenog građevnog dijela na ravninu paralelnu s površinom stakla,
$A_{\text{w},\text{p}}$	ukupna ploština projiciranog ostakljenog građevnog dijela (npr. ploština prozora) na ravninu paralelnu s površinom stakla, u m^2 .

6.15.5 Prolazak Sunčeve energije kroz ostakljene (prozirne) građevne dijelove

Ukupni prolazak Sunčeve energije, g_{gl} , u jednadžbi (6.178) je vremenski usrednjen omjer energije koja prolazi kroz prozirni građevni dio i upadne sunčeve energije.

Za ostakljene (prozirne) građevne dijelove ovojnice zgrade, prolazak Sunčeve energije, za zračenje okomito na ostakljenje, $g_{\text{gl},\text{n}}$, mora se proračunati prema odgovarajućoj normi o optičkim svojstvima višestrukog ostakljenja (HRN EN 410 [105] i HRN EN 13363-2 [106]).

U tablici 6.18 dane su tipične vrijednosti za ukupni prolazak Sunčeve energije pri okomitom upadu, $g_{\text{gl},\text{n}}$, uz pretpostavku čiste površine.

Tablica 6.18 Tipične vrijednosti ukupnog prolaska sunčeve energije pri okomitom upadu

Tip ostakljenja	$g_{gl,n}$
Jednostruko ostakljenje	0,85
Dvostruko ostakljenje	0,75
Dvostruko ostakljenje sa selektivnim nanosom male emitivnosti (Low-E)	0,67
Trostruko ostakljenje	0,7
Trostruko ostakljenje s dva selektivna nanosa male emitivnosti (Low-E)	0,5
Dvostruki prozor	0,75

S obzirom da je vrijednost vremenski usrednjenog prolaska ukupne Sunčeve energije nešto manja od $g_{gl,n}$, koristi se popravni faktor za staklo, F_w , pa je:

$$g_{gl} = F_w \times g_{gl,n} \quad (6.180)$$

Ako nije propisano na nacionalnoj razini, vrijednost popravnog faktora je $F_w = 0,90$.

Za ostakljene površine s uređajima za zaštitu od Sunčeva zračenja, vremenski usrednjen prolazak ukupne Sunčeve energije proračunava se u skladu s ponderiranim zbrojem prema slijedećem izrazu:

$$g_{gl} = a_{gl} \times g_{gl,alt} + (1 - a_{gl}) \times g_{gl,dif} \quad (6.181)$$

gdje je:

a_{gl} faktor ponderiranja, koji je reprezentativan za položaj (orijentaciju, nagib) ostakljene plohe, klimu i sezonu,

$g_{gl,alt}$ prolazak Sunčeve energije za Sunčevo zračenje pod kutom u vertikalnoj ravnini, alt_{gl} , koja je reprezentativna za položaj (orijentaciju, nagib) ostakljene plohe, klimu i sezonu,

$g_{gl,dif}$ prolazak Sunčeve energije za izotropno difuzno Sunčevo zračenje.

Ako prozor ima kapke /zaklopce (zaslone) s pomičnim dijelovima, prolazak Sunčeve energije mora se proračunati s kopcima (zaslonima) koji su u takvom položaju da je izravno Sunčevo zračenje pod kutom alt_{gl} spriječeno, ali uz najveći mogući prolazak svijetla i pogled kroz prozor.

Vrijednosti a_{gl} i alt_{gl} načelno su ovisne o geografskoj širini, klimi, sezoni i orijentaciji.

U nedostatku nacionalnih vrijednosti moraju se koristiti slijedeće vrijednosti:

$$a_{gl} = 0,75 \text{ i } alt_{gl} = 45^\circ \quad (6.182)$$

Primjer 6.7:

Tipične vrijednosti za dvostruko ostakljenje s vanjskim bijelim venecijanerima, s pomičnim dijelovima pod kutem 45° , čime je spriječeno izravno Sunčevo zračenje, su:

$$\begin{aligned} g_{gl,45} &= 0,045 & g_{gl,dif} &= 0,196 \text{ i odatle} \\ g_{gl} &= 0,75 \times 0,045 + (1 - 0,75) \times 0,169 \\ g_{gl} &= 0,083 \end{aligned}$$

Zavjese postavljene „stalno“ (znači i tijekom dana) s unutarnje ili vanjske strane prozora smanjuju prolazak Sunčevog zračenja (vidjeti tablicu 6.19). Faktori iz tablice 6.19 množe se s ukupnim prolaskom Sunčeve energije kroz ostakljenje, kako bi se dobio faktor g_{gl} ostakljenja sa stalnom zavjesom.

Tablica 6.20 Faktori smanjenja za neke tipove zavjesa

Tip zavjese	Optička svojstva zavjese		Faktor smanjenja za zavjesu	
	apsorpcija	transmisija	iznutra	izvana
Bijeli venecijaneri	0,1	0,05	0,25	0,10
		0,1	0,30	0,15
		0,3	0,45	0,35
Bijele zavjese	0,1	0,5	0,65	0,55
		0,7	0,80	0,75
		0,9	0,95	0,95
Obojeni tekstil	0,3	0,1	0,42	0,17
		0,3	0,57	0,37
		0,5	0,77	0,57
Tekstili presvućeni aluminijem	0,2	0,05	0,20	0,08

U razdoblju grijanja pomične zavjese i pomični elementi za zaštitu od sunčeva zračenja uzimaju se u obzir u faktoru iskorištenja, η .

6.15.6 Pomični elementi za zaštitu od Sunčeva zračenja (pomična sjenila)

Pomični elementi za zaštitu od Sunčeva zračenja (pomična sjenila) mogu se uključivati ručno, motorno ili potpuno automatski.

Za mjesečnu i sezonsku metodu, faktor smanjenja za pomične elemente za zaštitu od Sunčeva zračenja (pomična sjenila), $F_{sh,gl}$, određuje se prema izrazu:

$$F_{sh,gl} = \frac{(1 - f_{sh,with}) \times g_{gl} + f_{sh,with} \times g_{gl+sh}}{g_{gl}} \quad (6.183)$$

gdje je:

- g_{gl} ukupni prolazak Sunčeve energije za prozor kad zaštita od Sunčeva zračenja nije u uporabi,
- g_{gl+sh} ukupni prolazak Sunčeve energije za prozor kad je zaštita od Sunčevog zračenja u uporabi,
- $f_{sh,with}$ udio vremena s pomičnom zaštitom od Sunčeva zračenja u uporabi, npr. dan kao funkcija intenziteta upadnog Sunčevog zračenja (zavisnog o klimi, sezoni i orijentaciji).

Ako na nacionalnoj razini nije drugačije definirano, zaštitu od Sunčeva zračenja mora se uzeti uključenom ako intenzitet Sunčevog zračenja na površinu u danim satima premašuje 300 W/m^2 , a isključenom ako su satne vrijednosti zračenja niže.

Udio vremena tijekom kojeg je zaštita od Sunčeva zračenja u uporabi zavisi o klimi i sezoni ili mjesecu. Za svaku se klimu može izraditi tablica s vrijednostima $f_{sh,with}$ za različite orijentacije i kutove nagiba prozora. Takva tablica može sadržavati vrijednosti po mjesecima ili jednu prosječnu vrijednost za sezonu grijanja ili hlađenja koja se rabi za svaki mjesec. Primjer je

dan u tablici 6.20. Vrijednosti su izvedene kao zbroj satnih vrijednosti intenziteta upadnog sunčevog zračenja za sve sate u mjesecu u kojima je intenzitet veći od 300 W/m² podijeljenih zbrojem satnih vrijednosti intenziteta upadnog sunčevog zračenja za sve sate u mjesecu, ili:

$$f_{\text{sh,with}} = \frac{I_{\text{sol}, > 300 \text{ W}}}{I_{\text{sol}}} \quad (6.184)$$

gdje je I_{sol} srednji mjesečni intenzitet sunčevog zračenja u W/m².

Tablica 6.20 Primjer tablice za faktor $f_{\text{sh,with}}$ – udio vremena s pomičnim elementima za zaštitu od Sunčeva zračenja u uporabi, za grad Zagreb, [107]

Mjesec	Strana svijeta							
	N	E	S	W	NI	NW	SE	SW
I	0,00	0,29	0,75	0,33	0,00	0,00	0,67	0,69
II	0,00	0,38	0,72	0,37	0,00	0,00	0,69	0,66
III	0,00	0,44	0,66	0,41	0,06	0,06	0,63	0,60
IV	0,00	0,53	0,65	0,51	0,17	0,19	0,65	0,62
V	0,00	0,51	0,55	0,51	0,28	0,28	0,60	0,57
VI	0,00	0,56	0,50	0,51	0,32	0,34	0,55	0,53
VII	0,00	0,55	0,62	0,57	0,29	0,33	0,62	0,64
VIII	0,00	0,58	0,72	0,62	0,28	0,25	0,70	0,71
IX	0,00	0,57	0,76	0,54	0,10	0,11	0,72	0,73
X	0,00	0,48	0,71	0,40	0,00	0,00	0,68	0,65
XI	0,00	0,20	0,71	0,20	0,00	0,00	0,61	0,67
XII	0,00	0,14	0,62	0,26	0,00	0,00	0,49	0,55

Kod prekida grijanja ili hlađenja, kad je učinak prekida uzet u obzir faktorom smanjenja potrebne energije za grijanje ili hlađenje, ponderirani udio vremena se mora proračunati uz pretpostavku kontinuiranog grijanja ili hlađenja.

6.15.7 Faktori smanjenja zbog vanjskih sjenila

Faktor smanjenja, $F_{\text{sh,ob}}$, čija je vrijednost u rasponu od 0 do 1, predstavlja smanjenje upadnog sunčevog zračenja zbog stalnog osjenjenja promatrane površine, kao posljedice:

- drugih zgrada,
- topografije (brda, drveća,...),
- prijepusta na zgradi (horizontalni i vertikalni istaci),
- drugih dijelova iste zgrade.

Faktor smanjenja zbog vanjskih sjenila definiran je omjerom:

$$F_{\text{sh,ob}} = \frac{I_{\text{sol,ps,mean}}}{I_{\text{sol,mean}}} \quad (6.185)$$

gdje je:

$I_{sol,ps,mean}$ srednje Sunčevo zračenje koje stvarno prima sabirna ravnina zaštićena od Sunčeva zračenja s vanjskim preprekama tijekom promatrane sezone grijanja odnosno hlađenja, u W/m^2 ,
 $I_{sol,mean}$ srednje Sunčevo zračenje koje stvarno prima sabirna ravnina bez vanjskih sjenila (prepreka), u W/m^2 .

Prepreke sprječavaju izravno Sunčevo zračenje, a difuzno zračenje i zračenje reflektirano od tla ostaju nepromijenjeni.

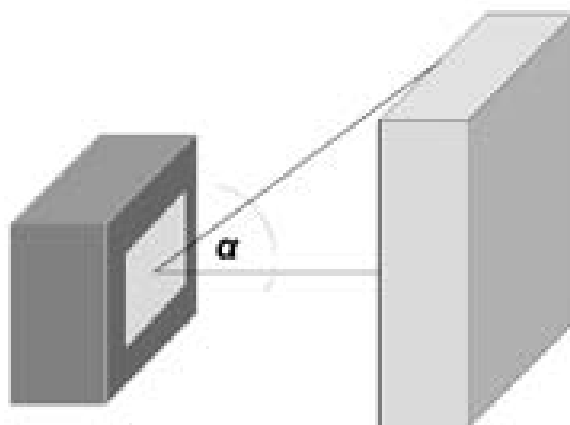
Faktor smanjenja zbog vanjskih prepreka, $F_{sh,ob}$, može se proračunati iz izraza:

$$F_{sh,ob} = F_{hor} \times F_{ov} \times F_{fin} \quad (6.186)$$

gdje je:

F_{hor} parcijalni faktor smanjenja zbog sjenila za horizont,
 F_{ov} parcijalni faktor smanjenja zbog sjenila za horizontalne istake,
 F_{fin} parcijalni faktor smanjenja zbog sjenila za vertikalne istake.

Učinak osjenjenja za horizont (npr. zbog tla, drveća ili drugih zgrada) zavisi o kutu horizonta, geografskoj širini, orijentaciji, lokalnoj klimi i sezoni grijanja. U tablici 6.21 dani su faktori smanjenja za sezonu grijanja, za tri geografske širine i četiri orijentacije prozora. Za druge geografske širine i orijentacije, vrijednosti se mogu interpolirati. Kut horizonta je prosječni kut nad horizontom za promatrano pročelje zgrade (vidjeti sliku 6.27).

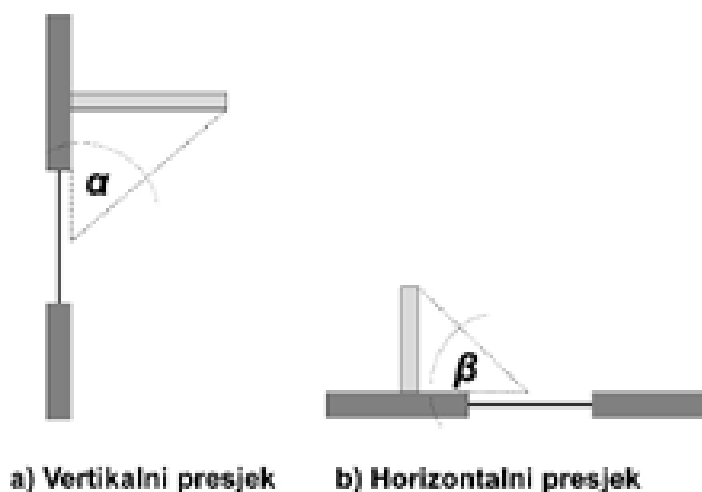


Slika 6.27 Kut horizonta, α

Tablica 6.21 Parcijalni faktori smanjenja zbog sjenila za horizont

Kut horizonta	Geografska širina 45° N			Geografska širina 55° N			Geografska širina 65° N		
	S	E/W	N	S	E/W	N	S	E/W	N
0°	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
10°	0,97	0,95	1,00	0,94	0,92	0,99	0,86	0,89	0,97
20°	0,85	0,82	0,98	0,68	0,75	0,95	0,58	0,68	0,93
30°	0,62	0,70	0,94	0,49	0,62	0,92	0,41	0,54	0,89
40°	0,46	0,61	0,90	0,40	0,56	0,89	0,29	0,49	0,85

Parcijalni faktori smanjenja zbog sjenila za horizontalne i vertikalne istake (vidjeti sliku 6.28) dani su u tablicama 6.22 i 6.23.



Slika 6.28 Horizontalni i vertikalni istaci: α je kut horizontalnog istaka, β je kut vertikalnog istaka

Tablica 6.22 Parcijalni faktori smanjenja zbog sjenila za horizontalne istake, F_{ov}

Kut horizontalnog istaka	Geografska širina 45° N			Geografska širina 55° N			Geografska širina 65° N		
	S	E/W	N	S	E/W	N	S	E/W	N
0°	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
30°	0,90	0,89	0,91	0,93	0,91	0,91	0,95	0,92	0,90
45°	0,74	0,76	0,80	0,80	0,79	0,80	0,85	0,81	0,80
60°	0,50	0,58	0,66	0,60	0,61	0,65	0,66	0,65	0,66

Tablica 6.23 Parcijalni faktori smanjenja zbog sjenila za vertikalne istake, F_{fin} (vertikalna istaka s jedne strane)

Kut vertikalnog istaka	Geografska širina 45° N			Geografska širina 55° N			Geografska širina 65° N		
	S	E/W	N	S	E/W	N	S	E/W	N
0°	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
30°	0,94	0,92	1,00	0,94	0,91	0,99	0,94	0,90	0,98
45°	0,84	0,84	1,00	0,86	0,83	0,99	0,85	0,82	0,98
60°	0,72	0,75	1,00	0,74	0,75	0,99	0,73	0,73	0,98

Za prozore okrenute prema jugu s vertikalnim istacima s obje strane, za dane geografske širine, moraju se pomnožiti dva faktora smanjenja zbog sjenila.

Za prozore okrenute istoku i zapadu faktor smanjenja zbog sjenila vrijedi za vertikalne istake na južnom kraju prozora. Za prozore okrenute sjeveru, za vertikalne istake nema faktora smanjenja zbog zaštite od Sunca.

6.15.8 Efektivna sunčana sabirna ploština za neprozirne građevne dijelove

Neto Sunčevi toplinski dobitci neprozirnih građevnih dijelova zgrade bez prozirne obloge ili prozirne toplinske izolacije, tijekom sezone grijanja, mogu biti samo mali dio ukupnih Sunčevih toplinskih dobitaka i djelomično su kompenzirani gubitcima zračenjem zgrade prema vedrom nebu. Međutim, za tamne, slabo toplinski izolirane površine ili za površine velike ploštine okrenute prema nebu, Sunčevi toplinski dobitci kroz neprozirne građevne dijelove mogu postati značajni.

Sunčevi toplinski dobitci kroz neprozirne građevne dijelove zgrade, mogu imati značajan utjecaj za ljetno hlađenje ili proračun ljetne toplinske ugodnosti.

Efektivna sunčana sabirna ploština neprozirnog dijela ovojnice zgrade, A_{sol} u m^2 , dana je izrazom:

$$A_{sol} = \alpha_{S,c} \times R_{se} \times U_c \times A_c \quad (6.187)$$

gdje je:

$\alpha_{S,c}$ koeficijent apsorpcije Sunčevog zračenja od strane površine neprozirnog građevnog dijela,

R_{se} vanjski otpor prijelaza topline, prema tablici 4.3, u $m^2 \times K/W$,

U_c koeficijent prolaska topline neprozirnog građevnog dijela, određen prema poglavlju 4, u $W/(m^2 \times K)$,

A_c ploština projiciranog neprozirnog građevnog dijela, u m^2 .

Koeficijent apsorpcije Sunčevog zračenja od strane površine neprozirnog građevnog dijela može se odabrati iz tablice 6.24.

Tablica 6.24 Koeficijent apsorpcije Sunčevog zračenja različitih površina, prema DIN V 18599-2 [108]

Površina građevnog dijela zgrade	$\alpha_{S,c}$
Površina zidova:	
- svijetle boje	0,4
- zagasite boje	0,6
- tamne boje	0,8
Zid od klinker opeke	0,8
Zid od svijetle fasadne opeke	0,6
Krovovi:	
- crveni crijep	0,6
- tamna površina	0,8
- metal visokog sjaja	0,2
- bitumenska traka (posuta pijeskom)	0,6

6.15.9 Toplinsko zračenje prema nebu

Izvanredni toplinski tok zbog toplinskog zračenja prema nebu za određeni građevni dio ovojnice zgrade, Φ_r , u W, dan je jednadžbom:

$$\Phi_r = R_{se} \times U_c \times A_c \times h_r \times \Delta\theta_{er} \quad (6.188)$$

gdje je:

R_{se}	vanjski otpor prijelaza topline, prema tablici 4.3, u $m^2 \times K/W$,
U_c	koeficijent prolaska topline građevnog dijela, određen prema poglavlju 4, u $W/(m^2 \times K)$,
A_c	ploština projiciranog građevnog dijela, u m^2 ,
h_r	koeficijent vanjskog prijelaza topline zračenjem, u $W/(m^2 \times K)$,
$\Delta\theta_{er}$	prosječna razlika temperature vanjskog zraka i prividne temperature neba, u $^\circ C$.

Koeficijent vanjskog prijelaza topline zračenjem, h_r u $W/(m^2 \times K)$, može se približno odrediti iz izraza:

$$h_r = 4 \times \varepsilon \times \sigma \times (\theta_{ss} + 273)^3 \quad (6.189)$$

gdje je:

ε	emisivnost toplinskog zračenja vanjske površine,
σ	Stefan-Bolzmanna konstanta: $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W/(m^2 \times K^4)$,
θ_{ss}	aritmetički prosjek temperature na površini i temperature neba, u $^\circ C$.

U prvoj aproksimaciji može se uzeti da je h_r jednak $5 \times \varepsilon W/(m^2 \times K)$ što odgovara prosječnoj temperaturi od $\theta_{ss} = 10^\circ C$.

Ako iz klimatskih podataka nije dostupna temperatura neba, uzima se da prosječna razlika, $\Delta\theta_{er}$, temperature vanjskog zraka i temperature neba, iznosi 11 K.

6.15.10 Sunčevi toplinski dobitci nekondicioniranih osunčanih ostakljenih prostora (zimskih vrtova)

U nastavku su dani postupci proračuna prijenosa topline i Sunčevih toplinskih dobitaka za nekondicionirane osunčane ostakljene prostore (zimske vrtove, verande i sl.) koji graniče s kondicioniranim prostorom. Ako je osunčan ostakljeni prostor grijan, ili ako između kondicioniranog prostora i osunčanog ostakljenog prostora postoji stalni otvor, tada osunčani ostakljeni prostor treba promatrati kao dio kondicioniranog prostora. Tada je ploština koja se uzima u obzir za prijenos topline i Sunčeve toplinske dobitke jednaka ploštini vanjske ovojnice osunčanog ostakljenog prostora.

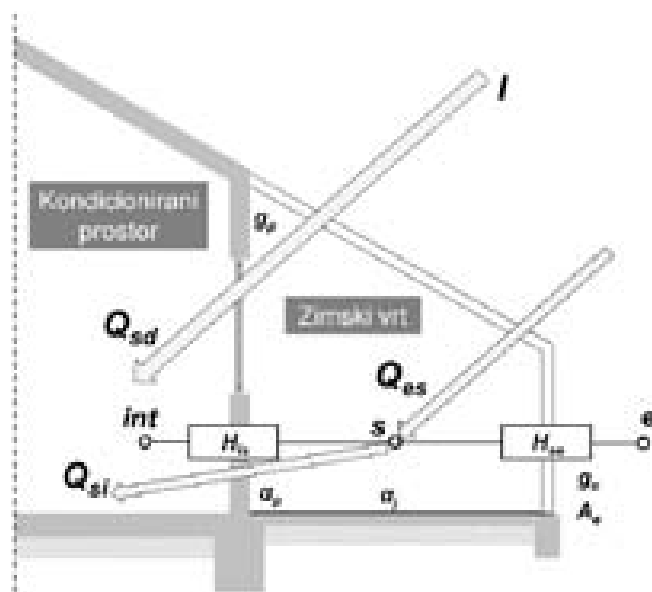
Prijenos topline transmisijom i ventilacijom za pregradni zid između kondicionirane zone i susjednog nekondicioniranog ostakljenog prostora proračunava se uporabom faktora b_{tr} u skladu s točkama 6.12 i 6.13.

Sunčevi toplinski dobitci koji iz osunčanog ostakljenog prostora prelaze u kondicionirani prostor zbroj su izravnih Sunčevih toplinskih dobitaka, preko osunčanog prostora kroz pregradnu stijenu između kondicioniranog i ostakljenog prostora i neizravnih toplinskih dobitaka kroz istu pregradnu stijenu iz osunčanog prostora kojeg grije Sunčevo zračenje. Metoda proračuna prikazana u nastavku utvrđuje koliki je pozitivan učinak tijekom sezone grijanja. Međutim, isti se postupak mora primijeniti za proračun Sunčevih dobitaka pri hlađenju (ljeti), uzimajući u obzir dodatnu (sezonsku) zaštitu od sunca i ventilacijske protoke, ako postoje.

Karakteristike pregradne stijene između kondicioniranog i ostakljenog prostora imaju indeks w za ostakljeni dio, a indeks p za neprozirni dio. Karakteristike vanjske ovojnice ostakljenog prostora su s indeksom e .

Da bi se proveo proračun potrebno je, za pregradnu stijenu i vanjsku ovojnicu ostakljenog prostora, poznavati slijedeće karakteristike:

- F_F udio ploštine okvira ostakljenja,
- F_{sh} faktor smanjenja zbog vanjskog zasjenjenja,
- g efektivni ukupni prolazak Sunčeve energije za ostakljenje,
- A_w ploština prozora i ostakljenih vrata u pregradnoj stijeni,
- A_e ploština ovojnice osunčanog ostakljenog prostora,
- A_j ploština svake površine j , koja apsorbira Sunčevo zračenje u osunčanom ostakljenom prostoru (pod, neprozirni zidovi; neprozirni dio pregradne stijene ima indeks p),
- α_j prosječni faktor apsorpcije Sunčeva zračenja apsorbirajuće površine j u osunčanom ostakljenom prostoru,
- I_i Sunčevo zračenje na površinu i tijekom proračunskog koraka,
- $H_{p,tot}$ koeficijent prijenosa topline transmisijom iz unutarnjeg prostora kroz neprozirni dio pregradne stijene i osunčani ostakljeni prostor na vanjski prostor,
- $H_{p,e}$ koeficijent prijenosa topline transmisijom iz apsorbirajuće površine neprozirnog dijela pregradne stijene, preko osunčanog ostakljenog prostora na vanjski prostor.



Slika 6.29 Shematski prikaz osunčanog ostakljenog prostora s relevantnim tehničkim karakteristikama

Sunčevi toplinski dobitci koji ulaze u kondicionirani prostor iz osunčanog ostakljenog prostora, Q_{ss} , u MJ, zbroj su izravnih toplinskih dobitaka kroz pregradnu stijenu, Q_{sd} , i neizravnih toplinskih dobitaka, Q_{si} , iz osunčanog ostakljenog prostora kojeg grije Sunce:

$$Q_{ss} = Q_{sd} + Q_{si} \quad (6.190)$$

Pretpostavka je da su sve apsorbirajuće površine zaštićene od Sunčeva zračenja u istom omjeru, vanjskim preprekama i vanjskom ovojnicom osunčanog ostakljenog prostora.

Izravni Sunčevi toplinski dobitci, Q_{sd} u MJ, zbroj su toplinskih dobitaka kroz prozirne (indeks w) i neprozirne (indeks p) dijelove pregradne stijene između kondicioniranog i ostakljenog prostora:

$$Q_{sd} = F_{sh,e} \times (1 - F_{F,e}) \times g_e \times \left[\frac{(1 - F_{F,w}) \times g_w \times A_w + \alpha_p \times A_p \times H_{p,tot}}{H_{p,e}} \right] \times I_p \times t \quad (6.191)$$

Neizravni toplinski dobitci proračunavaju se zbrajanjem Sunčanih toplinskih dobitaka za svaku apsorbirajuću površinu j , u osunčanom ostakljenom prostoru, ali odbijajući izravne toplinske dobitke kroz neprozirni dio pregradne stijene:

$$Q_{si} = (1 - b_{tr}) \times F_{sh,e} \times (1 - F_{F,e}) \times g_e \times \sum_j (I_j \times \alpha_j \times A_j) \times t - \left[\frac{F_{sh,e} \times (1 - F_{F,e}) \times g_e \times \alpha_p \times A_p \times H_{p,tot}}{H_{p,e}} \right] \times I_p \times t \quad (6.192)$$

Prijenos topline transmisijom i ventilacijom za pregradni zid između kondicionirane zone i susjednog nekondicioniranog ostakljenog prostora proračunava se uporabom faktora b_{tr} u skladu s točkama 6.12 i 6.13.

Faktor ponderiranja $(1 - b_{tr})$ je onaj dio Sunčevih toplinskih dobitaka u osunčanom ostakljenom prostoru koji ulazi u kondicionirani prostor kroz pregradnu stijenu. Taj je izraz dan u točki 6.12.4.

Približan proračun bilance energije proračunske zone u susjedstvu osunčanog ostakljenog prostora, može se provesti na slijedeći način:

a) u sezoni grijanja:

- proračunati prijenos topline transmisijom uporabom faktora prilagodbe, b_{tr} , kao za susjedni nekondicionirani prostor,
- zanemariti dodatne (neizravne) dobitke kroz susjedni ostakljeni prostor u proračunsku zonu,
- proračunati samo izravni prolazak Sunčeva zračenja kroz pregradnu stijenu, uzimajući u obzir smanjeni prolazak Sunčeva zračenja kroz ovojnicu osunčanog ostakljenog prostora.

b) u sezoni hlađenja

- proračunati prijenos topline transmisijom uporabom faktora prilagodbe, b_{tr} , kao za susjedni nekondicionirani prostor,
- zanemariti osunčani ostakljeni prostor u proračunu Sunčevih toplinskih dobitaka u proračunskoj zoni,
- ne uzima se u obzir smanjeni prolazak Sunčeve energije za ovojnicu osunčanog ostakljenog prostora, osim zasjenjenja od elemenata koji su stalno postavljeni tijekom cijele sezone hlađenja.

Alternativno se proračun bilance energije proračunske zone u susjedstvu osunčanog ostakljenog prostora može provesti po slijedećem pojednostavnjenom postupku:

- zanemare se unutarnji i Sunčevi toplinski dobici u i kroz osunčani ostakljeni prostor
- odredi se vrijednost faktora prilagodbe, b_{tr} , koji će se uzeti za sezonu grijanja i koji uključuje povoljan učinak unutarnjih i Sunčevih dobitaka tijekom sezone grijanja. Ta vrijednost smije ovisiti o tipu i / ili veličini osunčanog ostakljenog prostora
- odredi se vrijednost faktora prilagodbe, b_{tr} , koji će se uzeti za sezonu hlađenja i koji uključuje negativan učinak unutarnjih i Sunčevih dobitaka tijekom sezone hlađenja.

Gore navedeno podrazumijeva da unutarnji i Sunčevi dobici ne smiju biti ponovno uzeti u obzir u točkama 6.14.2 i 6.15.2.

7. TEHNIČKI SUSTAVI ZGRADE

7.1 Uvod

Tehnički sustavi zgrade su sklopovi instalacija i tehničkih uređaja u zgradi, za čiji rad se troši energija, a služe za osiguranje usluge grijanja, hlađenja, pripreme potrošne tople vode, ventilacije, rasvjete, proizvodnje električne energije i druge potrebne opskrbe zgrade vezane za korištenje zgrade. Tehnički sustav zgrade može se odnositi samo na jednu ili na više instalacija zgrade, npr. samo sustav grijanja ili sustav grijanja i potrošne tople vode.

Termotehničkim sustavom nazivamo tehnički sustav zgrade koji služi za grijanje, hlađenje, ventilaciju, klimatizaciju i pripremu potrošne tople vode. Tehnički sustavi zgrade pretvaraju konačnu energiju, koja se dovodi na ulaz u sustav, u korisnu energiju koja vrši određenu uslugu.

U nastavku su obrađeni slijedeći tehnički sustavi zgrade:

- sustavi za grijanje prostora,
- sustavi za pripremu potrošne tople vode (PTV),
- sustavi za ventilaciju prostora,
- sustavi za hlađenje prostora,
- sustavi za klimatizaciju prostora,
- sustavi za električnu rasvjetu unutarnjeg prostora zgrade.

Tehnički sustav zgrade se može podijeliti u više podsustava. **Podsustav tehničkog sustava zgrade** je dio tehničkog sustava zgrade koji obavlja određenu funkciju, npr. podsustav za proizvodnju topline, podsustav za razvod topline itd.

Potrebna konačna energija ili **potrošnja energije** (eng.: energy use) za rad tehničkog sustava zgrade je ulazna energija u tehnički sustav kojom se zadovoljava potrebna korisna energija u vezi s namjenom promatranog tehničkog sustava. Ona je jednaka zbroju potrebne korisne energije, svih toplinskih gubitaka sustava te pomoćne energije koju rabi sustav. Izražava se potrebnim količinama nositelja energije (energenata) koje treba predati tehničkom sustavu na granici sustava.

Toplinski gubitak sustava (eng.: system thermal loss) je toplinski gubitak tehničkog sustava zgrade koji ne doprinosi korisnom izlazu sustava. Toplinska energija vraćena izravno u sustav (podsustav) ne smatra se toplinskim gubitkom sustava već vraćenom toplinom.

Vraćena toplota (eng.: heat recovery) je toplota koja je proizvedena tehničkim sustavom zgrade ili koja je vezana uz uporabu zgrade (npr. PTV) i koja se upotrijebi izravno u dotičnom sustavu za smanjenje ulazne topline, a koja bi u suprotnom bila izgubljena (npr. predgrijanje zraka za gorenje pomoću izmjenjivača topline na plin iz dimnjaka).

Povratni toplinski gubitak sustava (eng.: recoverable system thermal loss) je dio toplinskog gubitka sustava koji se može vratiti, radi smanjenja potrebne korisne energije za grijanje (ili hlađenje) prostora ili smanjenje potrošnje energije sustava za grijanje (ili hlađenje).

Vraćeni toplinski gubitak sustava (eng.: recovered system thermal loss) je dio povratnog toplinskog gubitka sustava koji je vraćen bilo za smanjenje potrebne korisne energije za grijanje (ili hlađenje), bilo za smanjenje potrošnje energije za sustav grijanja (ili hlađenja).

Energija potrebna za rad pojedinih tehničkih sustava zgrade predaje se tim sustavima na granici zgrade i nazivamo je **isporučena energija** (eng.: delivered energy). Isporučena energija jednaka je zbroju energija koje tijekom godine potroše pojedini tehnički sustavi zgrade, a izražava se količinom pojedinih nositelja energije (plina, loživa ulja, električne energije,...).

Podjela zgrade u zone često ima za posljedicu da se granice zone i granice sustava (granice područja opskrbe promatranim sustavom) ne poklapaju. Toplinski gubitci tehničkog sustava

zgrade te potrebna konačna energija za rad tehničkog sustava ne određuju se za svaku zonu, već unutar granica sustava (za svako područje opskrbe). U drugom koraku se dobivene vrijednosti na razini sustava razdjele po pojedinim zonama, ponderirano prema ploštinama neto površina pojedinih zona. Jednaki postupak vrijedi i za pomoćne energije.

Ako se granice zone i granice sustava međusobno poklapaju tj. ako je jedna zona opremljena jednim tehničkim sustavom, tada se toplinski gubici sustava i sve pomoćne energije sustava bilanciraju za tu zonu.

Ako je jedna zona opremljena s više tehničkih sustava, tada se toplinski gubici sustava i sve pomoćne energije sustava, unutar granica sustava pojedinačno bilanciraju, a nakon toga se zbroje za sve tehničke sustave unutar zone tako da se dobiju ukupne karakteristike za zonu.

7.2 SUSTAVI GRIJANJA PROSTORA

7.2.1 Uvod

Grijanje prostora je proces prenošenja topline u prostor zgrade radi održavanja određene temperature tijekom hladnijeg razdoblja godine. Razlikuje se grijanje u cilju postizanja toplinske ugodnosti u prostoru za boravak i rad ljudi te grijanje za zadovoljenje potreba industrijskog procesa ili uskladištenih proizvoda.

Grijanjem se utječe na temperaturu zraka i srednju temperaturu ploha okolnih građevnih dijelova prostorije, što se zajedno karakterizira kao osjetilna temperatura. Na ostale faktora toplinske ugodnosti (brzinu strujanja zraka, vlažnost zraka i čistoću zraka) može se utjecati sustavom klimatizacije zraka.

Sustav grijanja je tehnički sustav zgrade koji služi za grijanje prostora zgrade [109]. Grijati se može jedna prostorija u zgradi, više prostorija ili cijela zgrada. Cilj uporabe sustava grijanja je da se postigne i održi željena temperatura u prostoru zgrade tijekom hladnijeg razdoblja godine kada se ti uvjeti ne mogu održavati na pasivan način. Kod toga treba nastojati da se minimizira potrebna energija za grijanje.

Sustav grijanja troši energiju u jednom obliku i vraća je u obliku topline. Primarni nositelji energije koje koristi sustav grijanja za proizvodnju topline mogu biti fosilnog porijekla (proizvodi od nafte, ugljen, prirodni plin), obnovljiva energija (drvo i proizvodi na bazi drva, Sunčevo zračenje, toplina okoliša,...) ili električna energije (dobivena u nuklearnoj centrali, hidrocentrali ili termocentrali na fosilne energente). Općenito se može reći da potrebna energija za rad sustava grijanje potječe od goriva (kruta goriva, tekuća goriva, plinovita goriva), električne energije, energije Sunčeva zračenja i topline okoliša (zemlje, zraka, vode).

Nužne komponente svakog sustava grijanja su:

- podsustav za proizvodnju topline (izvor topline),
- podsustav za predaju topline u prostor.

Pored navedenog, ovisno o tehničkom rješenju, sustav grijanja može još sadržavati:

- podsustav za pohranu topline,
- jedan ili više podsustava za razvod topline,
- podsustav regulacije i upravljanja koji osigurava snabdijevanje toplinom prema stvarnim potrebama,
- sigurnosnu opremu.

Da bi uspješno obavio svoju funkciju sustav grijanja mora zadovoljiti određene uvjete u vezi s:

- ispravnim dimenzioniranjem izvora topline i sustava za predaju topline u prostor kao i sustava razvoda kad instalacija koristi ogrjevn medij za prijenos topline,
- proizvodnjom topline prema stvarnim potrebama prostora koji se grije (odgovarajući elementi regulacije i automatizacije),
- sigurnosti korisnika prostora i samog sustava grijanja,
- minimiziranjem potrošnje energije i onečišćenja okoliša.

7.2.2 Tipologija sustava grijanja

Kriteriji za podjelu sustava grijanja mogu biti vrlo različiti:

- prema mjestu proizvodnje topline,
- prema izvedbi ogrjevnih tijela,
- prema nositelju energije za grijanje.

Prema mjestu proizvodnje toplinske energije tj. prema položaju izvora topline u odnosu na grijanu prostoriju, sustav grijanja može biti [110]:

- lokalni ili pojedinačni – izvor topline u grijanoj prostoriji,
- centralni – izvor topline na jednom mjestu u zgradi (kotlovnici),
- daljinski – izvor topline u centralnoj toplani iz koje se snabdijeva jedna ili više zgrada ili čitava gradska četvrt.

Ako se u višestambenoj zgradi koristi jedan sustav grijanja po stanu, onda takav sustav nazivamo etažno grijanje.

Prema izvedbi ogrjevnih tijela sustav grijanja može biti: izravni (kamini, peći,...), radijatorski, konvektorski, ventilokonvektorski i površinski.

Prema korištenom primarnom nositelju energije sustav grijanja može biti: plinski, na lož ulje, na električnu energiju, na kruta goriva, solarni, na toplinu iz okoliša.

7.2.3 Lokalni ili pojedinačni sustavi grijanja

Kod lokalnih ili pojedinačnih sustava grijanja svaka se prostorija izravno zagrijava iz izvora topline koji se nalazi u toj prostoriji. Izvor topline i predaja topline u prostor objedinjeni su u jednom uređaju, kojemu je eventualno pridružena regulacija (vidjeti sliku 7.1). To je tradicionalni i najjednostavniji način grijanja prostora.



Slika 7.1 : Shematski prikaz strukture sustava lokalnog grijanja

Sustavi lokalnog grijanja su primjerice kamini (na kruta goriva, plinski), razne vrste peći (na kruta goriva, na plin, ulje ili na električnu energiju), zagrijači zraka ili kaloriferi (električni, plinski), grijalice (plinske, električne), štednjaci (na kruta goriva, električni), električno podno grijanje, itd.

Kamini su djelomično ograđena kućna ognjišta. Gotovo isključivo se lože drvom. Za izgaranje je potrebno osigurati veću količinu zraka. Na grijani prostor toplina se prenosi uglavnom zračenjem. Osim kao izvor topline, kamin ima i dekorativnu namjenu. Postoje i ljevanoželjezni kamini koji predstavljaju prijelazni oblik prema pećima.

Peći su lokalni izvori topline koji odaju toplinu zračenjem i konvekcijom. Danas se proizvode peći na sva raspoloživa goriva: kruta goriva (ugljen ili biomasa), tekuća goriva i plin, te peći koje kao primarnog nositelja energije koriste električnu energiju.

Kaljeve peći se grade od glinenih ili šamotnih elemenata. Lože se uglavnom drvom ili ugljenom. Vrlo su masivne i zato imaju svojstvo akumulacije topline u vrijeme loženja i kasnije odavanje akumulirane topline zračenjem i konvekcijom. Zato njih ne treba stalno ložiti već dva do tri puta dnevno.

Trajnožareće (željezne) peći se mogu ložiti svim vrstama ugljena i drva, uključivo i krutim gorivim otpadom. Veći dio topline odaju zračenjem. One imaju relativno veliki spremnik za

gorivo koji se puni nekoliko puta dnevno. Posjeduju dobru regulaciju izgaranja goriva koja radi na principu povećanja ili smanjenja dovoda zraka za izgaranje.

Razne **peći na tekuća goriva (uljne peći)** kao gorivo koriste loživo ulje ili mazut. One se danas koriste najčešće za zagrijavanje tvorničkih hala i skladišta. Takve peći imaju plamenik kao kotlovi centralnog grijanja, pa je za njihov rad potrebna i električna energija.

Plinske peći su svakako najbolji izbor među lokalnim izvorima topline, jer je plin najjeftiniji energent i izgaranjem najmanje zagađuje okoliš. Prema načinu odvođenja dimnih plinova, plinske peći mogu biti s priključkom na dimnjak ili s tzv. fasadnim priključkom. Prema načinu dovoda zraka za izgaranje, plinske peći mogu biti s atmosferskim plamenikom koje zrak za izgaranje uzimaju iz prostorije ili sa zatvorenom komorom izgaranja koje zrak uzimaju izvana. Plinske peći mogu imati automatski uređaj za regulaciju temperature.

Plinske infracrvene grijalice izmjenjuju toplinu zračenjem elektromagnetskih valova u infracrvenom području spektra. Uglavnom su namijenjene za grijanje jednog dijela prostorije (najčešće radnog mjesta) ili otvorenih prostora (npr. terasa).

Električne peći kao primarni izvor energije koriste električnu energiju. One se, zbog svoje jednostavne i praktične uporabe, često koriste usprkos tome što je električna energija najskuplji oblik energije. Najekonomičniji način grijanja električnom energijom je pomoću **električne akumulacijske peći**. Te peći imaju relativno veliku masu i akumuliraju toplinu noću kada je električna energija jeftinija, a akumuliranu toplinu otpuštaju danju kada je električna energija skuplja i kada nisu uključeni grijači.

Kuhinjski štednjak je u prvom redu namijenjen potrebama kuhanja, ali u mnogim domaćinstvima je i jedini izvor topline. Za loženje koristi kruta goriva. Ima malu akumulaciju topline što znači da ga za grijanje treba kontinuirano ložiti.

Električni kaloriferi koriste se za povremeno, brzo zagrijavanje prostora. Obično sadrže termosta, radi sprječavanja pregrijavanja prostorije.

Podni električni grijači su gotovi, tanki, plošni elementi s ugrađenim elektrogrijačima. Ugrađuju se u podove. Odavanje topline podnih električnih grijača je ograničeno na iznos do 160 W/m².

Pojedinačni sustavi grijanja danas se još rijetko koriste i to najčešće kao dopunsko grijanje za prostorije koje se koriste povremeno ili u slučaju kvara na sustavu centralnog grijanja. Današnji standard u području grijanja je toplovodno centralno grijanje.

7.2.4 Sustavi centralnog grijanja

7.2.4.1 Općenito

Kod **sustava centralnog grijanja** prostorija se zagrijava posredno. Izvor topline je odvojen od podsustava za predaju topline u prostor pa je potrebna razvodna mreža kako bi se osigurao prijenos topline (vidjeti sliku 7.2). Toplinska energija se proizvodi na jednom mjestu u zgradi (zajednička kotlovnica) te se pomoću odgovarajućeg prijenosnika topline (ogrjevnog medija – tople vode, pare ili toplog zraka) toplina dovodi u pojedine prostorije i pomoću ogrjevnih tijela (radijatori, konvektori,...) prenosi na zrak u prostoriji.

Prijenosnik energije ili **ogrjevni medij** je tvar koja služi za prijenos energije od izvora topline do ogrjevnih tijela u prostorijama koje treba zagrijati. Prijenosnik topline se do ogrjevnih tijela u prostorijama prenosi odgovarajućim razvodom topline (cijevi, kanali).

Kao prijenosnici topline kod centralnih grijanja koriste se voda (toplovodno grijanje - grijanje na toplu vodu), para (parno grijanje - grijanje na paru) ili zrak (zračno grijanje - grijanje na topli zrak).

U usporedbi s lokalnim sustavom grijanja, centralni sustav omogućuje bolju iskoristivost topline, ujednačen režim rada i kvalitetnu regulaciju sustava. Zato je sustav centralnog grijanja najracionalniji način zagrijavanja prostora.

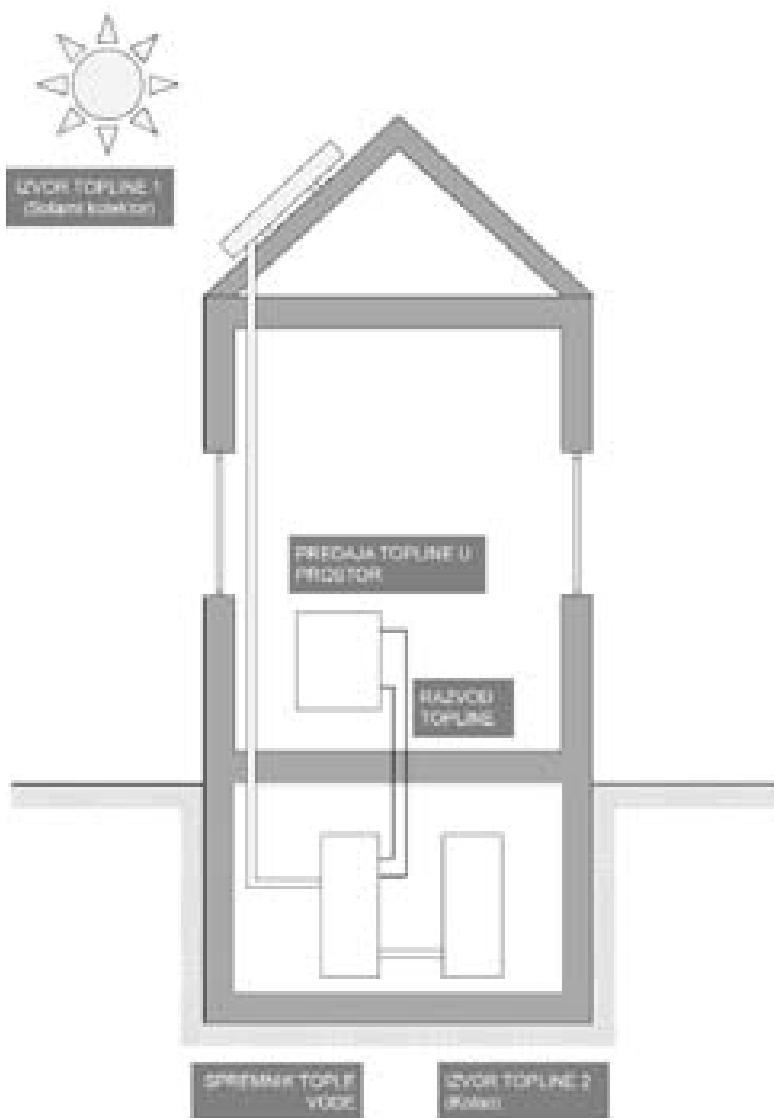


Slika 7.2 : Shematski prikaz strukture sustava toplovodnog centralnog grijanja

Sustav centralnog grijanja obuhvaća do četiri procesna područja (podsustava):

- podsustav za proizvodnju topline (izvor topline),
- podsustav za pohranu topline (eventualno),
- podsustav za razvod topline do grijanih prostorija,
- podsustav za predaju topline u prostor.

Cijeli sustav obično ima i podsustav za automatsko upravljanje i dodatne sigurnosne uređaje.



Slika 7.3 : Shematski prikaz sustava centralnog grijanja s četiri procesna područja

Pohrana topline kod toplovodnog grijanja potrebna je samo kada je proizvodnja topline potpomognuta sustavom solarnih kolektora.

a) **Centralno grijanje na toplu vodu**

Glavni dijelovi uobičajenih sustava centralnog grijanja su kotlovi, plamenici, dimovodni sustav, cijevni razvod, armature, cirkulacijske pumpe, ekspanzijska posuda, ogrjevna tijela te sustavi regulacije i upravljanja. Općenito se smatra da svakih desetak godina treba obnoviti sustav grijanja, prvenstveno kotlove i plamenike, a ventile i regulacijske uređaje treba zamijeniti novima s boljim tehničkim rješenjima.

Kod **toplovodnog grijanja** voda se zagrijava u kotlovima (ili drugim izvorima topline) i zatim pomoću cirkulacijske pumpe ili (rjeđe) koristeći različitu gustoću vode koja polazi i koja se vraća (termosifonski princip), cijevnom mrežom dovodi do ogrjevnih tijela. Odavanjem topline s ogrjevnih tijela u prostor voda se ohlađuje i tako ohlađena ponovno se vraća u kotao na zagrijavanje.

U sustavima grijanja voda je glavni prijenosnik energije jer je specifični toplinski kapacitet vode najveći u usporedbi s drugim tvarima i iznosi

$$c_w = 4187 \frac{\text{J}}{\text{kg} \times \text{K}} \text{ kod } 70^\circ\text{C}.$$

Grijanje na toplu vodu radi s temperaturom vode u polaznom vodu između 30 °C (niskotemperaturni sustav) i 90 °C, ovisno o pogonskim karakteristikama izvora topline i izabranog sustava grijanja (radijatorsko, konvektorsko, podno, stropno,...).

Podjela sustava toplovodnog centralnog grijanja može se provesti prema:

- načinu cirkulacije vode:
 - o sustavi grijanja s prirodnom cirkulacijom (gravitacijsko grijanje),
 - o sustavi grijanja s prisilnom cirkulacijom (grijanje s crpkom) – uobičajeno rješenje,
- izvedbi cijevne mreže:
 - o jednocjevni sustav toplovodnog grijanja (jednocjevni razvod - jedan cjevovod i za polaznu i za povratnu vodu),
 - o dvocijevni sustav toplovodnog grijanja (dvocijevni razvod - jedan cjevovod za polaznu vodu i jedan za povratnu vodu),
 - o Tichelmannov sustav toplovodnog grijanja (kombinacija dvocijevnog i jednocjevnog sustava),
- razvodu cijevne mreže:
 - o donji razvod (polazni i povratni vod ispod stropa najniže etaže),
 - o gornji razvod (polazni vod ispod stropa najviše etaže),
- vrsti ekspanzijskog sustava:
 - o otvoreni sustav (ekspanzijska posuda na najvišoj točki instalacije),
 - o zatvoreni sustav (ekspanzijska posuda u kotlovnici).

Kod **gravitacijskog grijanja** cirkulacija vode se temelji na fizikalnoj činjenici da je ugrijana voda lakša od hladne, te se stoga iz izvora topline diže uvis, a na njezino mjesto pritječe ohlađena voda iz ogrjevnih tijela. Ovaj sustav ne koristi električnu energiju jer nema cirkulacijske pumpe. Sustav grijanja s prirodnom cirkulacijom zahtjeva veći promjer razvodnih cijevi kako bi otpor strujanju vode u mreži bio što manji. Osim toga, da bi se omogućila prirodna cirkulacija vode u sustavu, postoje ograničenja u vođenju mreže.

Kod **sustava grijanja s prisilnom cirkulacijom**, u sustavu postoji cirkulacijska crpka koja uzrokuje strujanje vode cijevima i kroz ogrjevna tijela. Presjeci cijevi su zato manji i nema ograničenja u vođenju razvodne mreže. Zbog prisilne cirkulacije vode u sustavu, ogrjevna tijela mogu biti i ispod horizontalne razvodne mreže.

Kod **jednocijevnog razvoda** svako ogrjevno tijelo se ugrađuje paralelno s glavnim razvodom. Stoga svako sljedeće ogrjevno tijelo ima nižu temperaturu, što treba uzeti u obzir kod odabira veličine ogrjevnog tijela.

Kod **dvocijevnog razvoda** svako ogrjevno tijelo se priključuje na odvojeni polazni i povratni vod i stoga dobiva vodu približno jednake temperatura.

Kod **Tiechelmannovog razvoda** je ukupna duljina polaznog i povratnog voda od izvora topline do svakog ogrjevnog tijela jednaka.

b) Centralno grijanje na paru

Kod grijanja na paru voda se zagrijava na temperaturu iznad 100 °C. Proizvedena zasićena vodena para prenosi se cijevima do ogrjevnih tijela ili izmjenjivača topline para – voda, gdje se kondenzira. Kod kondenzacije oslobođena latentna topline uzrokuje vrlo veliku snagu grijanja. Kondenzat teče natrag u kotao za grijanje ili se koristi za druge primjene koje zahtijevaju toplu vodu.

c) Centralno grijanje na topli zrak

Grijanje na topli zrak koristi zrak prostorije kao nositelja topline. Kod toga se u jedinici za grijanje proizvedeni topli zrak vodi zračnim kanalima u prostorije.

Sustav grijanja na topli zrak nazivamo zračni sustav ili toplozračno grijanje. Ako je ugrađen i rashladni uređaj i sustav za ovlaživanje onda govorimo o klimatizaciji. Sustav zračnog grijanja susreće se rijetko i to uglavnom kod većih poslovnih zgrada.

U nastavku se uglavnom obrađuju komponente sustava toplovodnog centralnog grijanja.

7.2.4.2 Izvori topline za sustave centralnog grijanja

Izvori topline su dijelovi sustava grijanja u kojima dolazi do pretvorbe primarnog nositelja energije (npr. kemijske energije goriva, električne energije, Sunčeve energije, energije iz okoliša itd.) u toplinu, koja se zatim pomoću odgovarajućeg prijenosnika energije (ogrjevnog medija) prenosi do ogrjevnog tijela i predaje u prostoriju.

Prema izvedbi izvori topline se dijele na:

- kotlove,
- toplinske podstanice (kod daljinskog grijanja),
- solarne sustave,
- toplinske crpke (pumpe ili dizalice topline),
- kogeneracijske i trigeneracijske sustave,
- razne posebne izvore (sustavi korištenja plime i oseke, energije valova,...).

Prema vrsti goriva izvori topline mogu biti:

- na kruta goriva,
- plinski,
- uljni,
- električni,
- solarni,
- na toplinu iz okoliša.

Prema prijenosniku energije (ogrjevnom mediju) izvori topline se dijele na:

- toplovodne (ogrjevni medij je topla voda zagrijana na temperaturu ≤ 110 °C),
- vrelovodne (ogrjevni medij je topla voda zagrijana na temperaturu > 110 °C),
- parne (ogrjevni medij je vodena para),
- uljne (ogrjevni medij je termalno ulje),
- toplozračne (ogrjevni medij je zrak).

a) **Kotlovi**

Kotlovi su danas najčešći neizravni izvori topline za sustave centralnog grijanja. U njima se nositelj energije pretvara u toplinu koja se zatim pomoću ogrjevnog medija prenosi do ogrjevnih tijela i preko njih predaje u prostoriju.

Zadaća kotla je da prenese na ogrjevni medij toplinu proizvedenu izgaranjem goriva. Osim toga on mora osigurati odvođenje plinova koji nastaju gorenjem.

Kotlovi se sastoje od:

- tijela (izmjenjivača topline) u kojem cirkulira fluid koji treba zagrijati,
- ložišta, tj. prostora u kojem dolazi do izgaranja goriva,
- omotača koji toplinski izolira tijelo izvana.

Kod kotlova na kruta goriva potrebna je još i posuda za pepeo.

Kotlovi se konstruktivno razlikuju prema vrsti goriva, zatim s obzirom na toplinski učin i po nekim drugim karakteristikama.

Prema vrsti goriva kotlovi se dijele na: kotlove na plin, kotlove na ulje, kotlove na kruta goriva (ugljen ili biomasu), kotlove na kombinirana goriva (ulje / plin), električne kotlove.

Prema toplinskom učinku (snazi) kotlovi se uobičajeno dijele na:

- kotlove malog učina: do 50 kW,
- kotlove srednjeg učina: od 50 do 500 kW,
- kotlove velikog učina: iznad 500 kW.

Prema temperaturi ogrjevnog medija i dimnih plinova na izlazu iz kotla tj prema učinkovitosti korištenja energije, kotlovi mogu biti:

- standardni, s tzv. standardnom temperaturom polaznog i povratnog voda 90/70 °C, čime se sprječava kondenzacija vodene pare u dimnim plinovima. U više europskih zemalja više se ne proizvode i ne ugrađuju,
- niskotemperaturni, sa sniženom temperaturom polaznog i povratnog voda, npr. 70/50 °C, 60/40 °C, kod kojeg u određenim uvjetima može nastupiti kondenzacija vodene pare sadržane u dimnim plinovima,
- kondenzacijski, s mogućnošću iskorištavanja topline kondenzacije vodene pare iz dimnih plinova. Konstruiran je tako da veći dio vodene pare sadržane u dimnim plinovima kondenzira u svrhu iskorištavanja latentne topline, tj. gornje ogrjevne moći goriva.

Standardni kotlovi su oni kod kojih temperatura polaznog i povratnog voda ima vrijednosti 90/70 °C. Kod njih je temperatura dimnih plinova relativno visoka i time stupanj djelovanja manji. Takvi su kotlovi i sustavi grijanja uglavnom napušteni, ali se kod nas još često susreću kod starijih zgrada.

Kod **niskotemperaturnih kotlova** do povećanje stupnja djelovanja kotla (iznose 91 do 95 %) dolazi uslijed korištenja preostale osjetilne topline dimnih plinova što se osigurava odgovarajućom konstrukcijom kotla i karakteristikama dimovodnog sustava. Temperatura povratnog voda može se spustiti i na 40 °C, pa i niže, ali pri tome ne bi smjelo doći do kondenzacije vodene pare na površinama za izmjenu topline. Takva izvedba kotlova danas prevladava u primjeni u većini europskih zemalja.

Kod **kondenzacijskih kotlova** iskoristivost toplinske energije goriva u kotlovskoj jedinici je bolja u odnosu na niskotemperaturne kotlove. To se osigurava dodatnim iskorištavanjem latentne topline vodene pare iz dimnih plinova, pothlađivanjem dimnih plinova ispod temperature kondenzacije vodene pare u posebnom izmjenjivaču topline kojim se predgrijava ogrjevni medij (voda) iz povratnog voda. Zbog toga je stupanj djelovanja kotlovskog postrojenja $\eta > 1$, u odnosu na donju ogrjevnu moć. Povećanje iskoristivosti goriva u kondenzacijskim kotlovima nije posljedica samo iskorištavanja topline kondenzacije, već i smanjenja toplinskih gubitaka putem dimnih plinova jer je njihova temperatura niža.

Latentna toplina ili toplina kondenzacije je ista ona toplina koja je bila potrebna za stvaranje vodene pare u procesu izgaranja, tj. jednaka je toplini isparavanja.

Pregled stupnjeva korisnosti raznih kotlova dan je u tablici 7.1.

Tablica 7.1: Pregled stupnjeva korisnosti različitih tipova kotlova (prema www.viessmann.de)

Gorivo	Vrsta uređaja	Stupanj djelovanja
Kruta goriva	Kotlovi – starija izvedba	60 do 75 %
	Kotlovi – novija izvedba	80 do 90 %
	Kotlovi na biomasu	82 do 92 %
Tekuća goriva	Standardni kotlovi	85 do 90 %
	Niskotemperaturni kotlovi	90 do 95 %
Plinska goriva	Standardni kotlovi	92 do 95 %
	Niskotemperaturni kotlovi	95 do 98 %
	Kondenzacijski kotlovi	do 108 %

Prema materijalu izvedbe kotlovi se dijele na: lijevano-željezne kotlove i čelične kotlove.

Ložište je dio izvora topline u kojem se procesom izgaranja pretvara kemijska energija goriva u toplinu.

Plamenici su uređaji za izgaranje plinovitih i tekućih goriva. Plinski plamenici za prirodni plin, gradski plin i bioplin konstrukcijski se neznatno razlikuju. Od uljnih plamenika najčešći su oni na ekstralako loživo ulje. Uljni plamenik uzima gorivo iz spremnika i sa zrakom ga miješa u finu magličastu smjesu zraka i goriva. Pravilnim sagorijevanjem te smjese iskorištava se ogrjevnost goriva. Kod dobro reguliranih plamenika stupanj iskoristivosti može biti i preko 90%. Radom plamenika upravlja elektronski upravljački sklop.

Prema izvedbi i načinu rada plinskih plamenika kotlovi se dijele na : kotlove s atmosferskim plamenikom (zrak za izgaranje uzima iz prostorije) i kotlove sa zatvorenom komorom izgaranja (zrak za izgaranje uzima izvana pomoću ventilatora).

Uz kotlove, kao dopunski sustav za proizvodnju topline, mogu se koristiti solarni uređaji i toplinske pumpe.

b) Solarni toplinski sustavi

Solarni toplinski sustav je izvor topline za grijanje i pripremu potrošne tople vode koji kao primarni izvor energije koristi energiju Sunčevog zračenja. Obično se koristi kao dodatni izvor topline uz osnovni sustav plinskog, uljnog ili električnog kotla. Solarni toplinski sustav se sastoji od kolektora Sunčevog zračenja (solarnih kolektora) i drugih komponenata. Ovisno o namjeni toplinskog solarnog sustava razlikuje se:

- solarni sustav za pripremu potrošne tople vode (solarni toplinski sustav koji isporučuje energiju za zagrijavanje potrošne tople vode),
- solarni kombinirani sustav (solarni toplinski sustav koji isporučuje energiju za zagrijavanje potrošne tople vode i grijanje prostora),
- solarni sustav za predgrijanje (solarni toplinski sustav koji predgrijava vodu prije njenog ulaska u neki drugi tip grijača vode),
- solarni sustav za grijanje prostora (solarni toplinski sustav koji isporučuje energiju za grijanje prostora).

Solarni toplinski sustav može biti:

- solarni sustav isključivo na energiju Sunčevog zračenja (solarni toplinski sustav bez nekog dodatnog izvora topline),
- solarni sustav s dodatnim izvorom topline (solarni toplinski sustav koji u integriranom sustavu koristi kako energiju Sunčevog zračenja tako i jedan ili više dodatnih (pomoćnih) izvora topline i koji je stoga sposoban osigurati traženu potrebnu toplinu neovisno o dostupnosti Sunčeve energije).

Glavni dijelovi solarnog toplinskog sustava su:

- kolektor Sunčevog zračenja (solarni kolektor),
- spremnik tople vode s izmjenjivačem topline,
- solarna stanica s crpkom i regulacijom,
- razvod s odgovarajućim radnim (solarnim) medijem.

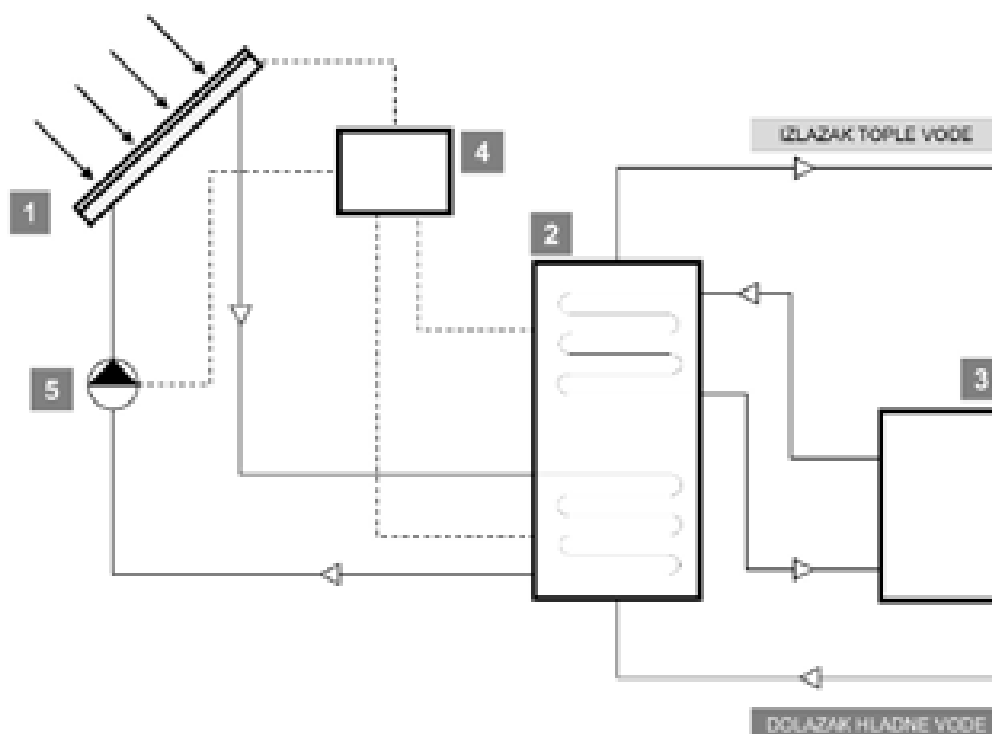
Kolektor Sunčevog zračenja služi za pretvorbu Sunčeve energije u toplinsku. Dozračena Sunčeva energija prolazi kroz prozirnu staklenu površinu kolektora i na apsorberskoj površini pretvara se u toplinu koja se potom predaje odgovarajućem prijenosniku topline – solarnom mediju (najčešće smjesa vode i glikola) koji struji cijevima pričvršćenim na apsorbersku ploču. Sa stražnje strane i bočno kolektor je toplinski izoliran. Stupanj djelovanja kolektora, η , je odnos korisne topline dobivene pretvorbom Sunčeve energije, predane solarnom mediju i ukupne upadne Sunčeve energije na površinu kolektora, a predstavlja mjeru učinkovitosti pretvorbe Sunčeve energije u toplinsku. Postoje dva tipa kolektora: pločasti kolektori i vakuumski cijevni kolektori.

Kolektori Sunčevog zračenja obično se montiraju na ravne ili kose krovove zgrada, spojeni u grupe i polja. Optimalni kut nagiba kolektora prema horizontali u RH iznosi 37° .

Spremnik tople vode je dio solarnog sustava koji služi za izmjenu topline solarnog medija s ogrjevnim medijem sustava grijanja ili potrošnom toplom vodom te za njihovu pohranu. Spremnik i svi dijelovi cjevovoda između kolektora i spremnika moraju biti dobro toplinski izolirani.

Solarna stanica omogućava strujanje solarnog medija, a automatska regulacija upravlja sigurnim pogonom cijelog sustava i usklađivanjem njegova rada sa sustavom grijanja i pripreme potrošne tople vode.

Solarni medij je radna tvar koja struji kroz cijevi razvoda solarnog kruga od kolektora do spremnika u kojem dolazi do izmjene topline. Za solarni medij najčešće se koristi voda pomiješana sa sredstvima za sprječavanje zamrzavanja. Cirkulacija solarnog medija između kolektora i spremnika može biti prisilna, izazvana radom pumpe, ili prirodna uslijed razlike temperature radnog medija u kolektoru i spremniku. Na slici 7.4 prikazane su osnovne komponente solarnog toplinskog sustava.

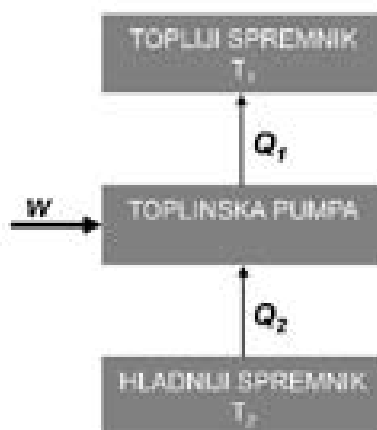


- 1 solarni kolektor
- 2 spremnik tople vode s izmjenjivačima topline
- 3 dodatni izvor topline (za dogrijavanje vode u spremniku)
- 4 solarna stanica s regulacijom
- 5 cirkulacijska pumpa solarnog kruga

Slika 7.4 Shematski prikaz osnovnih komponenta solarnog toplinskog sustava.

c) Toplinske crpke (pumpe ili dizalice topline)

Toplinska crpka (pumpa ili dizalica topline) je uređaj koji omogućuju prijenos toplinske energije iz sustava niže temperature razine (zemlja, voda, zrak) u sustav više temperature razine (centralno grijanje, PTV) uz manji utrošak dodatne energije (za rad kompresora, najčešće u obliku električne energije), pomoću kružnog procesa prikladnog radnog medija. Toplinska pumpa omogućuje iskorištavanje energije medija relativno niske temperature. Ona zimi crpi toplinu iz okoline (okolni zrak, zemlja, površinske i podzemne vode) i ta se toplina koristi za grijanje prostora. Poznato je da toplina spontano prelazi s toplijeg tijela na hladnije tijelo. Za obrnuti smjer kretanja topline tj. iz hladnijeg spremnika (npr. zrak iz okoline) u topliji spremnik (npr. zrak u prostoru zgrade) potrebno je uložiti vanjski rad ili toplinu iz nekog izvora visoke temperature. Količina topline Q_2 uzima se iz hladnijeg spremnika i predaje radnom mediju. Uz uloženi mehanički rad W toplijem spremniku predaje se količina topline $Q_1 = Q_2 + W$ i time se grije neki prostor. Na slici 7.5 shematski je prikazan rad toplinske pumpe [26].



Slika 7.5 Shematski prikaz principa rada toplinske pumpe

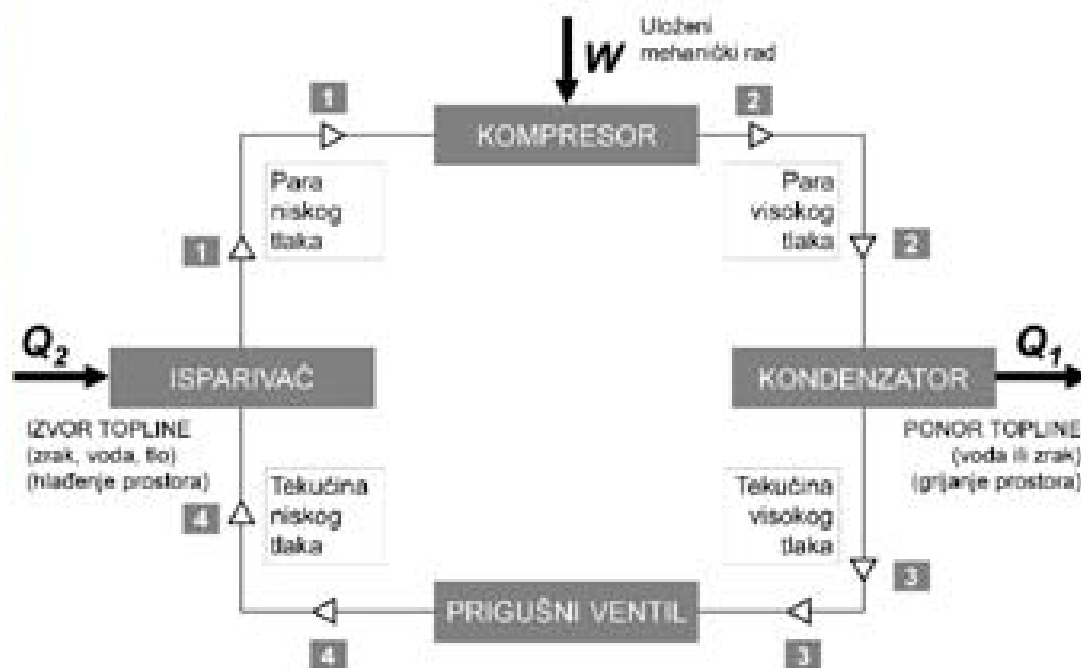
Toplinska pumpa se koristi i u kombiniranim sustavima koji služe istovremeno za grijanje i za hlađenje. Naime, sve vrste rashladnih uređaja mogu se koristiti i kao toplinske pumpe. Termodinamički proces koji se odvija u toplinskim pumpama istovjetan je procesu u rashladnim uređajima, samo u drugom području temperatura. U rashladnim uređajima temperatura okolice je najveća, a u toplinskim pumpama najmanja. Kod toplinske pumpe koja radi u režimu grijanja, toplina se od izvora, koji je na temperaturi okolice, predaje na višu razinu (u prostor). Kod toplinske pumpe koja radi u režimu hlađenja, toplina se uzima iz zraka u zgradi i ispušta u vanjski prostor.

Toplinske pumpe se koriste kao osnovni ili dodatni izvori topline (ili hladnoće) u sustavima grijanja, odnosno hlađenja i klimatizacije. Toplinska pumpa je pouzdan, ekonomičan i ekološki sustav grijanja i hlađenja. To je energetske najpovoljnije rješenje za korištenje električne energije za grijanje. Za svaki utrošeni kilovatt električne energije toplinska crpka proizvede 2, 3 ili 4 kilovata toplinske energije.

Za sve toplinske pumpe vrijedi pravilo: što je manja temperaturna razlika između ogrjevnog medija i toplinskog izvora okolice to je veća njena učinkovitost.

Osnovni dijelovi dizalice topline su: isparivač, kompresor, kondenzator i ekspanzijski ventil [111].

Princip rada toplinske pumpe je slijedeći: iz toplinskog izvora tj. prostora niže temperature razine (okolni zrak, tlo, površinske ili podzemne vode, onečišćen zrak iz prostorije, otpadna toplina itd.) uzima se toplina (izvor topline se pri tome hladi) i radnom tvari prenosi do kompresora koji tlači radnu tvar (za što je potrebno utrošiti dodatnu energiju) i time joj povećava temperaturu. U kondenzatoru i izmjenjivaču unutar kondenzatora dolazi do izmjene topline s ogrjevnim medijem sustava grijanja (ogrjevni medij – voda ili zrak za hlađenje kondenzatora, zagrijava se i koristi za grijanje prostora). Nakon toga se radni medij preko ekspanzijskog ventila vraća u isparivač. U ekspanzijskom ventilu radni medij ekspanzira s višeg tlaka kondenzatora na niži tlak isparivača i ohlađuje se. Time je zatvoren kružni proces isparavanje-kompresija-kondenzacija-ekspanzija koji se stalno ponavlja.



- 1 do 2 radni medij se komprimira uz potrošnju mehaničkog rada W i time njegova temperatura raste,
- 2 do 3 radni medij se hladi i kondenzira uz oslobađanje topline Q_1 koju preuzima voda ili zrak kojima se kondenzator hladi,
- 3 do 4 radni medij se prigušuje do tlaka i temperature u isparivaču i time se ohlađuje,
- 4 do 1 radni medij oduzima toplotu Q_2 tijelu koji se hladi (npr. zraku).

Slika 7.6 Shematski prikaz kompresijske toplinske pumpe

S obzirom na dodatni izvor energije za rad kompresora, toplinska crpka može biti:

- kompresijska, kod koje se strujanje radne tvari ostvaruje djelovanjem mehaničke energije pomoću kompresora ili crpke pogonjenih električnim, dizelskim ili plinskim motorom
- apsorpcijska, kod koje se strujanje radne tvari ostvaruje djelovanjem toplinske energije nastale izgaranjem prikladnog goriva ili električnim grijačem.

Kod kombiniranog sustava s rashladnim procesom i procesom zagrijavanja, uz osnovne komponente sustava: isparivač, kompresor, kondenzator i prigušni ventil, uređaju je dodan i prestrujni ventil. Prestrujni ventil obrće smjer strujanja radnog medija u uređaju.

Stupanj djelovanja toplinske pumpe definiran je kao omjer topline koja se dovodi u prostor Q_1 i uložene energije W za rad kompresora. Pomoću toplinske pumpe dobiva se toplotna energija za grijanje prostora nekoliko puta veća od utrošene energije. Zato je za toplinsku pumpu stupanj djelovanja veći od 100 % i njegove tipične vrijednosti kreću se između 200 % i 500 % ili još i više. Stoga se kod toplinskih pumpi, kao mjera za energetske učinkovitost, pored pojma stupnja djelovanja, koristi i tzv. faktor grijanja ili toplinski množitelj, ε_{gr} :

$$\varepsilon_{gr} = \frac{Q_1}{W} \quad (7.1)$$

s tipičnim vrijednostima od 2 do 5 i više. Faktor grijanja ili toplinski množitelj označava se i kao COP (eng.: Coefficient Of Performance). Ako toplinska pumpa ima COP 4 onda ona daje 4 kW topline za svaki 1 kW uložene energije. Što je COP veći to je toplinska pumpa energetski učinkovitija.

Koeficijent učinkovitosti COP za određenu toplinsku pumpu objavljuje se u katalogu proizvođača te pumpe, a dobiven je ispitivanjem pri određenoj temperaturi hladnijeg odnosno

toplijeg spremnika. Sasvim općenito, COP toplinske pumpe je utoliko veći što je temperatura hladnijeg spremnika viša, a temperatura toplijeg spremnika niža. Promjena temperature hladnijeg i toplijeg spremnika tijekom sezone grijanja utječe, dakle, na vrijednost COP-a. Stoga vrijednost COP-a definirana za jednu vrijednost temperature spremnika nije dovoljna za „stvarno“ utvrđivanje učinkovitosti toplinske pumpe. Zato se sve više, za ocjenu energetske učinkovitosti toplinske pumpe u režimu grijanja, koeficijent COP zamjenjuje sezonskim koeficijentom učinkovitosti SCOP (eng.: Seasonal Coefficient Of Performance) koji je određen mjerenjima kod četiri različite vanjske temperature, pa je njegova vrijednost mnogo točnija tj. bliža realnim uvjetima korištenja toplinske pumpe.

Kao izvor topline („toplinski spremnik“) toplinske pumpe najčešće koriste zemlju, vodu ili zrak.

Zemlja je dobar akumulacijski spremnik topline. Temperatura zemlje na dubini oko 1,5 metara je tijekom čitave godine relativno jednolična tj. između 7 i 13 °C. Energija tla u gornjem sloju zemlje regenerira se Sunčevim zračenjem, kišom itd.

Iskorištavanje topline iz tla provodi se preko zemljanih kolektora – sustava plastičnih cijevi (od PE) plošno položenih u obliku više sekcija (jedna sekcija duljine do 100 m) na dubini od 1,2 do 1,5 m. Specifično odavanje topline ovisi o vrsti tla i kreće se od 10 W/m² (pjeskovito tlo) do 30 W/m² (vlažno glinasto tlo) kolektorskog polja.

Druga varijanta korištenja zemlje kao toplinskog izvora je sa zemljanim sondama dubine 60 do 100 m. Preduvjet za to je poznavanje sastava i rasporeda slojeva tla te postojanja podzemne vode kao i poznavanje smjera njenog strujanja. Srednji toplinski učinak po jednom metru dužine sonde je 50 W/m.

Kao radni medij kod zemljanih kolektora i sondi koristi se voda s dodatcima protiv zamrzavanja.

Za vodu kao izvor topline koriste se površinske i podzemne vode. Temperatura površinskih voda (jezera, rijeka) uglavnom je stalna i pri dnu nikada nije niža od 4 °C. Temperatura morske vode kreće se u rasponu od 11 do 24 °C. Zato toplinske pumpe voda-voda imaju visok COP i relativno konstantan tijekom cijele godine.

Podzemne vode su konstantne temperature između 7 i 12 °C. Za korištenje podzemne vode kao toplinskog izvora potrebno je izbušiti dvije bušotine na međusobnoj udaljenosti najmanje 15 metara gledajući u smjeru toka vode. Jedna bušotina služi za dovod tople podzemne vode do isparivača toplinske pumpe, a druga bušotina za povrat ohlađene vode.

Toplinska pumpa na vanjski zrak usisava vanjski zrak, ohlađuje ga u isparivaču toplinske pumpe i nakon toga ponovno ga predaje okolišu. Suvremene toplinske pumpe zrak-voda mogu proizvesti toplinu za grijanje do temperature vanjskog zraka od -20 °C. Međutim kod ovako niskih temperatura toplinska pumpa ne može u potpunosti pokriti potrebe za grijanjem i potrošnom toplom vodom pa je potrebno u spremnik ugraditi elektro-grijač.

U tzv. kompaktnim uređajima toplinska pumpa se koristi i u kombinaciji sa sustavom za kontroliranu ventilaciju stanova (pasivne kuće). U tim uređajima integrirana toplinska pumpa otpadni zrak-voda koristi udio topline otpadnog zraka iz stambenih prostorija koji se ne može iskoristiti za povrat topline u sustav ventilacije, za dogrijavanje dovedenog svježeg zraka ili PTV.

d) Kogeneracijski sustavi

Kogeneracijom se naziva istodobna proizvodnja električne i toplinske energije u jednom procesu iz istog osnovnog izvora energije. Kogeneracijska tehnologija se primjenjuje tamo gdje postoji potreba za električnom i toplinskom energijom, a tu spada i područje zgradarstva. Primjenom kogeneracijske tehnologije postiže se ušteda u primarnoj energiji.

Kogeneracijski uređaj (eng.: Combined Heat and Power, CHP) je podsustav projektiran za opskrbu zgrade/zgrada toplinskom energijom i električnom energijom pomoću procesa kogeneracije. Uređaj može sadržavati spremnik topline i dodatni plamenik. Kogeneracijski uređaj je energetska efikasniji od odvojenih uređaja za proizvodnju jednakih količina električne i toplinske energije (razlika u potrošnji primarne energije i do 40%). Veliki kogeneracijski uređaji primjenjuju se u centraliziranim toplinskim sustavima kod daljinskog grijanja. Manji kogeneracijski sustavi sve više se koriste i kod pojedinačnih zgrada.

Kombinacijom kogeneracijskog uređaja i uređaja za hlađenje dobije se tzv. **trigeneracijski sustav** koji pored toplinske i električne energije proizvodi i rashladnu energiju. Kod trigeneracijskog sustava otpadna toplina se koristi u apsorpcijskom uređaju za dobivanje rashladne energije. Time je osigurano iskorištavanje otpadne topline sustava tijekom cijele godine za pripremu potrošne tople vode, zimi još i za grijanje, a ljeti i za hlađenje prostora.

Velikost kogeneracijskog uređaja obično se izražava mogućnošću proizvodnje električne energije u vatima (kW_e , MW_e). Kogeneracijske uređaje snage do 50 kW_e nazivamo mikrokogeneracije, a uređaje snage do 1 MW_e nazivamo male kogeneracije. Mikrokogeneracijski modeli namijenjeni su za ugradnju u pojedine stambene i poslovne zgrade. Kogeneracijska jedinica ugrađena u zgradu proizvodi toplinu samo za upotrebu u zgradi (grijanje prostora i priprema potrošne tople vode, u određenim slučajevima i hlađenje). Električna energija proizvedena u kogeneracijskoj jedinici instaliranoj u zgradi može se koristiti za potrebe zgrade ili se može izvesti izvan zgrade.

Glavne komponente kogeneracijskog uređaja su:

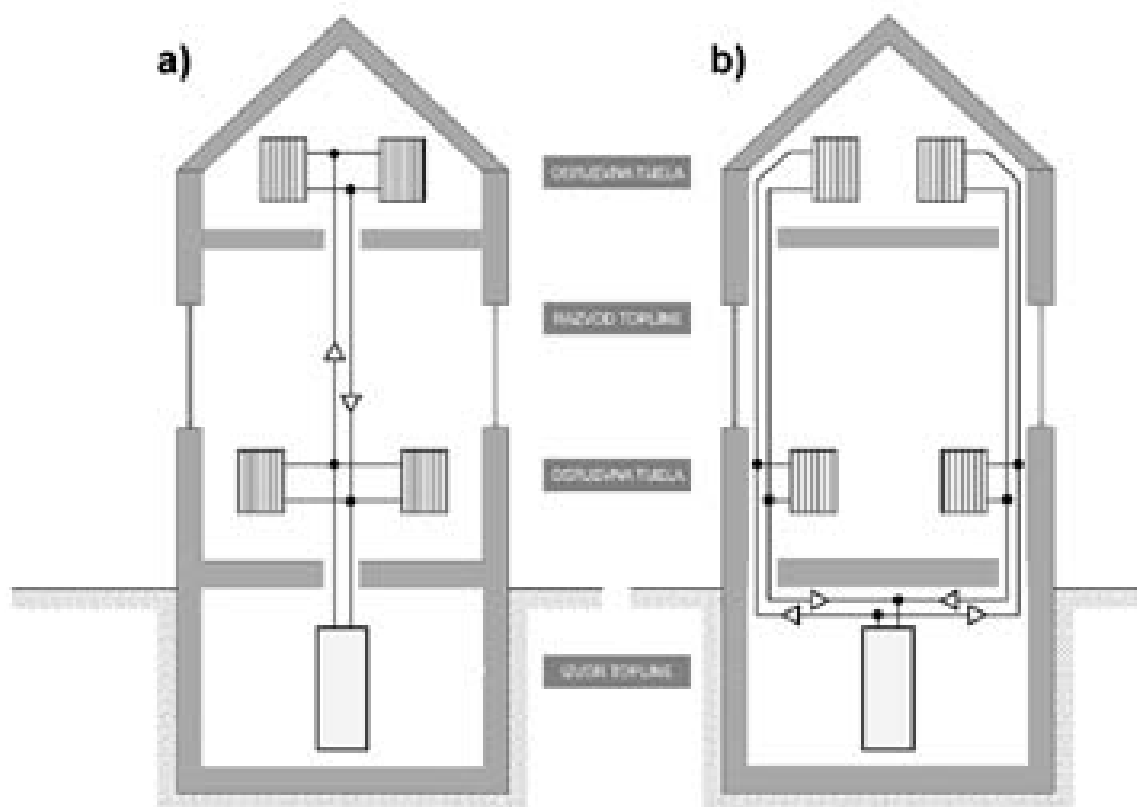
- električni generator,
- pogonski stroj (parna turbina, plinska turbina, motor s unutarnjim izgaranjem),
- sustav za iskorištavanje otpadne topline,
- sustav vođenja procesa.

Električni generator s pogonskim strojem proizvode električnu energiju. Vodena para proizvedena u parnoj turbini koristi se i za grijanje vode u sustavu toplovodnog grijanja. Kod plinske turbine vrući ispušni plinovi koriste se za proizvodnju toplinske energije u kotlu za otpadnu toplinu. Kod kogeneracijskog uređaja s motorom s unutarnjim izgaranjem, za proizvodnju toplinske energije koriste se ispušni plinovi.

7.2.4.3 Cijevni razvod

Cijevni razvod je dio sustava centralnog grijanja koji služi za prijenos toplinske energije od izvora topline do ogrjevnih tijela u prostorijama, pomoću odgovarajućeg ogrjevnog medija (prijenosnika energije). Za izvođenje cijevnog razvoda koriste se čelične, bakrene ili polimerne (PVC, PELD, PEMD, PEHD, PP, PB) cijevi.

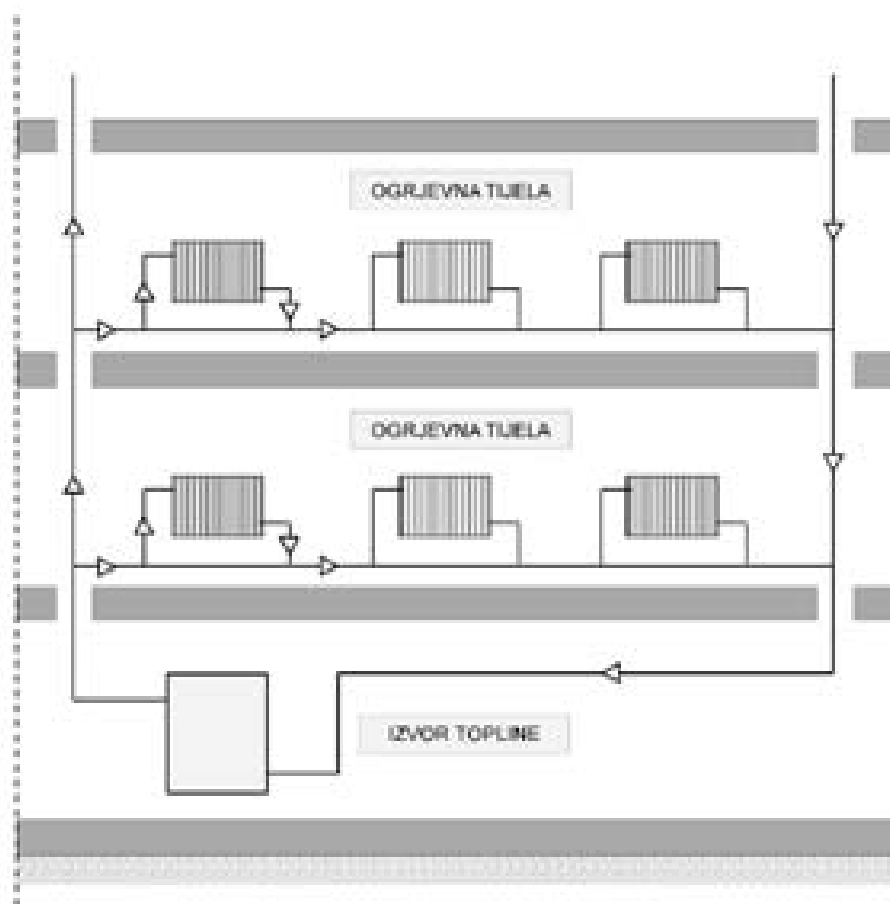
Cijevni razvod se može nalaziti skoro potpuno u grijanom prostoru (vidjeti sliku 7.6 a) ili djelomično u negrijanom prostoru (vidjeti sliku 7.6 b) što će povećati toplinske gubitke razvoda topline. Dijelovi cijevne mreže koji prolaze negrijanim prostorijama moraju se toplinski izolirati.



- a) horizontalni razvod topline potpuno, a vertikalni razvod skoro potpuno u grijanom prostoru
- b) horizontalni razvod topline u negrijanom prostoru, a vertikalni razvod skoro potpuno u negrijanom prostoru

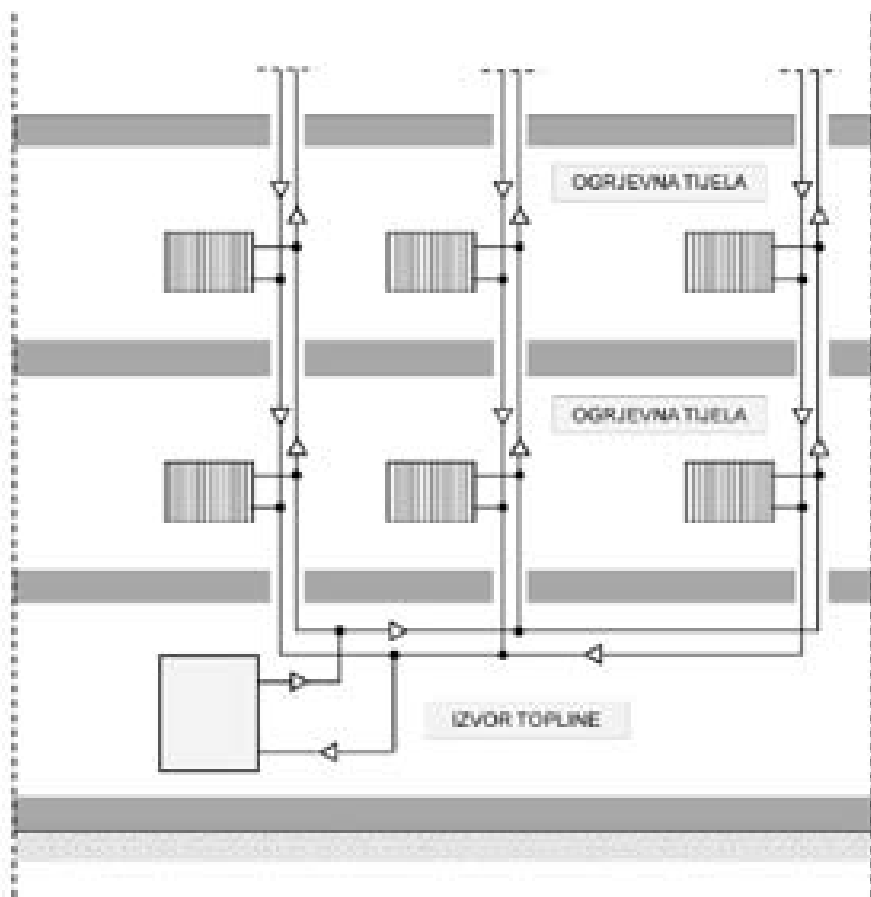
Slika 7.7 Primjeri položaja cijevnog razvoda kod sustava toplovodnog grijanja

Kod jednocijevnog sustava grijanja cijevni razvod se sastoji od jednog voda koji serijski povezuje ogrjevna tijela. Za ostvarivanje istog toplinskog učina površina ogrjevnih tijela povećava se s udaljenosti od izvora topline, jer se temperatura ogrjevnog medija smanjuje s tom udaljenošću.



Slika 7.8 Princip izvedbe razvoda jednocijevnog toplovodnog grijanja za višekatnu zgradu

Za centralno grijanje najčešće se koristi dvocijevni razvod koji se sastoji od dva usporedno vođena voda: polaznog i povratnog voda. Jedna cijev služi kao polazni vod (od izvora topline ka predaji topline u prostor), a druga cijev služi kao povratni vod (od predaje topline natrag ka izvoru topline). Kod dvocijevnog sustava grijanja temperature ogrjevnog medija na ulasku u svako ogrjevno tijelo su jednake.



Slika 7.9 Princip izvedbe razvoda dvocjevnog toplovodnog grijanja za višekatnu zgradu

Svi elementi cijevnog razvoda sustava grijanja koji služe za otvaranje ili zatvaranje, odnosno za povećavanje ili smanjivanje protoka ogrjevnog medija kroz cijevi nazivaju se **armaturom**. U armaturu se ubrajaju: ventili, zasuni, slavine, zaklopke. Svaki od tih dijelova armature također se može podijeliti u više skupina s obzirom na djelovanje, izvedbu i način pogona.

Zaporna armatura služi za odvajanje pojedinih komponenata instalacije radi možebitnih intervencija (otklanjanje kvara), te za uravnoteženje sustava.

Crpke ili pumpe su uređaji koji služe za prijenos fluida s niže na višu razinu, odnosno s nižeg tlaka na viši tlak. Osnovni zadatak cirkulacijskih crpki u sustavima toplovodnog centralnog grijanja je svladavanje svih otpora do kojih dolazi pri strujanju ogrjevnog medija (tj. tople vode) kroz instalaciju (izvor topline, cijevni razvod, ogrjevna tijela). Crpka se odabire na osnovi ukupnog pada tlaka u instalaciji sustava grijanja.

Kod sustava grijanja koji se sastoje od više krugova u pravilu se za svaki krug koristi po jedna crpka.

7.2.4.4 Ogrjevna tijela

Ogrjevno tijelo je komponenta sustava grijanja koja služi za predaju topline u prostor. Toplinu proizvedenu izvorom topline ogrjevno tijelo prenosi, s medija za prijenos topline, na zrak u prostoriji i time održava željenu temperaturu prostora. Toplina se s ogrjevnog tijela u prostoriju prenosi konvekcijom i zračenjem. Udjeli prijenosa topline konvekcijom i /ili zračenjem ovise o tipu ogrjevnog tijela.

U ogrjevna tijela se ubrajaju:

- radijatori,
- konvektori,

- zagrijači zraka ili kaloriferi,
- panelne ogrjevnne površine,
- površinski sustavi grijanja (podno, zidno, stropno grijanje),
- posebne izvedbe.

Radijatori mogu biti člankasti (alumijski radijatori), pločasti (čelični radijatori) ili cijevni (kupaonički radijatori) ili raznih posebnih izvedbi. Kod njih se izmjena topline odvija zračenjem i konvekcijom.

Člankasti radijatori se sastoje od većeg broja članaka koji se međusobno povezuju u baterije. Pločasti radijatori se izvedu od čeličnog lima s ravnim ili profiliranim čeonim pločama.

Tijelo radijatora je šuplje i kroz njega struji ogrjevni medij (topla ili vrela voda, para).

Prema materijalu izvedbe radijatori se dijele na:

- lijevanoželjezne (sve rjeđe se koriste),
- čelične,
- alumijske,
- od posebnih materijala.

Najpovoljnije mjesto smještaja radijatora, kojim se postiže prostorno najpravnomjernija temperatura unutarnjeg zraka, je položaj uz parapet ispod prozora. Na taj način hladni zrak koji prodire kroz prozor ne prelazi u zonu boravka, već se na toploj ogrjevnoj površini radijatora zagrijava i kruži kroz prostoriju.

Konvektori su ogrjevna tijela za sustav centralnog grijanja (toplovodni, vrelovodni ili parni) kod kojih se topline gotovo isključivo izmjenjuje konvekcijom. Sastoji se od jedne ili više cijevi s lamelama za izmjenu topline. Prema ostvarenju strujanja zraka dijele se na konvektore s prirodnom konvekcijom i konvektore s prisilnom konvekcijom ili ventilokonvektore.

Prema mjestu ugradnje konvektori se dijele na podne, zidne i s pokrovom.

Konvektori se u pravilu ugrađuju iza maske uz parapet ispod prozora, u zidna udubljenja te u podne kanale ispod velikih staklenih površina kako bi se spriječilo rošenje i zamagljivanje staklenih ploha.

Kaloriferi su ogrjevna tijela kod kojih se topline izmjenjuje isključivo konvekcijom. U kućište kalorifera usisava se zrak iz prostorije (postoji mogućnost miješanja s vanjskim svježim zrakom) koji se zagrijava prolaskom preko izmjenjivačkih ploha i djelovanjem ventilatora usmjerava u prostoriju.

Zračeći paneli su ogrjevna tijela centralnog grijanja velikih prostora kod kojih se najveći dio topline izmjenjuje zračenjem. Sastoji se od nosive ploče s metalnim plohamo koje imaju veliki koeficijent emisije i u koje su ugrađene cijevi kroz koje struji ogrjevni medij.

Površinski sustavi grijanja kao ogrjevno tijelo koriste građevne dijelove zgrade odnosno plohe prostorije: pod, zidove, strop, pri čemu se topline izmjenjuje zračenjem i konvekcijom. S obzirom na ogrjevnu plohu dijele se na podno grijanje, zidno grijanje, stropno grijanje. Kao izvori topline služe niskotemperaturni i kondenzacijski kotlovi, solarni sustavi i toplinske crpke. Prijenos topline s ogrjevne plohe u prostoriju ovisi o protoku ogrjevnog medija i njegovoj temperaturi, dimenziji i razmaku cijevi i ploštini ogrjevne plohe. Većina površinskih sustava grijanja koristi plastične cijevi (polietilen, polipropilen i dr.)

Cijevni razvod sustava površinskog toplovodnog grijanja sastoji se od:

- primarnog kruga kojeg čine polazni i povratni vodovi od izvora topline do razdjelnika, odnosno razdjelnog ormarića smještenog u prostoriji,
- sekundarnog kruga koji čine polazni i povratni vodovi ugrađeni u ogrjevnu plohu prostorije.

Podnim grijanjem postiže se najpovoljnija prostorna razdioba temperature zraka u prostoriji s gledišta toplinske ugodnosti. Zato temperatura zraka u prostoriji s podnim grijanjem može biti

za 1 do 2 °C niža u odnosu na slučaj radijatorskog grijanja, a da se ne izgubi osjećaj ugodnosti. 1 °C niža temperatura u prostoriji donosi uštedu od približno 6% energije za grijanje.

Površinski sustav grijanja može se kombinirati s radijatorskim grijanjem.

7.2.4.5 Dimovodni sustavi

Osnovni element dimovodnog sustava je dimnjak. To je vertikalni kanal u zgradi ili izvan zgrade koji služi za kontrolirano odvođenje u slobodnu atmosferu dimnih plinova, nastalih izgaranjem u ložištu nekog izvora topline. Kanal koji spaja ložište i dimnjak, a obično je u nekom nagibu, nazivamo dimni priključak.

Princip rada dimovodnog sustava temelji se na razlici gustoće vanjskog zraka i gustoće dimnih plinova, zbog čega nastaje podtlak u dimnjaku i strujanje dimnih plinova. Dimni plinovi imaju višu temperaturu nego okolni zrak stoga su specifično lakši i dižu se prema gore. Što je veća temperaturna razlika između dimnih plinova i okolnog zraka, te što je dimnjak viši, veći je i podtlak u dimnjaku.

Dimnjak mora osigurati podtlak dovoljan za svladavanje otpora kotla, spojne dimovodne cijevi i dimnjaka.

Prema vrsti izrade dimnjak može biti jednoslojni ili višeslojni, a prema izgledu presjeka: kružni, kvadratni, pravokutni ili ovalni.

Materijali za dimnjake i dimovodne priključke moraju biti negorivi i otporni na visoke temperature, kemijski otporni i nepropusni za plinove i kondenzate koji nastaju kao produkti sagorijevanja, dovoljno čvrsti za mehanička naprezanja i dovoljni toplinski izolatori.

7.2.4.6 Regulacija sustava grijanja

Potrebna korisna toplota za grijanje neke prostorije mijenja se tijekom vremena ovisno o vanjskim klimatskim uvjetima, unutarnjim izvorima topline, toplinskim gubitcima prostorije i drugim uvjetima. Usklađivanje učina ogrjevnih tijela i podsustava za proizvodnju topline s promjenjivom potrebnom toplinom, rješava se odgovarajućim sustavom regulacije.

S obzirom na mjesto zahvata, regulacija sustava grijanja može biti:

1 – pojedinačna, lokalna ili decentralna (omogućava regulaciju temperature zraka u svakoj prostoriji zgrade zasebno, najčešće pomoću sklopa termostatskog ventila i temperaturnog osjetnika unutar regulirane prostorije, koji služe za prilagođavanje rada ogrjevnih tijela promjenama relevantnih uvjeta u prostoriji),

2 – centralna (regulacija temperature zraka u svim prostorijama iz jednog centralnog mjesta prema temperaturi u referentnoj prostoriji ili prema temperaturi vanjskog zraka, prema kojoj se regulira temperatura polaznog voda).

Svi sustavi regulacije temelje se na zahtjevu da temperatura u grijanoj prostoriji ima željenu vrijednost. Regulacija se može provoditi na jedan od slijedećih načina rada:

- ručno (ručno upravljanim uređajem, bez potrošnje pomoćne energije, npr. termostatski radijatorski ventil),
- automatski (automatski upravljanim uređajem, bez djelovanja čovjeka, npr. sobni termostat),
- u funkciji vremena (isključenje ili smanjenje tijekom određenih razdoblja, npr. noću),
- s optimizacijom vremenskog upravljanja (isključenjem ili smanjenjem tijekom određenih razdoblja. Ponovno uključenje se optimira, ovisno o različitim kriterijima).

Potpuno automatska regulacija je najbolji, najkomfortniji i najštedljiviji način regulacije u sustavu centralnog grijanja. Za taj sustav regulacije postoje kompletni elektronski uređaji sa satnim mehanizmom i s osjetnicima temperature (vanjske, sobne i polaznog voda).

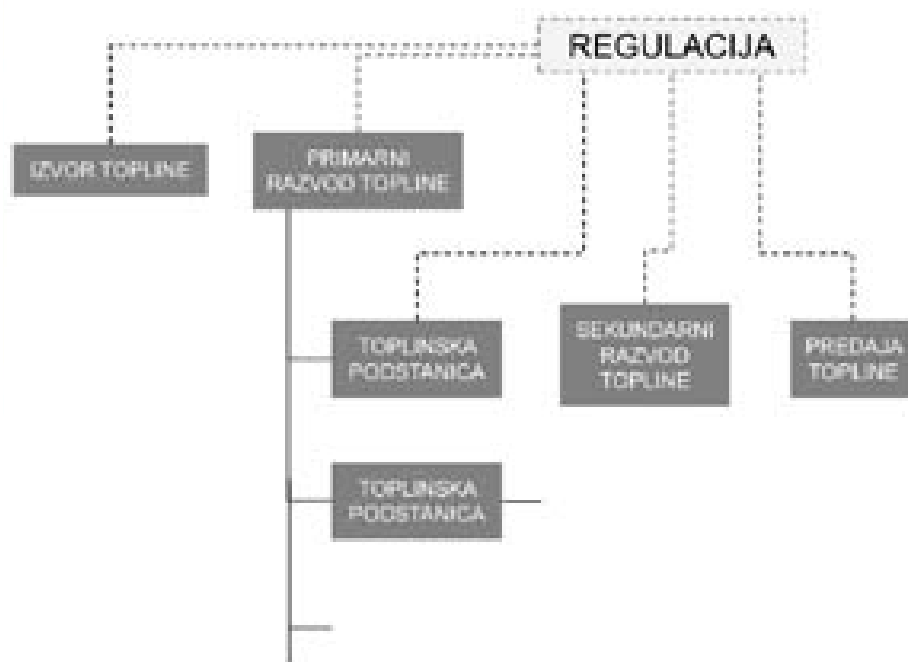
7.2.4.7 Sigurnosna oprema sustava grijanja

Sustav centralnog grijanja sastavljen je od niza složenih komponenti koje sve moraju ispravno funkcionirati da bi sustav zadovoljio potrebu grijanja. Međutim, ako je neki dio neispravan nije u pitanju samo grijanje, nego i eventualne štete pa i ostale opasnosti kojima su izloženi ukućani. Kako bi se to izbjeglo, u sustav grijanja moraju biti ugrađeni i sigurnosni elementi koji će isključiti takve rizike.

Sigurnosna oprema sustava centralnog toplovodnog grijanja uključuje sve elemente kojima se onemogućava prekoračenje najvećih dopuštenih vrijednosti radne temperature i tlaka. Tako su primjerice ekspanzijske posude dio sigurnosne opreme toplovodnih sustava centralnog grijanja čija je osnovna namjena preuzimanje toplinskih rastezanja vode zbog promjene njezine temperature.

7.2.5 Daljinsko grijanje

Daljinsko grijanje pripada posebnoj grupi centraliziranih sustava grijanja kod kojih je izvor topline u centralnoj toplani / termoelektrani-toplani iz koje se razvodnom mrežom toplina distribuira do toplinskih podstanica u zgradama, u kojima se preko izmjenjivača topline transformira za potrebe sustava grijanja i predaje na kućnu cijevenu mrežu. Daljinskim grijanjem mogu se grijati blokovi zgrada ili čitave gradske četvrti.



Slika 7.10 Shematski prikaz daljinskog grijanja

Primjer snabdijevanja topline kroz daljinsko grijanje je blokovska termoelektrana-toplana s kogeneracijom, kod koje plinskim ili diesel motorom pokrenuti generator proizvodi struju a otpadna topline iz rashladne vode i otpadnih dimnih plinova koristi se za grijanje, pripremu potrošne tople vode i za potrebe hlađenja.

Sustavi daljinskog grijanja mogu se podijeliti prema energetsom stanju prijenosnika energije i prema vrsti izvora topline u kojem se proizvodi toplinska energija.

Prema energetsom stanju prijenosnika energije sustavi daljinskog grijanja mogu biti:

- vrelovodni, s temperaturom vode $<120\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- vrelovodni, s temperaturom vode $>120\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- parovodni.

Prema vrsti izvora topline sustavi daljinskog grijanja mogu biti:

- sa zajedničkom proizvodnjom toplinske i električne energije u termoelektranama-toplanama u kojima se u kogeneracijskom procesu proizvode električna i toplinska energija,
- s blokovskim kotlovnica za proizvodnju isključivo toplinske energije, koje proizvode toplinsku energiju za manji broj stambenih zgrada uz koje se nalaze ili za veće zgrade javne namjene,
- sustavi industrijskog grijanja, pri čemu se otpadna toplina nastala korištenjem toplinske energije u proizvodno-tehnološkim procesima distribuira i koristi za grijanje zgrada u blizini tvornice.

Glavni dijelovi sustava daljinskog grijanja su:

- postrojenje za proizvodnju toplinske energije,
- razvodna mreža (toplovodi, vrelovodi, parovodi),
- toplinske podstanice,
- kućne instalacije grijanja (sustav grijanja zgrade).

Razvodna mreža (toplovodi, vrelovodi, parovodi) služi za distribuciju toplinske energije od objekta u kojem je smješten izvor topline (toplana, termoelektrana) do zgrade potrošača. Razvodna mreža toplovoda i vrelovoda sastoji se od dvije cijevi: polazne i povratne, koje osiguravaju cirkulaciju vrele vode kao prijenosnika energije od objekta izvora do zgrade potrošača. Isključivo se koriste čelične cijevi koje moraju biti dobro toplinski izolirane.

Toplinske podstanice su prostorije u zgradama potrošača u kojima su smještene instalacije za mjerenje, transformaciju i regulaciju potrošnje toplinske energije prema potrebama potrošača. Toplinske podstanice direktnog tipa su izvedene tako da vrela voda koja se kroz distributivnu mrežu do njih prenosi, uz određenu regulaciju, neposredno ulazi u sustav grijanja (kućnu instalaciju) zgrade (koristi se kod starijih sustava daljinskog grijanja). Toplinske podstanice indirektnog tipa su izvedene tako da vrela voda koja se kroz distributivnu mrežu do njih prenosi izmjenjuje toplinu s prijenosnikom energije (vodom) sustava grijanja zgrade preko izmjenjivača topline.

Danas postoje **kompaktne toplinske stanice** kao gotov proizvod koji u sebi sadržava sve potrebne komponente za ispravno funkcioniranje sustava grijanja zgrade. One se spajaju s jedne strane na distribucijski vrelovodni sustav, a s druge strane na sustav grijanja, odnosno kućnu instalaciju zgrade.

7.2.6 Potrebna konačna energija za rad sustava za grijanje prostora zgrade

7.2.6.1 Principi proračuna

Potrebna korisna energija za grijanje prostora je količina topline koja se mora isporučiti (predati) u grijani prostor tijekom određenog vremenskog razdoblja da bi se održala postavna temperatura zraka u prostoru, ne uzimajući pri tome u obzir sustav za grijanje zgrade. Potrebna korisna energija određuje se proračunom i ne može se izmjeriti. Metodologija proračuna dana je u točki 6.

Potrebna konačna energija za rad sustava za grijanje ili potrošnja energije za grijanje prostora je ulazna energija u sustav za grijanje potrebna za zadovoljenje (pokrivanje) potrebne korisne energije za grijanje. Ona je jednaka zbroju potrebne korisne energije za grijanje i svih toplinskih gubitaka sustava za grijanje, te pomoćne energije koju rabi sustav grijanja. Izražava se potrebnom količinom nositelja energije (energenata) koje treba predati sustavu grijanja na granici sustava.

Toplinski gubitak sustava za grijanje je količina topline proizvedena sustavom grijanja koja ne doprinosi grijanju prostora. Toplinski gubitak sustava za grijanje, ako je povratan, može postati unutarnjim toplinskim dobitkom. **Povrati toplinski gubitak sustava** za grijanje je dio toplinskog gubitka sustava koji se može vratiti, bilo za smanjenje potrebne korisne energije za grijanje, bilo za smanjenje potrošnje konačne energije sustava za grijanje, ovisno o odabranom proračunskom pristupu za vraćene toplinske gubitke (holistički ili pojednostavnjeni pristup).

Vraćeni toplinski gubitak sustava za grijanje je dio povratnog toplinskog gubitka sustava koji je vraćen, ili za smanjenje potrebne korisne energije za grijanje, ili za smanjenje potrošnje konačne energije sustava za grijanje. Toplinska energija koja je vraćena izravno u sustav za grijanje ne smatra se toplinskim gubitkom sustava već vraćenom toplinom. **Vraćena toplota** je toplota proizvedena sustavom za grijanje koja se izravno koristi u sustavu grijanja za smanjenje ulazne topline, a koja bi inače bila odbačena.

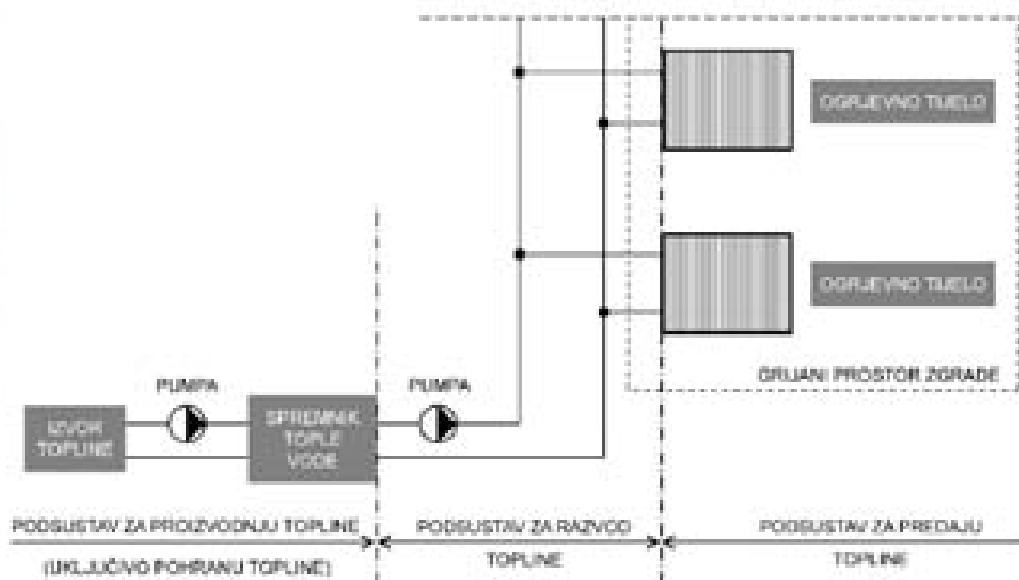
Pomoćna energija je električna energija koju rabi sustav za grijanje zgrade kao potporu za pretvorbu energije da bi se zadovoljila potrebna korisna energija za grijanje, a ne za neposredno pokrivanje potrebne topline za grijanje. Ona uključuje energiju za rad crpki, ventilatora, elektronike itd.

Metoda proračuna toplinskih gubitaka sustava za grijanje prostora i pomoćne energije zasniva se na analizi energetske učinkovitosti slijedećih podsustava sustava za grijanje:

- podsustava za predaju topline u prostor, uključivo regulaciju,
- podsustava za razvod topline, uključivo regulaciju,
- podsustava za pohranu topline, uključivo regulaciju,
- podsustava za proizvodnju topline, uključivo regulaciju (npr. kotao, toplinska pumpa, kogeneracijsko postrojenje,...).

Ova struktura proračuna odgovara fizičkoj strukturi sustava grijanja.

Podsustav za pohranu topline može biti uključen u podsustav za proizvodnju ili detaljno opisan kao podsustav za pohranu.



Slika 7.11 Shematski prikaz podjele sustava grijanja zgrade na funkcionalne podsustave

Podsustav za predaju topline u prostor je procesno područje u sustavu grijanja zgrade pomoću kojeg se toplota predaje u prostor, radi održavanja željene toplinske ugodnosti.

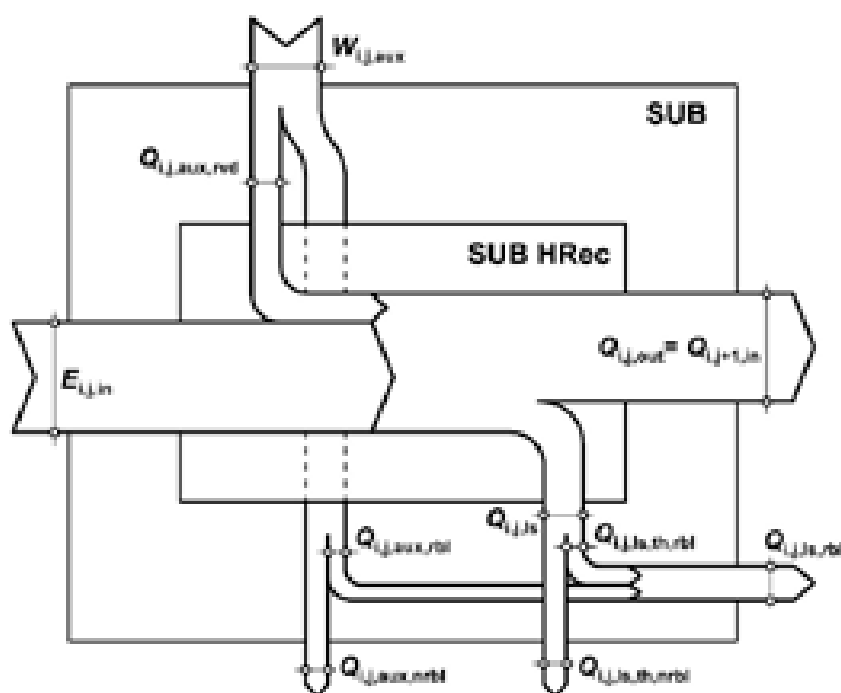
Podsustav za razvod topline je procesno područje sustava grijanja zgrade u kojem se prenosi potrebna količina topline od izvora topline do podsustava za predaju topline u prostor.

Podsustav za pohranu topline je procesno područje sustava grijanja zgrade u kojem je pohranjena topline sadržana u jednom mediju.

Podsustav za proizvodnju topline (izvor topline) je procesno područje u sustavu grijanja zgrade u kojem se za sustav grijanja priprema potrebna količina topline.

Potrebna konačna energije za rad sustava za grijanje proračunava se odvojeno za toplinsku energiju i za pomoćnu energiju (električna energija).

Slika 7.12 prikazuje ulazne i izlazne podatke za neki podsustav j tehničkog sustava zgrade i (vrijedi za sustav grijanja i za sustav pripreme potrošne tople vode), koji se koriste kod proračuna.



Slika 7.12 Ulazni i izlazni podaci za podsustav j , tehničkog sustava zgrade i , (bilanca energije)

Simboli i kratice na slici 7.12 imaju slijedeća značenja:

SUB	granica bilance energije podsustava j ,
SUB HRec	granica vraćene topline podsustava j ,
$Q_{i,j,out}$	izlazna topline iz podsustava j (jednaka je $Q_{i,j+1,in}$ – ulaznoj toplini u idući podsustav ($j+1$) ili u više podsustava),
$E_{i,j,in}$	ulaz nositelja energije u podsustav j ,
$W_{i,j,aux}$	pomoćna energija podsustava j ,
$Q_{i,j,aux,rvd}$	vraćena topline pomoćne energije podsustava j u podsustav j ,
$Q_{i,j,ls}$	toplinski gubitak podsustava j ,
$Q_{i,j,ls,rbl}$	povratni toplinski gubitak podsustava j za grijanje prostora (ne u podsustav),
$Q_{i,j,ls,th,rbl}$	povratni toplinski gubitak (toplinski dio) podsustava j za grijanje prostora,
$Q_{i,j,aux,rbl}$	povratna pomoćna energija podsustava j ,
$Q_{i,j,ls,th,nrbl}$	nepovratni toplinski gubitak (toplinski dio) podsustava j ,
$Q_{i,j,aux,nrbl}$	nepovratna pomoćna energija podsustava j .

Indeks j treba zamijeniti odgovarajućim indeksom podsustava:

em za podsustav za predaju topline u prostor,
 dis za podsustav za razvod topline,
 st za podsustav za pohranu topline,
 gen za podsustav za proizvodnju topline.

Na osnovi podataka na slici 7.12 izlazni podaci proračuna podsustava moraju sadržavati:

- ulazne energije u podsustav j : nositelja energije $E_{system,sub-system,in}$, toplinsku energiju $Q_{system,sub-system,in}$, i električnu energiju $E_{el,sub-system,in}$ (npr. $E_{HW,gen,in}$, $Q_{H,em,in}$, $E_{el,gen,in}$),
- izlazne energije iz podsustava j : toplinsku energiju $Q_{system,sub-system,out}$ i električnu energiju (ako je relevantno) $E_{el,sub-system,out}$ (npr. $Q_{H,gen,out}$, $E_{el,chn,out}$),
- toplinski gubitak sustava za podsustav j : $Q_{system,sub-system,ls}$ (npr. $Q_{HW,gen,ls}$),
- pomoćnu energiju za podsustav j : $W_{system,sub-system,aux}$ (npr. $W_{W,gen,aux}$),
- povratni toplinski gubitak sustava za podsustav j : $Q_{system,sub-system,ls,rbl}$ (npr. $Q_{H,gen,ls,rbl}$).

Proračun se može zasnivati na tabličnim vrijednostima ili detaljnijim metodama.

Toplinske gubitke sustava treba proračunati odvojeno za svako proračunsko razdoblje s prosječnim vrijednostima vezanim uz odabrano razdoblje. Rezultati proračuna se zbrajaju za sva vremenska razdoblja tijekom godine.

Osnovna proračunska jedinica je, u pravilu, zona zgrade. Smjer proračuna energije kreće od potrebne korisne energije prema primarnoj energiji tj. suprotan je od toka energije u sustavu. Proračun je podijeljen u skladu s pojedinim podsustavima sustava grijanja (predaja topline u prostor, razvod, pohrana, proizvodnja).

Za svaki podsustav i proračuna se njegov toplinski gubitak sustava, $Q_{H,i,ls}$, i doda se izlaznoj toplini iz podsustava, kako bi se za taj podsustav odredila potrebna ulazna toplina u podsustav.

Pomoćna energija, $W_{H,i,aux}$, ako postoji, proračunava se odvojeno i ona doprinosi gubitcima energije podsustava.

Treba razlikovati između:

- dijelova toplinskih gubitaka sustava, koji su povratni za grijanje prostora, i
- dijelova toplinskih gubitaka sustava koji su vraćeni izravno u podsustav i koji se stoga oduzimaju od toplinskih gubitaka sustava toga podsustava.

Povratni toplinski gubici sustava za grijanje prostora su ulazne veličine za proračun vraćenih toplinskih gubitaka. Vraćeni toplinski gubitak sustava oduzima se od potrebne korisne energije za grijanje prostora zgrade (holistički pristup) ili od potrošnje konačne energije za rad sustava grijanja (pojednostavnjeni pristup).

Toplinski gubici sustava vraćeni u podsustav (vraćena toplina) poboljšavaju energetska svojstva podsustava (npr. vraćeni gubici iz dimnjaka za predgrijanje zraka za gorenje).

Primjer s redoslijedom proračuna sustava za grijanje prostora dan je u tablici 7.2, na temelju rezultata proračuna za svaki pojedini njegov podsustav.

Tablica 7.2 Primjer s redoslijedom proračuna toplinskih gubitaka za sustav za grijanje prostora (prema HRN EN 15316-1 [112])

			A	B	C
			Potrebna korisna energija za grijanje prostora $Q_{H,nd}$		
L1		kWh/razdoblje	100		

	Gubitci sustava		Toplinski gubitak sustava $Q_{H,i,ls}$	Pomoćna energija $W_{H,i,aux}$	Povratni toplinski gubitak sustava $Q_{H,i,ls,rbl}$
L2	Podsustav predaje topline u prostor (i=em)	kW×h/razdoblje	10	2	2
L3	Ulaz u podsustav predaje topline u prostor (L1+L2)	kW×h/razdoblje	110	2	2
L4	Podsustav razvoda (i=dis)	kW×h/razdoblje	15	4	10
L5	Ulaz u podsustav razvoda (L3+L4)	kW×h/razdoblje	125	6	12
L6	Podsustav pohrane (i=st)	kW×h/razdoblje	-	0	0
L7	Ulaz u podsustav pohrane (L5+L6)	kW×h/razdoblje	125	6	12
L8	Podsustav za proizvodnju (i=gen)	kW×h/razdoblje	25	1	16
L9	Ulaz u podsustav za proizvodnju (L7+L8)	kW×h/razdoblje	150	7	28

Toplinski gubitci sustava vraćeni u zgradu (kao pozitivni ili negativni toplinski dobitci iz toplih ili hladnih izvora) već su uzeti u obzir u potrebnoj korisnoj energiji za grijanje (i hlađenje), osim ako je proveden alternativni pojednostavljeni pristup.

U tablici 7.3 dan je primjer kako se mogu prikazati rezultati proračuna (u skladu sa zahtijevanim ulaznim podacima za daljnje proračune prema poglavlju 8).

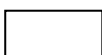
Isti sustav grijanja može se protezati i preko više zona ili jedna zona može biti opskrbljena s više različitih sustava grijanja.

Ako je primjenjivo za konkretni slučaj, tablica 7.3 se ponavlja za svaku skupinu zona zgrade ako postoje različiti sustavi opsluživanja (grijanja) i različite skupine zona. U posebnoj tablici 7.3 napravi se rekapitulacija zbrajanjem rezultata po skupinama zona, kako bi se dobile vrijednosti za čitavu zgradu.

Tablica 7.3 Proračun potrebne konačne energije za rad sustava za grijanje za pojedinu zonu, grupe zona ili cijelu zgradu

Potrošnja energije	Nositelji energije (energenti)							
	Toplina	Lož ulje	Plin	Ugljen	Daljinsko grijanje	Drvo	Električna energija	Energent <i>n</i>
Potrebna energija za grijanje, $Q_{H,nd}$								
Toplinski gubitci sustava za sustav za grijanje, $Q_{H,ls}$								
Potrebna konačna energija za sustav za grijanje, $E_{H,i}$								
Pomoćna energija za sustav za grijanje, $W_{H,aux}$								
Ukupno								

 Sivo polje: nije primjenjivo

 Bijelo polje: ulazni podatak moguć ili zahtjevan

Godišnja potrebna konačna energija za grijanje, $Q_{H,sys}$, može se izračunati i pomoću izraza:

$$Q_{H,sys} = \frac{Q_{H,nd}}{\eta_{H,sys}} \quad (7.2)$$

gdje je:

$Q_{H,sys}$ godišnja potrebna konačna energija za rad sustava za grijanje, uključivo toplinske gubitke sustava, u MJ,

$Q_{H,nd}$ godišnja potrebna korisna energija za grijanje prostora, koju pribavlja promatrani sustav za grijanje, u MJ,

$\eta_{H,sys}$ ukupni stupanj djelovanja (energetska efikasnost) sustava za grijanje, uključivo toplinske gubitke proizvodnje, pohrane, razvoda, predaje u prostor i regulacije.

Ovaj način proračuna treba dati isti rezultat kao i prethodni.

7.2.6.2 Pokazatelji energetske učinkovitosti (energetskog svojstva) sustava ili podsustava za grijanje prostora

Stupanj djelovanja (energetska efikasnost), η , podsustava *i* definira se kao:

$$\eta_i = \frac{(Q_{i,out} + f_j \times E_{el,i,out})}{f_y \times Q_{i,in} + f_z \times W_{i,aux}} \quad (7.3)$$

gdje je:

f_j, f_y, f_z faktori (ili koeficijenti) pretvorbe energije, dani u nacionalnim propisima,
 $E_{el,i,out}$ izlazna električna energija iz podsustava i ,
 $Q_{i,out}$ izlazna toplina iz podsustava i ,
 $Q_{i,in}$ ulazna toplina u podsustav i ; Q se zamjeni s E ako ulazna energija nije toplina,
 $W_{i,aux}$ pomoćna energija za podsustav i .

Stupanj djelovanja (energetska efikasnost) je bezdimenzionalna veličina koja se upotrebljava kao pokazatelj učinkovitosti tehničkog sustava / podsustava zgrade. Stupnjevi djelovanja se mogu za pojedine podsustave posebno proračunati (npr. stupanj djelovanja razvoda topline, stupanj djelovanja proizvodnje topline,...). Stupanj djelovanja služi za izravnu usporedbu učinkovitosti različitih vrsta sustava ili podsustava.

Jednadžba (7.3) je vrlo općenita. Svi se parametri ne primjenjuju na sve vrste podsustava.

Stupanj djelovanja podsustava za predaju topline u prostor je omjer izlazne energije podsustava (koja je jednaka potrebnoj korisnoj energiji za grijanje prostora) i ulazne energije u podsustav predaje, uzimajući u obzir toplinske gubitke podsustava i pomoćnu energiju.

Stupanj djelovanja podsustava razvoda topline je omjer izlazne energije podsustava razvoda i ulazne energije u podsustav razvoda, uzimajući u obzir toplinske gubitke podsustava i pomoćnu energiju.

Stupanj djelovanja podsustava za proizvodnju topline je omjer izlazne energije podsustava proizvodnje i ulazne energije u podsustav proizvodnje (jednak potrošnji energije za rad sustava grijanja), uzimajući u obzir toplinske gubitke podsustava i pomoćnu energiju.

Ukupan stupanj djelovanja (energetsku efikasnost) cijelog tehničkog sustava za grijanje prostora treba proračunati nakon zbrajanja toplinskih gubitaka sustava i utvrđivanja ulaznih energija svih relevantnih podsustava.

Drugi način izražavanja energetske učinkovitosti (energetskog svojstva) sustava ili podsustava je **faktor utroška energije e** . Njegov izraz je recipročan izrazu za stupanj djelovanja.

7.2.6.3 Energetski gubitci sustava za grijanje prostora

Toplinski gubitci sustava za grijanje prostora bez podsustava za proizvodnju topline koji pripadaju toj zgradi, $Q_{H,ngen,ls}$, proračunavaju se na slijedeći način:

$$Q_{H,ngen,ls} = Q_{H,em,ls} + Q_{H,dis,ls} \quad (7.4)$$

gdje su:

$Q_{H,em,ls}$ toplinski gubitci sustava za podsustav predaje topline u prostor,
 $Q_{H,dis,ls}$ toplinski gubitci sustava za podsustav razvoda topline.

Kada podsustav za pohranu topline nije uključen u podsustav za proizvodnju topline, izrazu (7.4) dodaje se član $Q_{H,st,ls}$ koji predstavlja toplinske gubitke sustava za podsustav za pohranu topline.

Povratni toplinski gubitci sustava za grijanje prostora bez podsustava za proizvodnju topline koji pripadaju toj zgradi, $Q_{H,ngen,ls,rbl}$, proračunavaju se na slijedeći način:

$$Q_{H,ngen,ls,rbl} = Q_{H,em,ls,rbl} + Q_{H,dis,ls,rbl} \quad (7.5)$$

gdje su:

$Q_{H,em,ls,rbl}$ povratni toplinski gubitci sustava za podsustav predaje topline u prostor,
 $Q_{H,dis,ls,rbl}$ povratni toplinski gubitci sustava za podsustav razvoda topline.

Pomoćna energija sustava za grijanje prostora bez podsustava za proizvodnju topline koji pripadaju toj zgradi, $W_{H,ngen,aux}$, proračunava se na slijedeći način:

$$W_{H,ngen,aux} = W_{H,em,aux} + W_{H,dis,aux} \quad (7.6)$$

gdje je:

$W_{H,em,aux}$ pomoćna energija za podsustav predaje topline u prostor,
 $W_{H,dis,aux}$ pomoćna energija za podsustav razvoda topline.

Kada podsustav za pohranu topline nije uključen u podsustav za proizvodnju topline, izrazu (7.6) dodaje se član $W_{H,st,aux}$ koji predstavlja pomoćnu energiju za podsustav za pohranu topline.

7.2.6.4 Pojednostavnjene i detaljne (detaljne) metode za proračun energetske gubitaka sustava

Za svaki podsustav mogu se koristiti pojednostavnjene ili detaljne metode proračuna za određivanje energetske gubitaka sustava. Za različite podsustave u sustavu grijanja smiju se primijeniti različite razine pojedinosti. Bitno je da rezultati proračuna daju slijedeće izlazne vrijednosti za podsustav:

- ulaznu energiju u podsustav,
- izlaznu energiju iz podsustava,
- toplinske gubitke sustava za promatrani podsustav,
- povratne toplinske gubitke sustava za promatrani podsustav,
- pomoćnu energiju za promatrani podsustav.

Za proračun toplinskih gubitaka sustava, povratnih toplinskih gubitaka sustava i pomoćne energije za sustave grijanja koristi se metodologija iz niza normi HRN EN 15316 od [112] do [125].

7.2.6.5 Podsustav proizvodnje topline – toplinski kotao

Postupak proračuna energetske učinkovitosti podsustava za proizvodnju topline – toplinskog kotla, uzima u obzir toplinske gubitke i vraćenu toplinu uslijed slijedećih fizikalnih čimbenika:

- ukupnog gubitka topline kroz dimnjak tijekom pogona kotla,
- ukupnog gubitka topline kroz oblogu kotla tijekom pogona kotla,
- potrošnje pomoćne energije (za pogon pumpi, plamenika,...).

Osnovna bilanca energije podsustava za proizvodnju – toplinskog kotla, dana je izrazom:

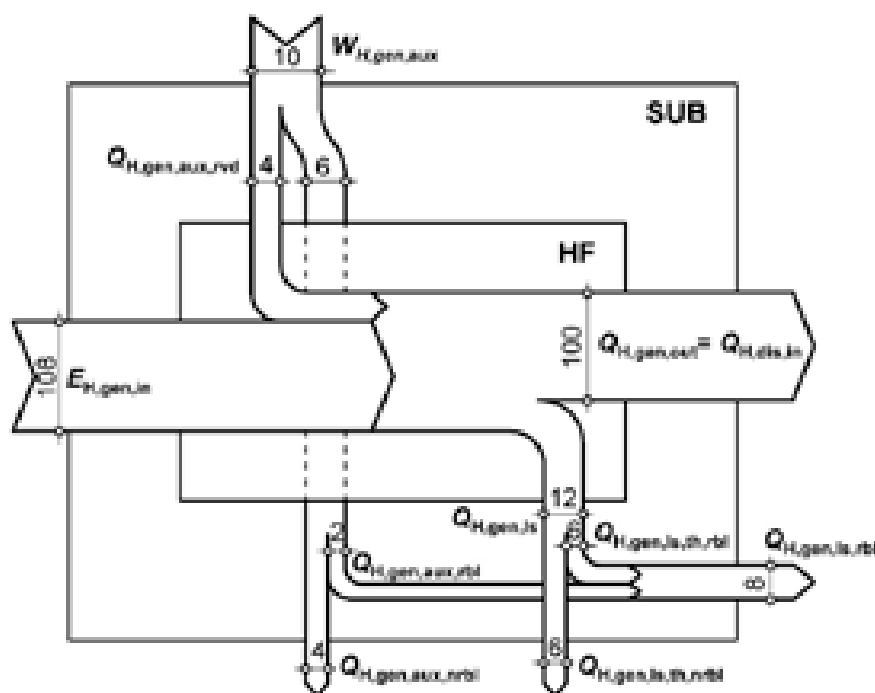
$$E_{H,gen,in} = Q_{H,gen,out} - Q_{H,gen,aux,rvd} + Q_{H,gen,ls} \quad (7.7)$$

gdje je:

$E_{H,gen,in}$ potrebna energija za rad podsustava za proizvodnju (ulaz nositelja energije u podsustav),
 $Q_{H,gen,out}$ izlazna toplina iz podsustava za proizvodnju (jednaka ulaznoj energiji u podsustav razvoda topline za grijanje prostora i / ili potrošne tople vode),
 $Q_{H,gen,aux,rvd}$ u podsustav vraćena pomoćna energija podsustava za proizvodnju,
 $Q_{H,gen,ls}$ ukupni toplinski gubici podsustava za proizvodnju topline (kroz dimnjak, oblogu kotla,...).

Kotao može služiti kao izvor topline za grijanje prostora ili za grijanje potrošne tople vode ili za oboje. Ukoliko kotao proizvodi toplinu za grijanje prostora i za grijanje potrošne tople vode, indeks H treba zamijeniti s HW.

Na slici 7.13 prikazan je primjer rezultata proračuna ulaznih i izlaznih veličina za podsustav za proizvodnju – toplinski kotao.



Slika 7.13 Primjer rezultata proračuna ulaznih i izlaznih podataka podsustava za proizvodnju topline (bilanca energije)

Simboli i kratice na slici 7.13 imaju slijedeća značenja:

SUB	granica bilance energije podsustava za proizvodnju,
HF	granica bilance energije za energent (gorivo),
$Q_{H,gen,out}$	izlazna toplina iz podsustava za proizvodnju (jednaka je $Q_{H,dis,in}$ – ulaznoj toplini u podsustav za razvod topline),
$E_{H,gen,in}$	ulaz nositelja energije u podsustav za proizvodnju,
$W_{H,gen,aux}$	ukupna pomoćna energija podsustava za proizvodnju,
$Q_{H,gen,aux,rvd}$	vraćena toplina pomoćne energije podsustava za proizvodnju,
$Q_{H,gen,ls}$	ukupni toplinski gubitak podsustava za proizvodnju,
$Q_{H,gen,ls,rbl}$	za grijanje prostora, povratni toplinski gubitak podsustava za proizvodnju,
$Q_{H,gen,ls,th,rbl}$	za grijanje prostora, povratni toplinski gubitak podsustava za proizvodnju (toplinski dio),
$Q_{H,gen,aux,rbl}$	povratna pomoćna energija podsustava za proizvodnju,
$Q_{H,gen,ls,th,nrbl}$	nepovratni toplinski gubitak podsustava za proizvodnju (toplinski dio),
$Q_{H,gen,aux,nrbl}$	nepovratna pomoćna energija podsustava za proizvodnju.

Za proračun navedenih ulaznih i izlaznih podataka koristi se metodologija iz norme HRN EN 15316-4-1 [118]. Za toplinske kotlove na bio-masu koristi se metodologija iz norme HRN EN 15316-4-7 [124].

7.2.6.6 Podsustav proizvodnje topline – toplinski solarni sustav

Utjecaj toplinskog solarnog sustava na energetska svojstva (energijsko svojstvo) zgrade obuhvaća slijedeće:

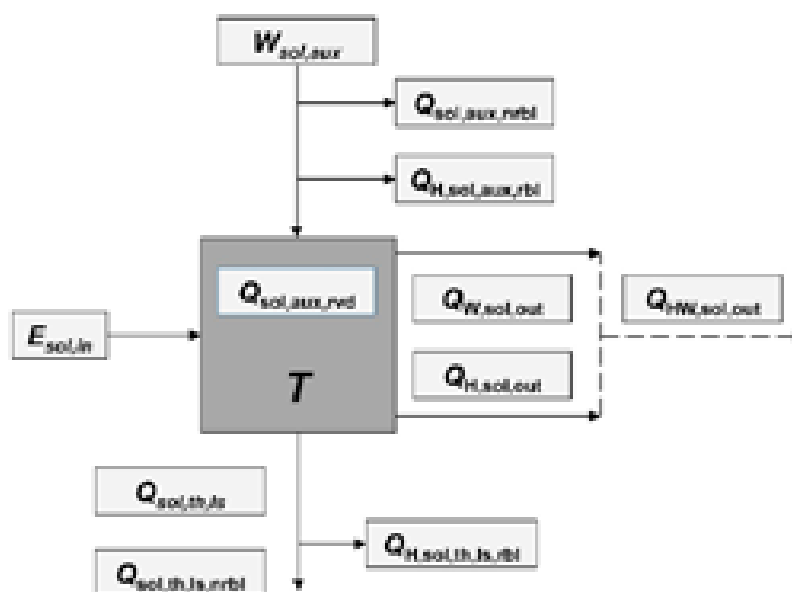
- količinu topline koju toplinski solarni sustav predaje u sustav razvoda (za grijanje prostora i / ili za potrošnu toplu vodu), čime se smanjuje potrošnja druge topline u zgradi, npr. uobičajeno (konvencionalno) proizvedene,
- vraćene toplinske gubitke iz toplinskog solarnog sustava upotrijebljene za grijanje prostora, čime se smanjuje potrošnja topline za grijane prostore zgrade,
- električnu energiju koju treba isporučiti toplinskom solarnom sustavu, čime se povećava potrošnja električne energije u zgradi,

- smanjeno vrijeme rada uobičajenog (konvencionalnog) izvora topline. U nekim se slučajevima može uobičajeno dodatno grijanje isključiti tijekom ljeta, čime se smanjuju toplinski gubici za stanje pripravnosti i potrošnja pomoćne električne energije.

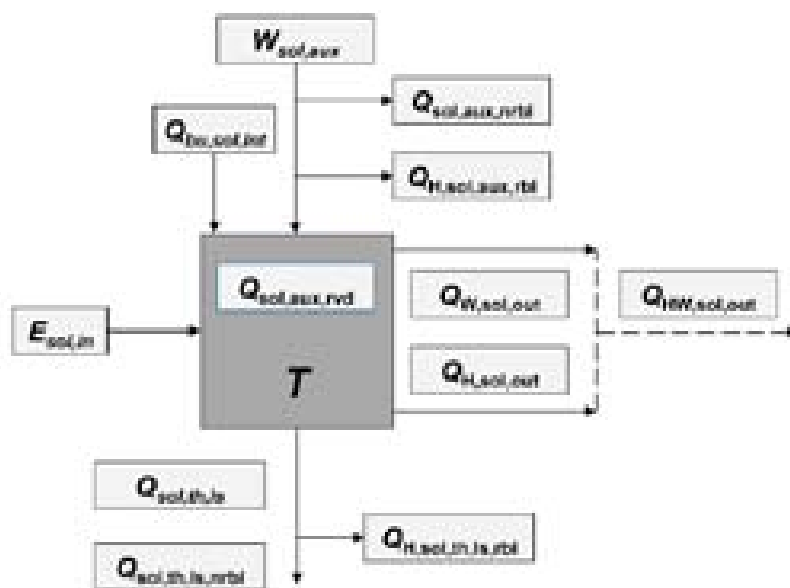
Kod energetskog proračuna solarnog toplinskog sustava potrebno je odrediti izlaznu toplinu iz sustava, potrošnju pomoćne energije, povratne toplinske gubitke i druge potrebne izlazne podatke za proračun energetskog svojstva zgrade s toplinskim solarnim sustavom, a koji su u vezi sa solarnim sustavom. Kod toga se kao ulazni podatci mogu koristiti rezultati ispitivanja ili zadane ulazne vrijednosti koje se odnose na čitav solarni sustav ili na pojedine komponente sustava.

Na slici 7.14 prikazana je bilanca topline za toplinski solarni sustav isključivo na energiju Sunčevog zračenja, a na slici 7.15 za solarni sustav s dodatnim izvorom topline. Upotrijebljene oznake na tim slikama imaju slijedeće značenje:

T	toplinski solarni sustav,
$E_{sol,in}$	upadna Sunčeva energija na ravninu kolektora,
$Q_{W,sol,out}$	toplina koju toplinski solarni sustav isporučuje sustavu razvoda za potrošnu toplu vodu,
$Q_{H,sol,out}$	toplina koju toplinski solarni sustav isporučuje sustavu razvoda za grijanje prostora,
$Q_{HW,sol,out}$	ukupna toplina koju toplinski solarni sustav isporučuje sustavu razvoda za grijanje prostora i za potrošnu toplu vodu,
$W_{sol,aux}$	električna pomoćna energija za pumpe i regulaciju,
$Q_{H,sol,aux,rbl}$	povratna električna pomoćna energija za pumpe i regulaciju. To je dio električne pomoćne energije koji se može vratiti za grijanje prostora,
$Q_{sol,aux,rvd}$	vraćena pomoćna električna energija za pumpe i regulaciju. To je dio pomoćne električne energije koji je prešao kao korisna toplina u toplinski solarni sustav,
$Q_{sol,aux,nrbl}$	nepovratna električna pomoćna energija za pumpe i regulaciju. To je dio pomoćne električne energije koji se ne može vratiti za grijanje prostora niti prijeći kao korisna toplina u toplinski solarni sustav,
$Q_{sol,th,ls}$	ukupni toplinski gubici toplinskog solarnog sustava,
$Q_{H,sol,th,ls,rbl}$	toplinski gubici toplinskog solarnog sustava koji se mogu vratiti za grijanje prostora,
$Q_{sol,th,ls,nrbl}$	nepovratni toplinski gubici toplinskog solarnog sustava. To je dio ukupnih toplinskih gubitaka koji se ne može vratiti za grijanje prostora,
$Q_{bu,sol,int}$	potrebna ulazna interna dodatna toplina.



Slika 7.14 Bilanca topline za toplinski solarni sustav bez dodatnog izvora topline



Slika 7.15 Bilanca topline za toplinski solarni sustav s dodatnim izvorom topline

Za rad toplinskog solarnog sustava potrebna je pomoćna energija, npr. za rad cirkulacijske pumpe, sustava regulacije i sustava zaštite od smrzavanja.

Povratni toplinski gubici, $Q_{H,sol,th,ls,rbl}$, su npr. toplinski gubici iz razvoda između solarnog dijela sustava i dodatnog grijača te toplinski gubici spremnika.

Da bi se odredio utjecaj solarnog toplinskog sustava na energetske svojstvo zgrade tj. energetske uštede ostvarene ugradnjom solarnog toplinskog sustava, moraju se provesti dva proračuna:

- proračun potrošnje primarne energije za zgradu bez solarnog toplinskog sustava, C_0 ,
- proračun potrošnje primarne energije za zgradu sa solarnim toplinskim sustavom, C_1 .

Energetska ušteda zbog ugradnje solarnog toplinskog sustava, S_{sol} , iznosi:

$$S_{sol} = C_0 - C_1 \quad (7.8)$$

Metodologija proračuna potrebne energije za toplinske solarne sustava dana je u HRN EN 15316-4-3 [120].

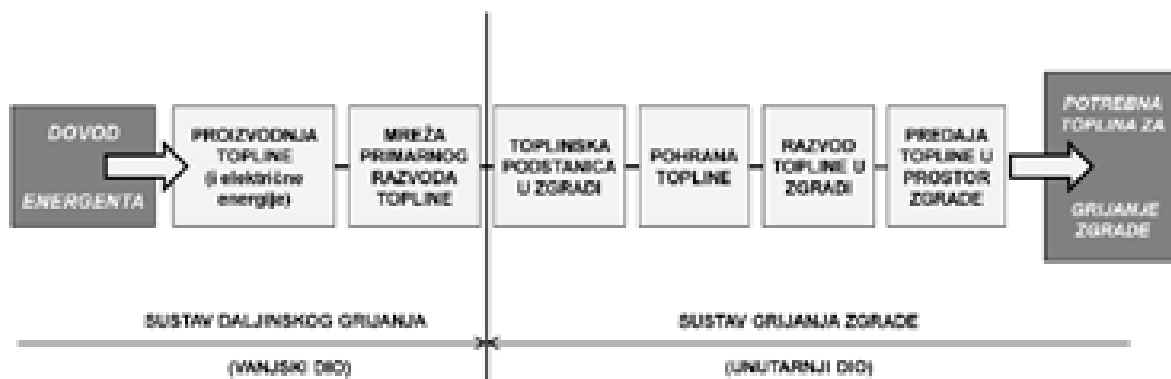
7.2.6.7 Metode proračuna za daljinsko grijanje

Energetska učinkovitost sustava daljinskog grijanja procjenjuje se tako da se sustav podjeli na dva dijela:

- vanjski dio, to znači dijelove sustava koji se nalaze izvan zgrade
- unutarnji dio, to znači dijelove sustava koji se nalaze unutar zgrade.

Vanjski dio je sustav daljinskog grijanja, koji se sastoji od uređaja za proizvodnju topline i mreže daljinskog grijanja sve do primarne strane podstanice u zgradi. Sustav daljinskog grijanja procjenjuje se na osnovi bilance potrošnje primarne energije za proizvodnju topline i topline isporučene podstanicama zgrada.

Unutarnji dio sustava daljinskog grijanja je toplinska podstanica u zgradi, uključivo sve sustave od njene primarne strane do sustava grijanja zgrade. Podstanica zgrade procjenjuje se na osnovi njene dodatne zahtijevane energije. Toplinska podstanica može se stoga promatrati kao izvor topline u zgradi.



Slika 7.16 Raščlamba procjene energetske učinkovitosti sustava daljinskog grijanja

Faktori primarne energije za dio sustava daljinskog grijanja koji se nalazi izvan zgrade

Energetska učinkovitost sustava daljinskog grijanja može se procijeniti kroz ocjenu faktora primarne energije, $f_{P,dh}$, dotičnog sustava daljinskog grijanja. Faktor primarne energije sustava daljinskog grijanja definiran je kao omjer ulazne primarne energije u sustav, $E_{P,in}$, i topline isporučene na granici zgrada koje se opskrbljuju tj. primarnoj strani toplinskih podstanica u zgradama, Q_{del} . Time su toplinski gubici mreže grijanja uzeti u obzir kao i sva druga energija utrošena na dobivanje, pripremu, preradu i prijevoz goriva za proizvodnju topline. Faktor primarne energije, $f_{P,dh}$, proračuna se, dakle, pomoću izraza:

$$f_{P,dh} = \frac{E_{P,in}}{Q_{del}} \quad (7.9)$$

gdje je:

$E_{P,in}$ ulazna primarna energija u sustav,

Q_{del} isporučena toplotina na granici zgrada koje se opskrbljuju toplotom.

Faktor ukupne primarne energije veći je od jedan ili jednak jedinici, dok je faktor obnovljive primarne energije veći od nule ili jednak nuli. U slučaju kogeneracije topline i električne energije koja se osniva na obnovljivoj energiji, kao npr. bioplin, mogu se pojaviti negativni faktori obnovljive primarne energije. Oni se tada uzimaju da su jednaki nuli.

Faktori primarne energije za goriva i električnu struju dani su u tablici 8.7.

Toplinski gubici u toplinskoj podstanici zgrade i za nju utrošena pomoćna energija ne uzimaju se u obzir kao dio sustava daljinskog grijanja već kao dio sustava grijanja zgrade.

Načelno je bilanca energije dana izrazom:

$$f_{P,dh} \times \sum_j Q_{del,j} + f_{P,el} \times E_{el,chp} = \sum_i f_{P,F,i} \times E_{F,i} \quad (7.10)$$

gdje je:

$f_{P,dh}$ faktor primarne energije za sustav daljinskog grijanja,

$f_{P,F,i}$ faktor primarne energije i -tog goriva ili ulazne konačne energije,

$f_{P,el}$ faktor primarne energije zamijenjene električne energije dobivene procesom kogeneracije,

$\sum_j Q_{del,j}$ zbroj potrošnje toplinske energije izmjeren na primarnoj strani podstanica zgrada opskrbljivanih toplotom, u razmatranom razdoblju (obično jedna godina),

$E_{el,chp}$ električna energija iz kogeneracije, za isto razmatrano razdoblje,

$E_{F,i}$ potrošnja konačne energije i -tog goriva za proizvodnju topline i električne energije u istom razmatranom razdoblju.

Energijski zahtjevi podstanica u zgradama

Energetska učinkovitost (energijsko svojstvo) toplinske podstanice u zgradi procjenjuje se kroz ocjenu toplinskih gubitaka.

Potrošnja električne energije pomoćne opreme može se zanemariti. Za podstanicu u zgradi karakteristično je da su joj komponente toplinski izolirane.

Toplinski gubici ovise o:

- debljini i vrsti toplinsko-izolacijskih materijala,
- materijalu cijevi,
- oplošju čitavog sustava razvodnih cijevi,
- snazi (opterećenju) podstanice,
- razlici između temperature ogrjevnog medija i temperature okolnog zraka.

Energijska potreba toplinske podstanice u zgradi obuhvaća toplinski gubitak sustava za proizvodnju topline (tj. podstanice u zgradi), $Q_{dh,gen,ls}$, i potrošnju pomoćne energije te podstanice (zanemaruje se tj. uzima se da je jednaka nuli).

Metodologija proračuna potrebne energije i učinkovitosti sustava za daljinsko grijanje dana je u HRN EN 15316-4-5 [122].

7.2.6.8 Podsustav proizvodnje topline – kogeneracijski sustav u zgradi

Granica sustava za podsustav kogeneracije obuhvaća samo kogeneracijski uređaj, uključujući eventualno dodatni plamenik i spremnik topline, uz pretpostavku da su ispitani kao jedna cjelina. Proizvedena toplina upotrebljava se za grijanje prostora, zagrijavanje potrošne tople vode i eventualno za apsorpcijski rashladni uređaj.

Kotao za vršni rad standardne izvedbe upotrebljava se kad je izlazna toplina kogeneracijskog uređaja nedovoljna za pokrivanje trenutno potrebne topline. Kotao za vršni rad nije uključen u granicu kogeneracijskog podsustava.

Potrošnja pomoćne energije uzima se u obzir kroz isključivo primjenu samo neto proizvedene električne energije, tj. ukupno proizvedene električne energije umanjene za ukupnu potrošenu pomoćnu energiju. Dakle:

$$W_{chp,gen,aux} = 0 \quad (7.11)$$

Toplinski gubici ne daju se povratiti za pokrivanje potreba grijanja prostora, tako da je:

$$Q_{chp,gen,ls,rbl} = 0 \quad (7.12)$$

Toplinske gubitke sustava treba za svako proračunsko razdoblje proračunati odvojeno.

Ovisno o vrsti kogeneracijskog uređaja mogu se razlikovati dva načina rada:

- kogeneracijski uređaj je tako dimenzioniran da većinu vremena radi s punim opterećenjem tako da izlazna toplina iz uređaja zadovoljava samo osnovno opterećenje sustava grijanja,
- kogeneracijski uređaj je tako dimenzioniran da radi u različitim područjima opterećenja (npr. to je slučaj kad kogeneracijska jedinica radi kao zamjena kotlu i zadovoljava svu potrebnu toplinu za zgradu). Za takovu instalaciju opterećenje se tijekom godine mijenja u velikom rasponu, a rad pri malom opterećenju jako utječe na energijsko svojstvo kogeneracijskog uređaja kroz godinu.

Kogeneracijska se jedinica može dimenzionirati tako da proizvodi samo osnovnu potrebnu električnu energiju i da stoga pokriva samo dio potrebne topline.

U normi HRN EN 15316-4-4 [121] dane su dvije proračunske metode koje odgovaraju dvama načinima rada kogeneracijskog postrojenja:

- „metoda parcijalnog doprinosa“ za kogeneracijski uređaj koji radi pod punim opterećenjem većinu vremena i dobavlja osnovno opterećenje instalacije (parcijalni doprinos potrebnoj toplini)
- „metoda godišnjeg profila opterećenja“ za kogeneracijski uređaj koji radi uz različito opterećenje tj. radi kao zamjena za kotao za grijanje.

7.3 SUSTAVI ZA PRIPREMU POTROŠNE TOPLE VODE (PTV)

7.3.1 Uvod

Priprema potrošne tople vode je proces dovođenja topline radi povišenja temperature hladne vode na predviđenu temperaturu isporučene vode.

Sustav za pripremu potrošne tople vode je tehnička oprema koja služi za pripremu potrošne tople vode, a sastoji se od izvora topline, spremnika tople vode, razvodne mreže do trošila, recirkulacijskih vodova, regulacijskih i sigurnosnih elemenata.

Sustavi za pripremu PTV i sustavi grijanja često imaju isti izvor topline pa se promatraju zajedno kao jedan sustav: **sustav grijanja i pripreme PTV**.

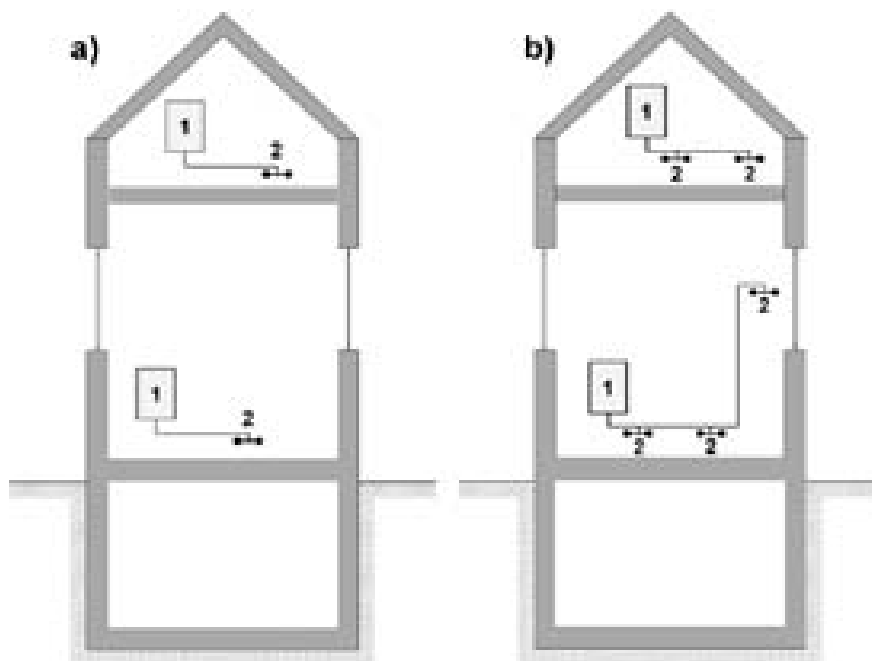
7.3.2 Sustavi za zagrijavanje potrošne tople vode

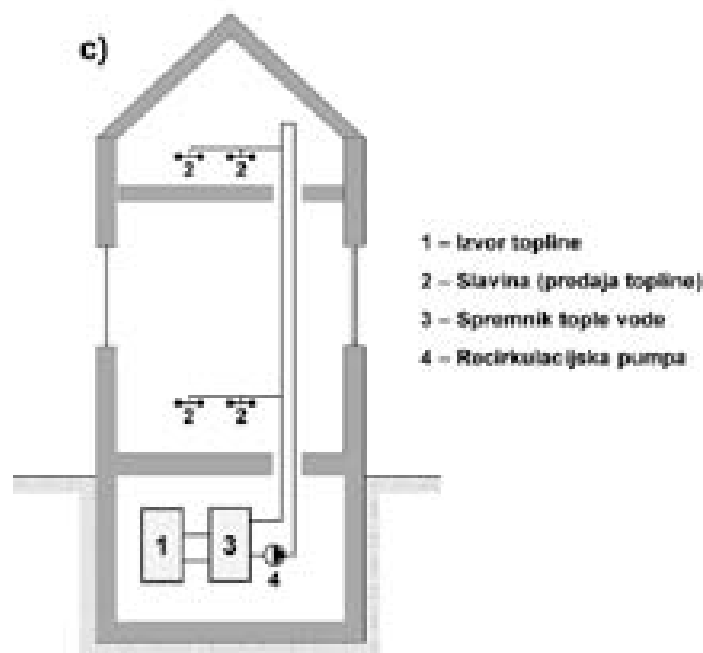
Prema načinu zagrijavanja vode sustavi PTV-a dijele se na :

- protočne sustave (za manja pojedinačna trošila) – zagrijavanje vode neposredno u trenutku potrošnje, pri čemu izmjena topline započinje otvaranjem protoka kroz trošilo,
- akumulacijske sustave (za veću potrošnju) – zagrijavanje vode prije potrošnje, pri čemu se zagrijana voda, sve dok nije potrebna, pohranjuje u odgovarajućem spremniku.

Prema smještaju u odnosu na trošila, sustav za pripremu potrošne tople vode može biti:

- decentralni (lokalni - pojedinačni ili skupni), smješten u neposrednoj blizini trošila,
- centralni, smješten na jednom mjestu za cijeli stan ili zgradu.





- a) decentralna priprema potrošne tople vode s pojedinačnim izljevnim mjestom
- b) decentralna skupna priprema potrošne tople vode
- c) centralna priprema potrošne tople vode s recirkulacijskom crpkom

Slika 7.17 Osnovne mogućnosti za pripremu potrošne tople vode

Prema energentu decentralni sustavi za pripremu potrošne tople vode dijele se na sustave na tekuća, plinska ili kruta goriva, te električni sustav. Kod centralnih sustava za pripremu potrošne tople vode osim gore navedenih još dolaze u obzir sustavi na otpadnu toplinu, na Sunčevu energiju, sustavi s dizalicom topline i sustavi spojeni na toplanu.

Izvor topline sustava za pripremu PTV je dio sustava u kojem dolazi do pretvorbe prikladnog primarnog izvora energije u toplinu koja se potom izravno ili posredno predaje vodi. Izvori topline su, u najvećem broju slučajeva, po svojoj izvedbi jednaki izvorima topline sustava grijanja i najčešće se izvide kao jedinstven uređaj.

Kao izvor topline danas se najčešće koristi:

- mali protočni električni ili plinski zagrijači,
- veliki protočni ili cirkulacijski električni ili plinski zagrijači,
- akumulacijski, odnosno zagrijači sa spremnikom u raznim izvedbama s obzirom na energente,
- kombinirani kotlovi za sustav grijanja i pripremu PTV (plinski, uljni, na kruta goriva, električni,...),
- solarni sustavi,
- toplinske podstanice (ako je zgrada spojena na daljinski toplinski sustav).

Spremnici tople vode – služe za pohranu zagrijane vode kako bi njezina potrošnja bila moguća u bilo koje vrijeme.

Razvodna mreža tople vode od spremnika tople vode do trošila stalno je ispunjena toplom vodom. Kad nema potrošnje tople vode, voda u toplom vodu se hladi. Potrebno je ispustiti veću količinu ohlađene vode da bi se dobila topla voda.

U svrhu trenutnog osiguranja tople vode na izljevnim mjestima (trošila) neposredno nakon otvaranja slavine, bez obzira na udaljenost trošila od izvora topline, pored razvodnih cijevi tople vode, ugrađuje se recirkulacijski vod s recirkulacijskom crpkom, koji omogućuju cirkulaciju vode u zatvorenom krugu između spremnika i izljevnog mjesta. Ovakvim

rješenjem pripreme potrošne tople vode povećavaju se toplinski gubici sustava. Uslijed stalne cirkulacije vode, voda u spremniku se hladi zbog toplinskih gubitaka cijevi. Dodatna potrošnja energije potrebna je i za pogon recirkulacijske crpke.

Primjer 7.1

Koliki je godišnji utrošak električne energije za pogon recirkulacijske pumpe od 30 W?

Godišnji utrošak električne energije za pogon recirkulacijske pumpe od 30 W, ako radi 24 h/dan, je:

$$24 \text{ h/dan} \times 365 \text{ dan/god} \times 30 \text{ W} = 262\,800 \text{ W}\cdot\text{h/god} = 262,8 \text{ kW}\cdot\text{h/god}.$$

Ako je cijena električne energije 0.80 kn/kW·h, godišnji trošak električne energije za pogon recirkulacijske crpke iznosi:

$$262,8 \text{ kWh/god} \times 0,80 \text{ kn/kWh} = 210,24 \text{ kn/god}$$

7.3.3 Potrebna korisna toplina za zagrijavanje potrošne tople vode (PTV)

Potrebna korisna toplina za zagrijavanje potrošne tople vode, $Q_{W,nd}$, je toplina koju treba predati potrebnoj količini PTV da bi se njena temperatura povisila od temperature hladne vode iz vodovodne mreže do prethodno određene temperature vode pri isporuci na mjestu isporuke, ne uzimajući u obzir sustav grijanja.

Za proračun potrebne korisne topline za pripremu potrošne tople vode postoje četiri različite metode koje se razlikuju po razini pojedinosti uzetih u obzir kod proračuna. Proračuni su zasnovani na dnevnom zahtjevu za potrošnom toplom vodom. Mjesečna ili godišnja potrebna korisna toplina za PTV dobije se množenjem dnevne potrebne energije s odgovarajućim brojem dana.

7.3.3.1 Potrebna korisna energija za PTV zasnovana na dnevnim programima

Za ovu je metodu karakteristična primjena jednog ili više 24-satnih ciklusa, koji opisuju određeni broj zahtjeva za potrošnjom tople vode. Ovakvi dnevni programi potrošnje tople vode s naznakom tipa zgrade za koji se mogu primijeniti, daju se u nacionalnim propisima.

7.3.3.2 Potrebna korisna energija za PTV zasnovana na potrebnom obujmu tople vode

Za ovu je metodu karakterističan proračun zahtijevanog dnevnog obujma potrošne tople vode.

Potrebna korisna energija za potrošnu toplu vodu, koja se dnevno isporučuje korisniku, $Q_{W,nd,day}$ u MJ/day, ovisi o isporučenom obujmu vode i njenoj temperaturi, a proračunava se iz izraza:

$$Q_{W,nd,day} = 4,182 \times V_{W,day} \times (\theta_{W,del} - \theta_{W,0}) \quad (7.13)$$

gdje je:

$V_{W,day}$ obujam dnevno isporučene PTV, određene temperature, u m³/day,

$\theta_{W,del}$ određena temperatura isporučene vode, °C,

$\theta_{W,0}$ temperatura vode iz vodovodne mreže, °C,

Mjesečna potrebna korisna energija za PTV, u MJ/month, iznosi:

$$Q_{W,nd,month} = Q_{W,nd,day} \times N \quad (7.14)$$

gdje je :

N broj dana u promatranom mjesecu,

Godišnja potrebna korisna energija za PTV, u MJ/an, iznosi:

$$Q_{W,nd,an} = \sum_i Q_{W,nd,month,i} \quad (7.15)$$

Zbrajanje se provodi za sve mjesece i u godini.

Zahtijevana temperatura potrošne tople vode pri isporuci ovisi o svrsi njene uporabe, a određuje se u nacionalnim propisima. Ukoliko ta temperatura nije propisana može se koristiti standardna vrijednost u iznosu $\theta_{W,del} = 60\text{ °C}$. Isto tako, u nacionalnim propisima daju se i temperature hladne vode iz vodovodne mreže, a ako tog podatka nema u propisima, smije se koristiti standardna vrijednost u iznosu $+13,5\text{ °C}$ ili $+12\text{ °C}$, što je na strani sigurnosti.

Obujam potrošne tople vode, u m^3/day , utvrđuje se prema tipu zgrade i svrsi uporabe pomoću izraza:

$$V_{W,day} = V_{W,f,day} \times \frac{f}{1000} \quad (7.16)$$

gdje je:

$V_{W,f,day}$ broj litara potrošne tople vode po karakterističnoj jedinici i danu za određenu temperaturu isporučene potrošne vode,

f broj karakterističnih jedinica koje su uzete u obzir.

Vrijednosti $V_{W,f,day}$ i f ovise o tipu zgrade i o vrsti aktivnosti u zgradi, a navode se u nacionalnom propisu. Ako nema tog propisa smiju se primijeniti standardne vrijednosti navedene u tablici 7.4.

Tablica 7.4 Vrijednosti veličina $V_{W,f,day}$ i f za proračun zahtjeva za PTV za zgrade (prema HRN EN 15316-3-1 [115])

Vrsta djelatnosti	$V_{W,f,day}$ l / jedinica / day	f jedinica
Stanovanje	standardne vrijednosti dane u nastavku nakon tablice	ploština poda
Domovi za smještaj	28	broj kreveta
Zdravstvene ustanove bez stacionara	10	broj kreveta
Zdravstvene ustanove sa stacionarom, bez praonice rublja	56	broj kreveta
Zdravstvene ustanove sa stacionarom, s praonicom rublja	88	broj kreveta
Obrazovanje	Zahtjevi za potrošnom toplom vodom ne uzimaju se u obzir	
Uredi		
Auditoriji i predavaonice		
Trgovine		
Ugostiteljstvo, dva obroka dnevno, tradicijska kuhinja	21	broj gostiju po obroku
Ugostiteljstvo, dva obroka dnevno, samoposluživanje	8	broj gostiju po obroku
Ugostiteljstvo, jedan obrok dnevno, tradicijska kuhinja	10	broj gostiju po obroku

Ugostiteljstvo, jedan obrok dnevno, samoposluživanje	4	broj gostiju po obroku
Hotel jedna zvjezdica, bez praonice rublja	56	broj kreveta
Hotel jedna zvjezdica, s praonicom rublja	70	broj kreveta
Hotel dvije zvjezdice, bez praonice rublja	76	broj kreveta
Hotel dvije zvjezdice, s praonicom rublja	90	broj kreveta
Hotel tri zvjezdice, bez praonice rublja	97	broj kreveta
Hotel tri zvjezdice, s praonicom rublja	111	broj kreveta
Hotel četiri zvjezdice, bez praonice rublja	118	broj kreveta
Hotel četiri zvjezdice, s praonicom rublja	132	broj kreveta
Športske ustanove	101	broj ugrađenih tuševa
Skladišta	Zahtjevi za potrošnom toplom vodom ne uzimaju se u obzir	
Industrija		
Transport		
Drugo		

Za obiteljske se kuće i pojedinačne stanove $V_{W,f,day}$ proračunava na slijedeći način:

a) – ako je $f >$ granične vrijednosti, koristi se izraz:

$$V_{W,f,day} = \frac{[x \times \ln(f) - y]}{f} \quad (7.17)$$

b) – ako je (najmanja vrijednost) $\leq f \leq$ (granična vrijednost), onda je:

$$V_{W,f,day} = z \quad (7.18)$$

U oba je slučaja dobivena vrijednost $V_{W,f,day}$ izražena u litrama po kvadratnom metru ploštine poda po danu.

U gornjim izrazima:

f je ploština korisne površine kuće, odnosno stana, u m^2 ,
 x, y su konstantne vrijednosti protoka potrošne tople vode, u litrama na dan,
 z je konstantna vrijednost protoka potrošne tople vode, u litrama po m^2 i danu.

Vrijednosti x, y, z te granična i najmanja vrijednost faktora f navode se u nacionalnom propisu, a ako tih podataka u nacionalnom propisu nema mogu se koristiti standardne vrijednosti:

$x = 39,5$ litara / dan
 $y = 90,2$ litre / dan
 $z = 1,49$ litara / m² po danu
 najmanja vrijednost $f = 14$ m²
 granična vrijednost $f = 27$ m².

7.3.3.3 Potrebna korisna energija za PTV zasnovana na ploštini neto korisne površine poda zgrade

Za ovu je metodu karakteristična pretpostavka da postoji linearan odnos između potrebne korisne energije za PTV i ploštine poda zgrade. U tom se slučaju potrebna korisna energija za PTV, $Q_{W,nd,day}$, u MJ/day, proračuna pomoću izraza:

$$Q_{W,nd,day} = Q_{W,nd,A,day} \times A \quad (7.19)$$

gdje je:

$Q_{W,nd,A,day}$ specifična potrebna korisna energija za PTV u MJ/(m²×day) zasnovana na utvrđenoj temperaturi tople vode pri isporuci (npr. 60 °C) i utvrđenoj temperaturi hladne vode (npr. 12 °C),
 A ploština korisne površine poda, u m².

Vrijednosti $Q_{W,nd,A,day}$ moraju se dati u nacionalnom propisu. Ako takvog propisa nema, za obiteljske kuće može se računati s $Q_{W,nd,A,day} = 12,5$ kWh/(m²×a), a za zgrade s više od tri stana s $Q_{W,nd,A,day} = 16$ kWh/(m²×a).

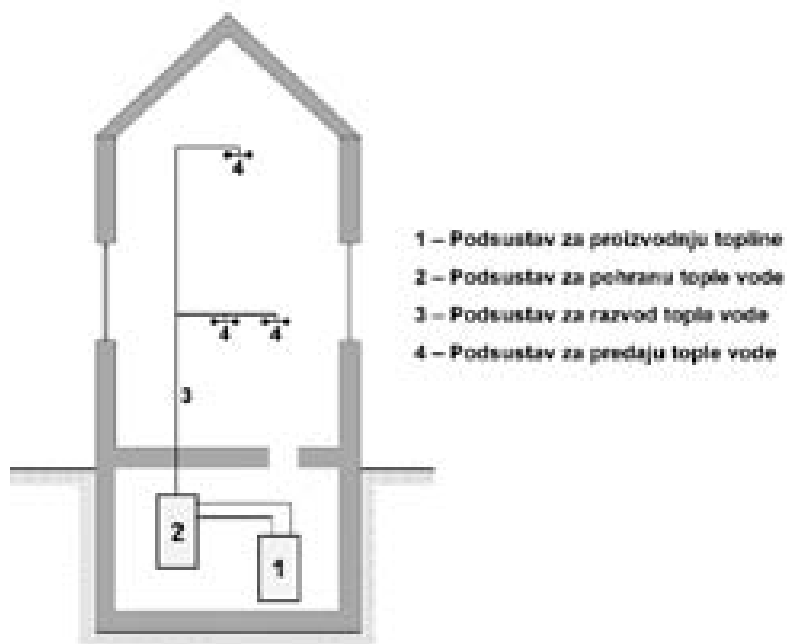
7.3.3.4 Tablični prikaz potrebne korisne energije za PTV

Za ovu je metodu karakteristična pretpostavka da postoji odnos između potrebne korisne energije za PTV i tipa zgrade i uporabe. Dnevne potrebne energije za PTV mogu se prikazati tabelarno pomoću jednog ili više parametara ovisno o tipu zgrade i djelatnosti koja se izvodi u zgradi. Tablica se navodi u nacionalnom propisu.

7.3.4 Potrebna konačna energija za rad sustava za pripremu potrošne tople vode

Metoda proračuna potrebne energije za rad sustava za pripremu potrošne tople vode zasniva se na analizi slijedećih podsustava sustava za pripremu PTV:

- podsustava za predaje topline u prostor (tj. slavina),
- podsustava za razvod topline, uključivo regulaciju,
- podsustava za pohranu topline, uključivo regulaciju,
- podsustava za proizvodnju topline, uključivo regulaciju (npr. kotao, toplinska pumpa, kogeneracijsko postrojenje,...).



Slika 7.18 Osnovne komponente sustava za zagrijavanje potrošne tople vode

Primjer proračuna električnog sustava za zagrijavanje PTV dan je u tablici 7.5, na temelju rezultata proračuna za svaki pojedini podsustav.

Tablica 7.5 Primjer proračuna toplinskih gubitaka za sustav PTV (prema HRN EN 15316-1 [112])

			D	E	F
			Potrebna korisna energija za PTV $Q_{W,nd}$		
L1		kWh/raz-doblje	20		
	Gubitci sustava		Toplinski gubitak sustava $Q_{W,i,ls}$	Pomoćna energija $W_{W,i,aux}$	Povratni toplinski gubitak sustava $Q_{W,i,ls,rbl}$
L2	Podsustav emisije (i=em)	kWh/raz-doblje	0	0	0
L3	Ulaz (emisija) (L1+L2)	kWh/raz-doblje	20	0	0
L4	Podsustav razvoda (i=dis)	kWh/raz-doblje	10	2	5

L5	Ulaz (razvoda) (L3+L4)	kWh/raz-doblje	30	2	5
L6	Podsustav pohrane (i=st)	kWh/raz-doblje	10	1	6
L7	Ulaz (pohrana) (L5+L6)	kWh/raz-doblje	40	3	11
L8	Podsustav za proizvodnju (i=gen)	kWh/raz-doblje	0	0	0
L9	Ulaz (proizvodnja) (L7+L8)	kWh/raz-doblje	40	3	11

Toplinski gubici sustava za potrošnu toplu vodu bez podsustava za proizvodnju topline koji pripada toj zgradi, $Q_{W,ngen,ls}$, proračunavaju se na slijedeći način:

$$Q_{W,ngen,ls} = Q_{W,em,ls} + Q_{W,dis,ls} + Q_{W,st,ls} \quad (7.20)$$

gdje su:

$Q_{W,em,ls}$ toplinski gubici sustava zbog nesavršenog podsustav emisije (tj. slavine),
 $Q_{W,dis,ls}$ toplinski gubici sustava za podsustav razvoda potrošne tople vode,
 $Q_{W,st,ls}$ toplinski gubici sustava za podsustav za pohranu tople vode.

Povratni toplinski gubici sustava za PTV bez podsustava za proizvodnju topline koji pripada toj zgradi, $Q_{W,ngen,ls,rbl}$, proračunavaju se na slijedeći način:

$$Q_{W,ngen,ls,rbl} = Q_{W,em,ls,rbl} + Q_{W,dis,ls,rbl} + Q_{W,st,ls,rbl} \quad (7.21)$$

gdje su:

$Q_{W,em,ls,rbl}$ povratni toplinski gubici sustava za podsustav emisije PTV,
 $Q_{W,dis,ls,rbl}$ povratni toplinski gubici sustava za podsustav razvoda PTV,
 $Q_{W,st,ls,rbl}$ povratni toplinski gubici sustava za podsustav za pohranu tople vode.

Pomoćna energija sustava za PTV bez podsustava za proizvodnju topline koji pripadaju toj zgradi, $W_{W,ngen,aux}$, proračunava se na slijedeći način:

$$W_{W,ngen,aux} = W_{W,em,aux} + W_{W,dis,aux} + W_{W,st,aux} \quad (7.22)$$

gdje je:

$W_{W,em,aux}$ pomoćna energija za podsustav emisije PTV,
 $W_{W,dis,aux}$ pomoćna energija za podsustav razvoda PTV,
 $W_{W,st,aux}$ pomoćna energija za podsustav za pohranu PTV.

Podsustav pohrane topline može biti uvršten u podsustav proizvodnje ili razrađen kao zasebni podsustav pohrane.

Potrebnu korisnu energiju za PTV i nadoknadu toplinskih gubitaka u svim podsustavima sustava PTV mora osigurati izvor topline. Energija koju mora isporučiti izvor topline dana je izrazom:

$$Q_{W,gen,out} = Q_{W,nd} + Q_{W,dis,ls} + Q_{W,st,ls} + Q_{W,p,ls} \quad (7.23)$$

gdje je:

$Q_{W,gen,out}$ ukupni izlaz iz sustava proizvodnje energije, u MJ/dan,
 $Q_{W,nd}$ potrebna korisna energija za PTV, u MJ/dan,
 $Q_{W,dis,ls}$ toplinski gubici sustava za podsustav razvoda PTV, u MJ/dan,

$Q_{W,st,ls}$ toplinski gubici sustava za podsustav za pohranu tople vode, u MJ/dan,
 $Q_{W,p,ls}$ toplinski gubici primarnog kruga (ako postoji), u MJ/dan.

Metodologija proračuna svih veličina za izračun potrebne konačne energije za rad sustava za pripremu potrošne tople vode dana je u normama HRN EN 15316-3-1 [115], HRN EN 15316-3-2 [116] i HRN EN 15316-3-3 [117].

7.4 SUSTAVI VENTILACIJE PROSTORA

7.4.1 Tipovi sustava ventilacije prostora

Ventilacija je proces zamjene starog ustajalog „potrošenog“ zraka iz prostora zgrade s vanjskim čistim svježim zrakom kroz za to projektirane otvore u ovojnici zgrade. Ventilacija znači namjernu izmjenu određene količine zraka u prostoru zgrade. Svrha ventilacije je opskrba prostora zgrade potrebnom količinom svježeg zraka. Ventilacija zgrade je neizbježna kako bi se u prostoru zgrade osigurala kvaliteta zraka dovoljna za ugodnost boravka i zdravlje korisnika zgrade. Ugodan i zdrav boravak u zgradi zahtjeva kontinuiranu 24 – satnu dnevnu ventilaciju.

Ventilacija zatvorenog prostora zgrade može se odvijati na prirodan način, prisilan ili mehanički način te njihovom kombinacijom. U tom pogledu razlikuju se, prema načinu strujanja zraka, četiri osnovna tehnička rješenja sustava ventilacije:

Sustav prirodne ventilacije:

dovođenje vanjskog zraka:	prirodnim načinom
odvođenje unutarnjeg zraka:	prirodnim načinom

Sustav prisilne tlačne ventilacije:

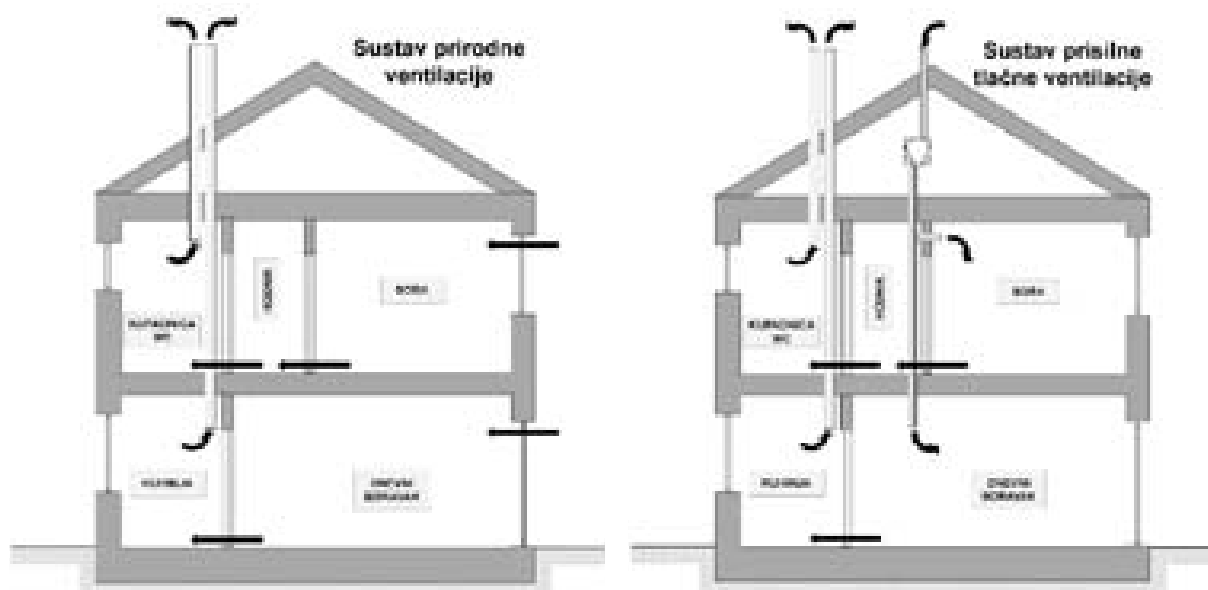
dovođenje vanjskog zraka:	mehaničkim načinom
odvođenje unutarnjeg zraka:	prirodnim načinom

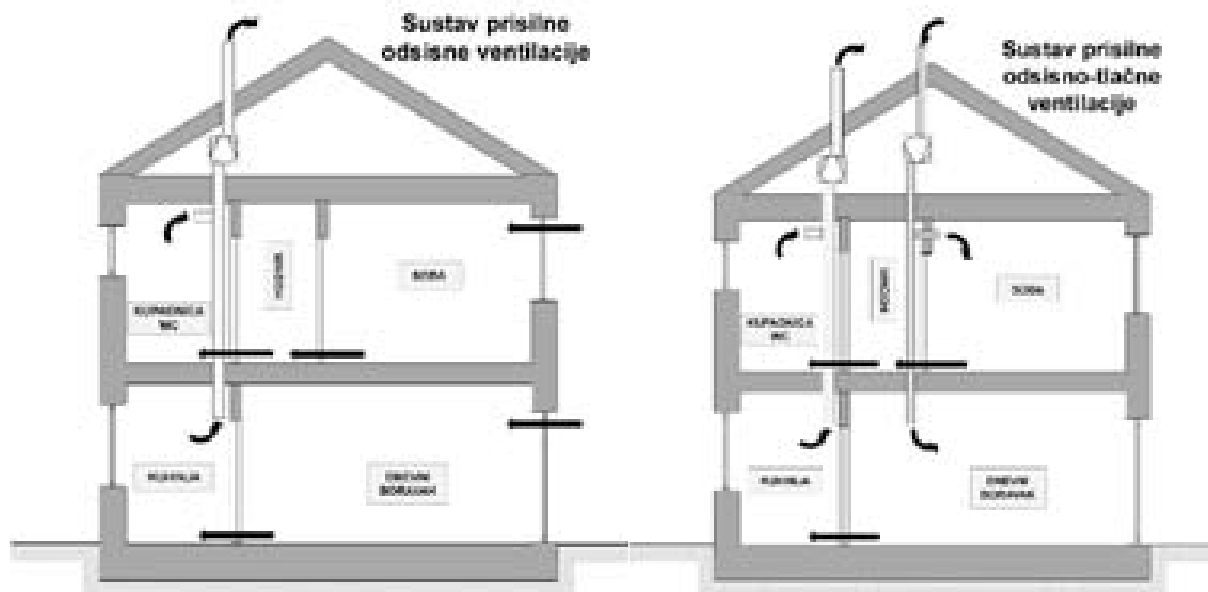
Sustav prisilne odsisne ventilacije:

dovođenje vanjskog zraka:	prirodnim načinom
odvođenje unutarnjeg zraka:	mehaničkim načinom

Sustav prisilne odsisno-tlačne ventilacije:

dovođenje vanjskog zraka:	mehaničkim načinom
odvođenje unutarnjeg zraka:	mehaničkim načinom





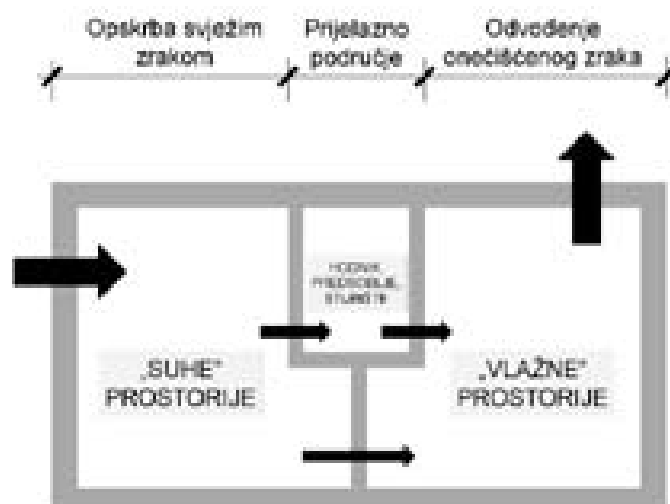
Slika 7.19 Tipovi sustava ventilacije prostora zgrade

7.4.2 Principi rada sustava ventilacije

Kod stambenih zgrada i nestambenih zgrada uredske i javne namjene osnovni principi ventilacije su slijedeći:

- opskrba svježim vanjskim zrakom boravišnih prostorija (tzv. „suhe“ prostorije – dnevni boravak, spavaće i radne sobe, učionice, uredi,...) tj. prostorija u kojima korisnici zgrade borave dulje vremena i gdje je onečišćenje zraka općenito ograničeno,
- odvođenje u vanjski prostor onečišćenog zraka iz prostorija sa značajnijim onečišćujućim tvarima (tzv. „mokre“ prostorije – kuhinja, kupaoonica, WC, laboratoriji,...),
- prestrujavanje zraka iz prostorija koje se opskrbljuju vanjskim zrakom u prostorije iz kojih se zrak odvodi prema vanjskom prostoru, i to neposredno preko prijenosnih otvora u pregradnim zidovima ili unutarnjim vratima ili posredno preko prijenosnih prostora kao što su hodnici, predsoblja i stubišta.

Ovi osnovni principi ventilacije shematski su prikazani na slici 7.20 [126].



Slika 7.20 Shematski prikaz osnovnih principa ventilacije (tlocrt)

Principi rada sustava ventilacije su vrlo jednostavni. Da bi se zatvorena prostorija ventilirala potrebna su najmanje dva otvora: jedan otvor za ulaz svježeg zraka i jedan otvor za izlaz onečišćenog zraka te sila koja će izazvati strujanje zraka. Otvor za ulaz zraka treba biti položen u prostoriji što niže, a otvor za izlaz zraka što više i što udaljenije od ulaznog otvora. Radi povećanja ventilacijskog protoka zraka izlazni otvor se poveže s vertikalnim ventilacijskim kanalom. Sila koja pokreće struju zraka nastaje djelovanjem vjetra i / ili razlike temperature unutarnjeg i vanjskog zraka (prirodna ventilacija) ili pak radom ventilatora (prisilna ventilacija).

Protok zraka kroz neki otvor proporcionalan je ploštini otvora i razlici tlaka s obje strane otvora. Protok zraka je veći što je otvor veći i što je razlika tlaka s obje strane otvora veća.

Razlika temperature unutarnjeg i vanjskog zraka dovodi do razlike tlaka zraka, zbog čega nastaje strujanje zraka kroz otvore u ovojnici zgrade. Smjer strujanja zraka ovisi o položaju tzv. ravnine neutralnog tlaka. Ona se nalazi na visini na kojoj su tlak zraka unutar i izvan zgrade jednaki (kada nema tlaka vjetra). Ispod ravnine neutralnog tlaka dolazi do prodora vanjskog zraka u zgradu (u zgradi je podtlak ili vakuum). Iznad ravnine neutralnog tlaka zrak izlazi iz prostora zgrade (u zgradi je pretlak ili nadtlak). Ravnina neutralnog tlaka dijeli ovojnicu zgrade na dio s infiltracijom i dio s eksfiltracijom zraka.

U zgradi s vertikalnim ventilacijskim kanalom ili dimnjakom, zbog toplinskog uzgona, postoji tendencija da se smanji tlak zraka u zgradi, zbog čega se ravnina neutralnog tlaka podiže na višu razinu. Strujanje vanjskog zraka u prostor zgrade nastaje kroz veći dio površine vanjskih zidova, a unutarnji zrak odlazi prema van preko stropa i kanala / dimnjaka. Protok zraka, u ovom slučaju, općenito je veći.

U slučaju vjetra, kod zgrade bez ventilacijskog kanala i dimnjaka i bez odsisnog ventilatora, s vanjske strane vanjskog zida okrenutog prema vjetru, dolazi do povećanja tlaka zraka u odnosu na unutarnji tlak. Povećani tlak javlja se i uz unutarnje lice nasuprotnog zida u zavjetrini. Ukupno strujanje zraka nastaje prema unutrašnjosti kroz zid izložen vjetru, a otjecanje prema van kroz nasuprotni zid u zavjetrini. Dakle u slučaju vjetra zrak prodire kroz izloženu fasadu, a izlazi kroz fasadu u zavjetrini.

Rad sustava prisilne ili mehaničke ventilacije zasniva se na radu ventilatora. Prisilna ventilacija je kontrolirani način ventilacije. Za sve sustave prisilne ventilacije potrebno je odgovarajuće automatsko upravljanje.

7.4.3 Sustav prirodne ventilacije

7.4.3.1 Općenito

Kod sustava prirodne ventilacije struja zraka pokrenuta je prirodnim mehanizmima, bez uporabe ventilatora.

Za prirodnu ventilaciju potrebno je u ovojnici zgrade predvidjeti posebne otvore za dovod i odvod zraka. Kod prirodne ventilacije zrak struji kroz projektirane otvore u prostor zgrade zbog razlike tlaka zraka u prostoru zgrade i pred njenim pročeljem. Ta razlika tlaka posljedica je vjetra i / ili razlike između gustoća unutarnjeg toplijeg zraka i vanjskog hladnijeg zraka (efekt dimnjaka odnosno efekt uzgonskog djelovanja).

Ventilacijski otvori za dovod svježeg vanjskog zraka nalaze se u vanjskim zidovima boravišnih tzv. „suhih“ prostorija (dnevni boravak, spavaća soba, ured, učionica,...). U pregradnim zidovima i / ili unutarnjim vratima nalaze se prestrujni otvori za prijenos struje zraka preko pomoćnih prostorija (hodnik, hal,...) prema tzv. „vlažnim“ prostorijama (kuhinja, kupaoonica, WC,...) iz kojih se onečišćeni zrak odvodi vertikalnim ventilacijskim kanalima, koji izlaze na krovu zgrade.

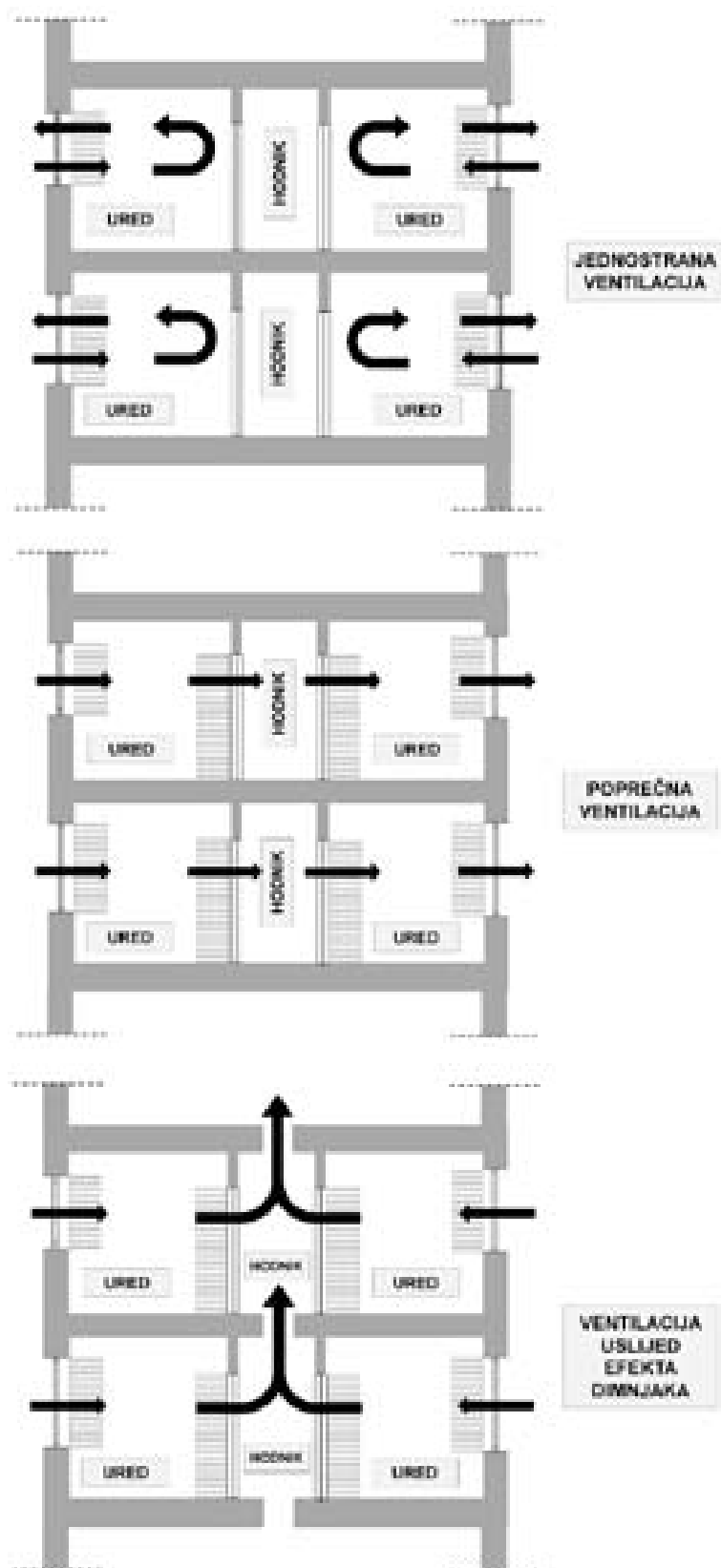


Slika 7.21 Princip prirodne ventilacije

U cilju smanjenja potrošnje energije, važno je rad sustava ventilacije prilagoditi stvarnim potrebama (u razdoblju zauzetosti prostora, noću, vikendom,...), što zahtjeva postojanje mogućnosti njene regulacije. Prirodna ventilacija može se regulirati preko regulirajućih ventilacijskih otvora, bilo ručno bilo automatski elektroničkim putem.

Kod većih slučajnih onečišćenja zraka potrebno je omogućiti intenzivnu ventilaciju prostora. Za takve povremene značajne protoke zraka koristi se otvaranje prozora i vrata, stvarajući na taj način velike dovodne i odvodne otvore. Kod toga se razlikuje:

- **jednostrana ventilacija**, koja nastaje otvaranjem prozora na samo jednom pročelju zgrade. U ovom slučaju vanjski hladniji zrak ulazi u prostor kroz donji dio otvora, a unutarnji topliji zrak izlazi iz prostora kroz gornji dio otvora,
- **poprečna ventilacija**, koja nastaje otvaranjem prozora na suprotnim pročeljima zgrade. U ovom slučaju strujanje zraka nastaje zbog razlike tlaka zraka između oba pročelja zgrade prouzrokovane vjetrom. Postignuti protoci zraka veći su nego u slučaju jednostrane ventilacije,
- **ventilacija uslijed efekta dimnjaka**, koja nastaje otvaranjem prozora na jednom pročelju zgrade te krovnog prozora na krovu zgrade. Ovdje do strujanja zraka dolazi zbog efekta dimnjaka. Strujanje zraka je to značajnije što je veća visinska razlika između ulaza zraka u prostoriju i izlaza na krovu.



Slika 7.22 Vrste prozračivanja prostora otvaranjem prozora

Prednosti sustava prirodne ventilacije u odnosu na prisilnu ventilaciju su, među ostalim i to što nije potrebna energija za njen rad, a održavanje komponenata sustava ne zahtjeva veće troškove.

Nedostaci sustava prirodne ventilacije su slijedeći:

- njena efikasnost ovisi o prirodnim pojavama koje uzrokuju strujanje zraka,
- vanjski svježi zrak koji ulazi u prostor nije filtriran,
- kroz otvore za dovod vanjskog zraka prolazi vanjska buka, a kroz unutarnje prestrujne otvore unutarnja buka,
- ventilacijski otvori na pročeljima zgrade mogu ponekad narušiti njen izgled.

Prirodna ventilacija nije prikladna za ventilaciju negrijanog podrumskog prostora.

Tijekom ljeta, zbog približavanja vrijednosti temperature unutarnjeg i vanjskog zraka, prirodna ventilacija je manje efikasna nego tijekom zime.

Prirodnom ventilacijom prostor zgrade se ne može ohladiti na temperaturu nižu od temperature vanjskog zraka, ali se ventilacijom može spriječiti zagrijavanje unutarnjeg zraka iznad temperature vanjskog zraka.

7.4.3.2 Komponente sustava prirodne ventilacije

7.4.3.2.1 Ventilacijski otvori za dovod zraka

Ventilacija preko prozora nije prikladno rješenje za osiguranje trajne osnovne ventilacije prostora. Otvaranje prozora koristi se u slučajevima povremeno potrebne intenzivne ventilacije. Za osnovnu prirodnu ventilaciju prostora najbolje rješenje za dovod zraka su ventilacijski otvori s rešetkom, raspoređeni po pročelju zgrade, bilo u vanjskim zidovima, bilo u stolariji. Za dimenzioniranje dovodnog otvora može se primijeniti približno pravilo da kod razlike tlaka od 2 Pa, kroz otvor ploštine 10 cm^2 struji protok zraka od oko $1 \text{ dm}^3/\text{s}$, odnosno $3,6 \text{ m}^3/\text{h}$. Pri tome je srednja brzina zraka kroz otvor oko 1 m/s .

Da bi se izbjegao osjećaj propuha, preporuča se otvore za dovod zraka smjestiti na visini od najmanje $1,8 \text{ m}$ iznad poda prostorije. Posebnu pažnju treba obratiti na rizik smrzavanja vode u ogrjevnim tijelima u vrijeme kad sustav grijanja nije u funkciji (npr. noću).

Rešetke za otvore moraju biti riješene na način da se što bolje integriraju u vanjski zid, odnosno stolariju. Spojevi s rešetkom moraju biti nepropusni.

Protok potrebnog zraka kroz ventilacijski otvor postiže se mijenjanjem ploštine otvora rešetke, što se može ostvariti ručno ili automatski (samoregulirajuće rešetke u funkciji razlike tlaka vjetra, temperature ili relativne vlažnosti). Poželjno je da rešetke posjeduju barem pet pozicija: jedna pozicija „zatvoreno“, najmanje tri međupozicije i jedna pozicija „sasvim otvoreno“.

Preporuča se da u poziciji „zatvoreno“ svih otvora za dovod zraka jedne prostorije, najveći obujamski protok zraka za razliku tlaka od 50 Pa ne prelazi 15 % zahtijevanog protoka za tu prostoriju.

Otvor s rešetkom u svim pozicijama mora biti potpuno nepropustan za kišu bez obzira na smjer i snagu vjetra.

Poželjno je da rešetka sadrži finu mrežicu koja sprječava prolaz insekata.

Rešetka ne smije predstavljati toplinski most (nužno mora sadržavati prekid toplinskog mosta). U zatvorenoj poziciji ne smije doći do kondenzacije vodene pare na unutarnjoj strani rešetke. Koeficijent prolaska topline U rešetke smještene u okviru stolarije mora biti sličan onom okvira.

Rešetka ne smije biti ni značajan akustički most između vanjskog i unutarnjeg prostora. Zvučna izolacija otvora mora biti prilagođena srednjoj zvučnoj izolaciji pročelja.

Rješenje ventilacijske rešetke mora biti takvo da je omogućeno njeno jednostavno održavanje, demontaža i zamjena.

Prisustvo ventilacijske rešetke ne smije olakšati provalu u zgradu.

Ventilacijska rešetka mora imati i dovoljnu mehaničku otpornost i krutost da podnese opterećenja kojima je podvrgnut svaki element pročelja.

Na ventilacijske otvore mogu se ugraditi i odgovarajući grijači radi zagrijavanja ulaznog vanjskog zraka. Za to se koriste električni ili parni grijači, ali ne i toplovodni grijači zbog opasnosti smrzavanja vode u grijaču u vrijeme kad grijač ne radi.

7.4.3.2.2 Otvori za prestrujavanje zraka između prostorija

Kad se dovod novog zraka i odvod zagađenog zraka ne nalaze u istoj prostoriji, obvezno treba rasporediti prestrujne otvore za trajni prijenos zraka, koji omogućuju prolaženje ventilacijskog zraka prema okolnim prostorijama. Kao otvori za prolaz zraka mogu se koristiti veliki prorezi ispod vrata ili rešetke u vratima ili pregradnim zidovima. Ovi otvori moraju uvijek ostati otvoreni tj. ne smiju biti regulirajući.

Poželjno je da prijenosna rešetka očuva vizualnu i akustičku intimnost, što nije moguće u slučaju reški ispod vrata. U tu svrhu rešetke se često rade u obliku lamela koje sprječavaju pogled u susjednu prostoriju. Postoje modeli rešetke koja prigušuje prolaz zvuka. Potrebna zvučna izolacija može se lakše postići kod rešetke smještene u pregradnom zidu zbog veće debljine zida u odnosu na vrata.

Preporuča se ukupna ploština otvora za prestrujavanje zraka za sve prostorije od najmanje 70 cm², a za kuhinje 140 cm².

7.4.3.2.3 Otvori za odvođenje zraka i ventilacijski kanali

Za odvođenje potrošenog zraka iz prostora kod sustava prirodne ventilacije koristi se regulirajući otvor povezan s vertikalnim ventilacijskim kanalom koji izlazi na krov zgrade.

Tehničko rješenje ulaznog otvora ventilacijskog kanala mora biti takvo da omogućuje ručnu ili automatsku regulaciju ploštine otvora. Poželjno je najmanje pet pozicija: jedna pozicija „zatvoreno“, najmanje tri međupozicije ili kontinuirana regulacija i jedna pozicija „sasvim otvoreno“.

Brzina zraka u ventilacijskim kanalima za prirodnu ventilaciju ne mora prelaziti 1 m/s, što zahtjeva slobodnu površinu od 10 cm² po 3,6 m³/h protoka odvodnog zraka. Praktički to znači za kuhinju i kupaonicu najmanje 140 cm², a za WC najmanje 70 cm².

Prirodno odvođenje zagađenog zraka uvijek se mora obavljati preko vertikalnog ventilacijskog kanala.

Za zgradu visine Prizemlje + 4 kata može se izvesti zajednički ventilacijski kanal koji prihvaća više otvora za odvod zraka raspoređenih u sanitarnim prostorijama koje se nalaze jedna iznad druge u više etaža.

Za zgrade veće visine ovakvo rješenje ima rizik povrata zraka iz jedne prostorije prema drugoj, npr. otvaranjem prozora na fasadi u podtlaku. Da bi se to izbjeglo rješenje je bilo individualni kanal po stanu, bilo zajednički kanal sa šunt spojem ili protu-povratne klapne raspoređene u otvorima za odvod zraka.

Presjek glavnih i sekundarnih ventilacijskih kanala funkcija je ukupnog obujamskog protoka odvodnog zraka.

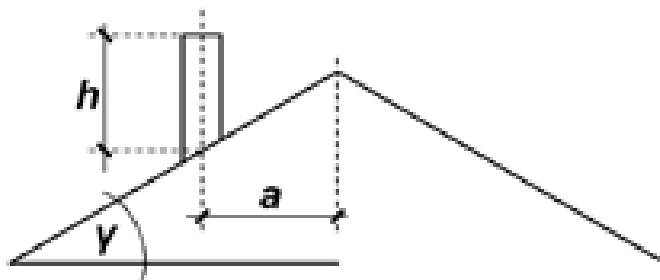
Kod ravnih krovova i kosih krovova nagiba $\leq 23^\circ$, položaj izlaza ventilacijskog kanala na krovu nije od značaja, uz uvjet da je izlaz kanala viši od krova barem 0,5 metara. Na kosim krovovima nagiba $> 23^\circ$, visina h u metrima ventilacijskog izlaza na krov može se odrediti formulom:

$$h \geq 0,5 + 0,16 \times (y - 23) \times a \quad (7.24)$$

gdje je:

γ nagib krova u odnosu na horizontalu, u stupnjevima,

a horizontalna udaljenost između osi ventilacijskog kanala i sljemena krova.



Slika 7.23 Visina h otvora odsisnog kanala iznad kosog krova

Poželjno je da izlaz ventilacijskog kanala bude što bliže sljemenu krova.

7.4.4 Sustav prisilne ventilacije

7.4.4.1 Pregled sustava prisilne ventilacije

Kod prisilne ili mehaničke ventilacije strujanje ventilacijskog zraka postiže se radom ventilatora. Moguće su tri osnovne izvedbe sustava prisilne ventilacije: tlačna, odsisna i odsisno-tlačna ventilacija.

U tablici 7.6 dan je pregled sustava prisilne ventilacije prema HRN EN 15243 [127].

Tablica 7.6 Pregled sustava prisilne ventilacije prema HRN EN 15243 [127]

Oznaka	Naziv sustava	Moguć povrat topline iz odsisnog zraka	Moguća uporaba obnovljive energije ^{a)}	Moguće grijanje zraka
E	Sustav odsisne ventilacije			
E1	Centralni ventilator ^{b)} bez toplinske pumpe			
E2	Centralni ventilator ^{b)} s toplinskom pumpom	+		
E3	Ventilator u pojedinoj prostoriji ^{c)} , bez toplinske pumpe			
BAL	Sustav odsisno-tlačne ventilacije			
BAL1	Centralni sustav ^{b)} bez povrata topline		+	+
BAL2	Centralni sustav ^{b)} s izmjenjivačem topline	+	+	+
BAL3	Centralni sustav ^{b)} s toplinskom pumpom	+	+	+
BAL4	Centralni sustav ^{b)} s izmjenjivačem topline i toplinskom pumpom	+	+	+
BAL5	Jedinica bez povrata topline u pojedinoj prostoriji ^{c)}			+

BAL6	Jedinica s izmjenjivačem topline u pojedinoj prostoriji ^{c)}	+		+
S	Sustav tlačne ventilacije			
S1	Centralni sustav bez obnovljive energije			+
S2	Centralni sustav s obnovljivom energijom		+	+
S3	Jedinica bez obnovljive energije u pojedinoj prostoriji ^{c)}			+

a) npr. izmjenjivač topline zemlja – zrak ili solarni zračni kolektor

b) sustavi za obiteljske kuće ili stambene zgrade

c) ventilatori ili jedinice za pojedine prostorije

Sustavi prisilne ventilacije mogu se podijeliti prema mjestu pripreme zraka na:

- sustave centralne ventilacije (zrak se priprema na jednom mjestu, u centralnoj ventilacijskoj jedinici, i zatim se razvodi mrežom kanala u pojedine prostorije),
- decentralizirane ili lokalne sustave ventilacije (zrak se posebno priprema za svaki ventilirani prostor).

Kod stanova sa sustavom prisilne ventilacije razlikuje se dio stana s povišenim tlakom zraka (dnevni boravak, sobe – nazvane i „suhe“ prostorije), dio stana sa sniženim tlakom (kuhinja, sanitarije – nazvane i „mokre“ prostorije) i prestrujni dio (hodnici, predsoblja) kojeg čine prostorije kroz koje struji zrak iz prostorija s povišenim tlakom prema prostorijama sa sniženim tlakom zraka. U „suhe“ prostorije ubrajaju se boravišne prostorije stana u kojima se traži viša razina kvalitete unutarnjeg zraka nego u okolnim prostorijama. U „mokre“ prostorije ubrajaju se pomoćne / prateće prostorije stana u kojima je tražena razina kvalitete unutarnjeg zraka niža nego u boravišnim prostorijama.

7.4.4.2 Sustav tlačne ventilacije

Kod sustava tlačne ventilacije zrak se, pomoću ventilatora smještenog u tlačnom razvodu, prisilno ubacuje u prostoriju.

Princip rada sustava tlačne ventilacije osniva se na održavanju pretlaka u prostoru zgrade u odnosu na vanjski tlak. Mrežom razvodnih kanala povezanih s tlačnim ventilatorom dovodi se svježi vanjski zrak kroz istrujne otvore do pojedinih boravišnih prostorija u zgradi. Iz ovih prostorija koje su u pretlaku zrak struji kroz prestrujne otvore u pregradnim zidovima ili vratima u susjedne prostorije. Odvođenje „potrošenog“ unutarnjeg zraka vrši se prirodnim izvlačenjem zraka pomoću vertikalnih ventilacijskih kanala u „mokrim“ prostorijama (kuhinja, sanitarije).

Sustavom tlačne ventilacije povećava se tlak zraka u zgradi i time snižava (spušta) ravnina neutralnog tlaka. Time se smanjuje dio ovojnice zgrade kroz koji dolazi do infiltracije zraka. Ako se ravnina neutralnog tlaka spusti ispod poda najniže etaže zgrade, infiltracija vanjskog zraka je potpuno onemogućena i kroz čitavu ovojnicu zgrade dolazi do eksfiltracije unutarnjeg zraka.

Ovaj sustav ventilacije se primjenjuje u područjima s jakim onečišćenjem vanjskog zraka ili u slučajevima kada se onečišćujuće tvari nalaze u vanjskim zidovima te kod zgrada s visokim zahtjevima u pogledu „čistoće“ zraka za ventilaciju.

Sustav tlačne ventilacije nije prikladan za zgrade s većom vlažnošću unutarnjeg zraka jer vlažan zrak prodire u vanjske zidove i krov gdje može doći do njegove kondenzacije s posljedicama razvoja plijesni, truljenja materijala, ljuštenja naliča itd. Ovaj sustav ventilacije stoga zahtjeva visoku nepropusnost za zrak ovojnice zgrade.

Prije ubacivanja u zgradu dobavni se zrak može dodatno obraditi: filtrirati, predgrijati, predhladiti, ovlažiti ili odvlažiti.

7.4.4.3 Sustav odsisne ventilacije

Kod sustava odsisne ventilacije zrak se, pomoću ventilatora koji je smješten u odsisnom razvodu, prisilno izvlači iz prostorije.

Sustavom odsisne ventilacije u zgradi se ostvari takvo strujanje zraka da svježi zrak ulazi u „suhe“ boravišne prostorije kroz ventilacijske otvore na fasadi, prolazi kroz pomoćne prostorije u „mokre“ prostorije iz kojih se, pomoću ventilatora, odvodi u vanjski prostor. Zrak dakle od ulaza u zgradu do izlaza iz zgrade struji kroz više prostorija i to po redu s rastućim onečišćenjem, prolazeći ispod krila vrata ili kroz posebne rešetke za prijenos zraka u vratnim krilima pojedinih prostorija. Pretpostavka za ovakav smjer strujanja zraka je stvaranje odgovarajućeg podtlaka u „mokrim“ prostorijama u odnosu na okolne prostorije te postojanje ventilacijskih otvora na fasadi „suhih“ prostorija i prestrujnih otvora.

Radom odsisnog ventilatora postoji tendenca da se unutar zgrade stvori podtlak zbog čega dolazi do podizanja ravnine neutralnog tlaka. Ovisno o visini na koju je ravnina neutralnog tlaka podignuta dolazi do smanjenja ekfiltracije. Kad je ravnina neutralnog tlaka podignuta iznad stropa zadnje grijane etaže, ekfiltracija zraka je potpuno isključena.

Sustav odsisne ventilacije se može sastojati od pojedinačnih odsisnih ventilatora za pojedine „vlažne“ prostorije ili biti riješen kao centralni sustav s jednim centralnim ventilatorom dovoljnog kapaciteta na koji su mrežom kanala spojeni svi odsisni otvori.

U sustavu centralne odsisne ventilacije može se koristiti manja toplinska pumpa za rekuperaciju topline iz odsisnog zraka bilo za potrebe sustava grijanja, bilo za pripremu potrošne tople vode.

Ako se radi o većoj zgradi, prethodno ju treba podijeliti u zone s odvojenim sustavima odsisne ventilacije.

Sustav odsisne ventilacije nije prikladan za zgrade koje se nalaze u bučnom i/ili onečišćenom okolišu.

7.4.4.4 Sustav odsisno-tlačne ventilacije

Kod sustava odsisno-tlačne ventilacije zrak se, pomoću ventilatora smještenog u tlačnom razvodu i ventilatora u odsisnom razvodu, istodobno prisilno izvlači i ubacuje u prostor.

Sustav odsisno-tlačne ventilacije sastoji se od jednog ventilatora za dobavu zraka i jednog ventilatora za odsis zraka te mreže horizontalnih i vertikalnih kanala za distribuciju dobavnog zraka i odvođenje odsisnog zraka. Svježi zrak se može dovoditi u „suhe“ prostorije, a potrošeni zrak odvoditi iz „mokrih“ prostorija ili svaka prostorija može imati mogućnost dobave i odsisa zraka. Sustav odsisno-tlačne ventilacije je najsavršeniji oblik sustava ventilacije.

Kod ovog sustava ventilacije moguća je obrada dobavnog zraka u centralnoj ventilacijskoj jedinici za obradu zraka u pogledu njegove čistoće, temperature i vlažnosti te povrat topline iz odsisnog zraka. Potrošeni zagrijani zrak umjesto izravnog ispuštanja u okoliš, prolazi kroz uređaj za povrat topline i pri tome se zagrijava ulazni vanjski zrak.

Kada je dobava zraka jednaka odsisu zraka, sustav ventilacije ne utječe na prirodnu raspodjelu tlaka zraka unutar zgrade, kao ni na položaj ravnine neutralnog tlaka. Takovi prostori se nazivaju neutralni ili uravnoteženi. Ako je protok dobavnog zraka veći od protoka odsisnog zraka, u prostoru će biti pretlak, a ako je protok odsisnog zraka veći od protoka dobavnog zraka u prostoru će biti podtlak. Različitom količinom izvučenog i ubačenog zraka može se postići učinak tlačne ili odsisne ventilacije. U pravilu pretlak se osigurava u „čistim“ prostorijama (učionice, operacijske dvorane,...) kako bi se spriječio prodor zraka iz okolnih prostorija, a podtlak se osigurava u „onečišćenim“ prostorijama (laboratoriji, radionice, kuhinja,...) kako bi se spriječilo širenje onečišćenja i mirisa iz ovih prostorija.

Moguće kategorije uvjeta tlaka (eng.: pressure conditions, PC) u prostoriji dane su u tablici 7.7.

Tablica 7.7 Uvjeti tlaka u prostoriji, prema HRN EN 13779 [87]

Kategorija	Opis (situacija bez vjetrova i bez efekta dimnjaka)
PC1	Podtlak (< -6 Pa)
PC2	Mali podtlak (-2 do -6 Pa)
PC3	Uravnoteženi tlak (-2 do $+2$ Pa)
PC4	Mali pretlak (2 do 6 Pa)
PC5	Pretlak (>6 Pa)

Kada se sustav odsisno-tlačne ventilacije koristi samo za „čistu ventilaciju“ (ne i za grijanje i/ili hlađenje prostora) potrebno je zimi predgrijati, a ljeti predhladiti vanjski zrak kako se temperature dobavnog zraka i zraka u prostoriji ne bi previše razlikovale i time izbjegao osjećaj propuha. U tom su slučaju sustavi ventilacije i sustavi grijanja i hlađenja prostora potpuno razdvojeni.

Sustav odsisno-tlačne ventilacije može se istovremeno koristiti i za grijanje i/ili hlađenje prostora zgrade. Obujamski protok dobavnog zraka koji je potreban iz higijenskih razloga u pravilu je mnogo manji od obujamskog protoka za obavljanje funkcije grijanja ili hlađenja prostora. Zato je sustav koji služi istovremeno za ventilaciju i grijanje / hlađenje prostora predimenzioniran s obzirom na potrebu ventilacije prostora pa je radi štednje energije, u tom slučaju, potrebno predvidjeti mogućnost djelomične recirkulacije (optoka) odsisnog zraka tj. miješanje dijela odsisnog zraka s vanjskim svježim zrakom.

Ventilacija prostora se, kod sustava odsisno-tlačne ventilacije, može regulirati po potrebi kako bi se zadovoljili trenutni zahtjevi za svježim zrakom. Ako npr. u kući boravi više ljudi potrebna je veća obnova zraka nego u slučaju kad je kuća prazna. Mogućnost regulacije protoka ventilacije po potrebi obnove zraka te povrat topline iz odsisnog zraka značajno doprinose smanjenju potrošnje energije.

Pretpostavka za izvedbu sustava odsisno-tlačne ventilacije je vrlo dobra nepropusnost za zrak toplinske ovojnice zgrade, kako bi prirodni procesi infiltracije i eksfiltracije zraka bili što manji. Zgrade s uravnoteženim sustavom moraju imati vrijednost n_{50} manju od $1,0 \text{ h}^{-1}$ za visoke zgrade (zgrade više od tri kata) i manju od $2,0 \text{ h}^{-1}$ u slučaju niskih zgrada. Navedene vrijednosti n_{50} odnose se na ukupnu propusnost zgrade kada su svi prozori i namjerno izvedeni otvori u ovojnici zgrade zatvoreni tijekom ispitivanja.

Tablica 7.8 Zbirni tabelarni pregled svojstava različitih tipova ventilacijskih sustava

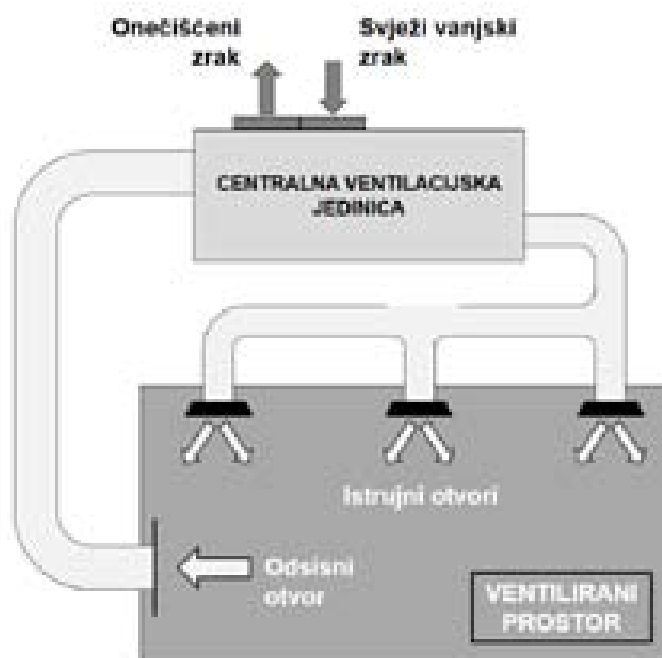
	Kriteriji	Prirodna ventilacija	Tlačna ventilacija	Odsisna ventilacija	Odsisno-tlačna ventilacija
KONCEPT	<i>Primjena u slučaju rekonstrukcije</i>	Jednostavna izvedba	Nije uvijek prikladna kod rekonstrukcije	Primjenjiva kod novih zgrada i kod rekonstrukcija	Rijetko zadovoljava kod rekonstrukcija
	<i>Nepropusnost za zrak vanjske ovojnice zgrade</i>	Zahjeva se dobra nepropusnost za zrak	Zahjeva se vrlo dobra nepropusnost za zrak	Zahjeva se vrlo dobra nepropusnost za zrak	Vrlo visoki zahtjevi na nepropusnost za zrak
	<i>Složenost sustava</i>	Zahjeva samo otvore za dovod zraka i vertikalne kanale za odvod zraka, te prestrujne otvore	Relativno jednostavan sustav	Relativno jednostavan sustav	Složeniji sustav
	<i>Količina ventilacijskih kanala</i>	Vertikalni ventilacijski kanali s otvorom u krovu	Vertikalni ventilacijski kanali i mreža kanala dobavnog zraka	Mreža odsisnih kanala	Zahjeva dvije mreže kanala: dobavnu i odsisnu mrežu
KVALITETA ZRAKA	<i>Filtriranje zraka, obrada zraka</i>	Dobavni zrak se ne može filtrirati	Dobavni zrak se može filtrirati, a temperatura i vlažnost zraka kondicionirati	Dobavni zrak se ne može obrađivati	Dobavni zrak se može filtrirati, a temperatura i vlažnost zraka kondicionirati
	<i>Opasnost povrata zraka i infiltracija plinova iz tla</i>	Postoji opasnost ako je prostor zgrade u podtlaku u odnosu na vanjski zrak	Opasnost smanjena zbog pretlaka u prostoru zgrade	Može nastati inverzija vučenja ili povratak plinova	Nema opasnosti jer se određene prostorije mogu staviti u pretlak (ili podtlak)
	<i>Prenošenje buke</i>	Ulazni otvor za zrak omogućuje prolaz buke	Dobra nepropusnost za buku (uz odgovarajući položaj ulaza za vanjski zrak)	Ulazni otvor za zrak omogućuje prolaz buke	Prenošenje buke je ograničeno (uz uvjet odgovarajućeg rješenja)
BUKA	<i>Kontrola protoka dobavnog zraka</i>	Protok bitno ovisan o prirodnim pojavama koje uzrokuju strujanje zraka	Protok dobavnog zraka je kontroliran	Nema kontrole protoka dobavnog zraka	Protok dobavnog zraka je kontroliran
	<i>Kontrola protoka odsisnog zraka</i>	Protok bitno ovisan o prirodnim pojavama koje uzrokuju strujanje zraka	Nema kontrole protoka odsisnog zraka	Protok odsisnog zraka je kontroliran	Protok odsisnog zraka je kontroliran
	<i>Upravljanje protocima zraka</i>	Mogućnost regulacije otvora, ali protoci nisu poznati	Upravlja se može samo protokom dobavnog zraka	Upravlja se može samo protokom odsisnog zraka	Upravlja se može protokom dobavnog i odsisnog zraka
	<i>Održavanje instalacije</i>	Komponente sustava zahtijevaju vrlo malo održavanje	Potrebno redovito održavanje	Potrebno redovito održavanje	Potrebno redovito održavanje
ENERGIJA	<i>Rekuperacija topline</i>	Nema rekuperacije topline	Nema rekuperacije topline	Može se integrirati toplinska pumpa za rekuperaciju topline iz odsisnog zraka	Može se rekuperirati toplina sadržana u odsisnom zraku za predgrijanje svježeg zraka
	<i>Potrošnja električne energije</i>	Nema potrošnje elekt. energije	Potrebna električna energija	Potrebna električna energija	Potrebna električna energija

7.4.4.5 Komponente sustava prisilne ventilacije

Sustav centralne prisilne ventilacije sastoji se od slijedećih komponenata:

- centralne ventilacijske jedinice za pripremu zraka za ventilaciju (za tlačni i odsisno-tlačni sustav),
- mreže kanalnog razvoda (tlačnog i / ili odsisnog),
- tlačnih i / ili odsisnih distributera,
- usisne i / ili ispušne vanjske rešetke,
- sustava regulacije procesa ventilacije.

Na slici 7.24 shematski je prikazan sustav ventilacije s centralnom jedinicom za pripremu zraka.



Slika 7.24 Shema sustava prisilne ventilacije s centralnom jedinicom za pripremu zraka

S obzirom na kvalitetu unutarnjeg zraka, sustavi ventilacije (i klimatizacije) moraju imati mogućnost regulacije / kontrole. Na toj osnovi utvrđena je u HRN EN 13779 [87] razredba sustava s obzirom na njihovu sposobnost regulacije. Različiti tipovi regulacije prikazani su u tablici 7.9.

Tablica 7.9 Tipovi regulacije kvalitete unutrašnjeg zraka (eng.: indoor air quality control, IDA-C), prema HRN EN 13779 [87]

Kategorija	Tip regulacije	Opis
IDA-C 1	Bez regulacije	Sustav stalno radi
IDA-C 2	Ručna regulacija	Sustav radi u skladu s ručno kontroliranim prekidačem
IDA-C 3	Vremenska regulacija	Sustav radi u skladu sa zadanim vremenskim programom
IDA-C 4	Regulacija prema korištenju	Sustav radi ovisno o nečijoj prisutnosti (prekidač za svjetlo, infracrveni senzori,...)

IDA-C 5	Regulacija prema prisutnosti (broju osoba)	Sustav radi ovisno o broju ljudi u prostoru
IDA-C 6	Izravna regulacija	Sustav izravno mjeri parametre unutarnjeg zraka s osjetnicima CO ₂ , COV,...

7.4.5 Potrebna energija za obradu zraka kod sustava ventilaciju

7.4.5.1 Općenito

Potrošnja energije sustava za ventilaciju može se promatrati kao izravna potrošnja koja obuhvaća energiju koja se potroši za obradu i strujanje zraka i kao neizravna potrošnja koja se odnosi na ventilacijske toplinske gubitke grijanja i hlađenja prostora zgrade.

Potrebna korisna energija za toplinsku pripremu zraka je proračunata energija u obliku topline, „hladnoće“ i topline za proizvodnju vodene pare, koja je potrebna za zagrijavanje, ohlađivanje, ovlaživanje i odvlaživanje zraka radi promjene njegova termodinamičkog stanja od stanja vanjskog zraka na željeno stanje dobavnog zraka, uzimajući u obzir sklop komponenata ventilacijskog sustava, vođenje procesa i povrat energije.

Potrebna konačna energija za strujanje zraka u ventilacijskom sustavu je proračunata električna energija za sklop ventilator – naprava za prijenos energije – motor, koja je potrebna za strujanje željenog obujamskog protoka zraka unutar proračunskog razdoblja.

Za proračun ventilacijskih toplinskih gubitaka potrebno je prethodno utvrditi karakteristične termodinamičke vrijednosti stanja dobavnog zraka (temperaturu i vlažnost zraka).

U nastavku promatrani sustavi za ventilaciju ne obuhvaćaju izravno grijanje i hlađenje prostora, već samo predgrijanje i predhlađenje (predgrijač i hladnjak). Metodologija proračuna potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora sa sustavom zračnog grijanja i zračnog hlađenja dana je u HRN EN 15243 [127].

Polazeći od obujamskih protoka zraka, u nastavku su dani izrazi za proračun promjene temperature i vlažnosti ventilacijskog zraka u svakoj komponenti ventilacijskog sustava, te izrazi za proračun energija potrebnih za tu obradu zraka (odleđivanje, predgrijanje, predhlađenje, ovlaživanje i odvlaživanje). Proračun je moguće provesti na mjesečnoj ili satnoj bazi.

Potrebni ulazni podaci za proračun na satnoj bazi su temperatura i vlažnost vanjskog i unutarnjeg zraka po satima. Da bi se izbjegla iteracija mogu se za temperaturu i vlažnost unutarnjeg zraka koristiti proračunate vrijednosti za prethodne satove. Nadalje treba utvrditi postavne vrijednosti za temperaturu i relativnu vlažnost zraka te obujamske protoke zraka za ventilaciju. Proračun temperature i vlažnosti zraka te potrebnih energija provodi se, kod satne metode, u pravilu slijedećim redoslijedom:

- proračun karakteristika odsisnog zraka prije izmjenjivača topline,
- proces vođenja vanjskog zraka (zagrijavanje i miješanje s infiltriranim zrakom),
- proračun karakteristika vanjskog zraka prije izmjenjivača topline,
- odleđivanje,
- proračun karakteristika odsisnog i dobavnog zraka nakon izmjenjivača topline,
- izmjenjivač topline,
- kod dodatne obrade dobavnog zraka, proračun:
 - o ventilatora,
 - o toplinskih gubitaka zbog propuštanja zračnih kanala izvan zgrade,
 - o predgrijanja,
 - o prethlađenja,
 - o ovlaživanja.

Konačni rezultati su godišnje (mjesečne) vrijednosti potrebne energije za predgrijanje, predhlađenje i pomoćne energije. Ako su, na nacionalnoj razini, rezultati linearno ovisni o vanjskoj temperaturi, može se provesti proračun i na bazi srednjih mjesečnih vrijednosti.

U nastavku je prikazano kako se proračunava temperatura i relativna vlažnost zraka koji se dovodi u kondicionirani (klimatizirani) prostor zgrade te odgovarajuća energija (za odleđivanje, predgrijanje, predhlađenje, ovlaživanje i odvlaživanje) i električna pomoćna energija potrebne za njegovu obradu. Za proračun se koristi metodologija iz HRN EN 15241 [128].

7.4.5.2 Transmisijski gubitci topline zračnih kanala koji se nalaze u kondicioniranoj zoni

Kod ventilacijskih sustava koji niti griju niti hlade ovi se toplinski gubitci mogu zanemariti.

U suprotnom slučaju, za proračun toplinskih gubitaka kanala koriste se jednadžbe koje se inače koriste za zračne kanale izvan kondicionirane zone, s tim da je ovdje temperatura zraka oko zračnih kanala jednaka temperaturi zone.

Ako dolazi do izmjene topline iz zone na zrak u zračnom kanalu, mora se dopuniti bilanca energije prostorija.

7.4.5.3 Transmisijski gubitci topline zračnih kanala koji se nalaze izvan kondicionirane zone

Karakteristike zraka u zračnom kanalu mijenjanu se na slijedeći način:

$$\Theta_2 = \Theta_1 + \Delta T_{\text{duct}} \quad (7.25)$$

$$x_2 = x_1 \quad (7.26)$$

gdje je:

ΔT_{duct} razlika između temperature zraka na ulasku u kanal i na izlasku iz kanala, u K,

Θ_1 temperatura zraka kod ulaska u zračni kanal, u °C,

x_1 vlažnost zraka kod ulaska u zračni kanal, u g/kg suhog zraka,

Θ_2 temperatura zraka kod izlaska iz zračnog kanala, u °C,

x_2 vlažnost zraka kod izlaska iz zračnog kanala, u g/kg suhog zraka.

ΔT_{duct} se proračuna prema jednadžbi:

$$\Delta T_{\text{duct}} = (\Theta_1 - \Theta_{\text{surduct}}) \times \left(1 - \exp \frac{H_{\text{duct}}}{0,34 \times q_{\text{ve,duct}}} \right) \quad (7.27)$$

gdje je:

Θ_{surduct} temperatura zraka oko zračnog kanala, u ovom slučaju jednaka temperaturi vanjskog zraka, u °C,

H_{duct} koeficijent prijenosa topline zračnog kanala prema okolišu, u W/K, (vidjeti točku 6.12.2)

$q_{\text{ve,duct}}$ obujamski protok zraka u zračnom kanalu, u m³/h.

7.4.5.4 Gubitci kroz mjesta propuštanja zraka zračnih kanala

Infiltracijski i eksfiltracijski tokovi zraka zračnog kanala proračunavaju se prema metodologiji iz HRN EN 15242 [88] (vidjeti točku 5.5.4).

Ako zrak eksfiltracijom izlazi iz zračnog kanala, ne dolazi do promjene karakteristika zraka u zračnom kanalu (mijenja se samo obujamski protok zraka).

Kod infiltracije miješa se vanjski zrak sa zrakom u zračnom kanalu.

7.4.5.5 Ventilator

Temperatura zraka nakon prolaska kroz ventilator povećati će se za vrijednost ΔT_{fan} koja se proračunava izrazom:

$$\Delta T_{\text{fan}} = \frac{(F_{\text{fan}} \times R_{\text{f,r}})}{(\rho \times c \times q_{\text{ve,fan}})} \quad (7.28)$$

gdje je:

ΔT_{fan} porast temperature zraka u kanalu uslijed prolaska zraka kroz ventilator, u K,

F_{fan} snaga ventilatora, u W,

$R_{\text{f,r}}$ stupanj povrata topline ventilatora, (-),

$\rho \times c$ umnožak gustoće zraka i specifičnog toplinskog kapaciteta zraka, u Wh/(m³K). Kao standardna vrijednost može se koristiti vrijednost $\rho \times c = 0,34$ Wh/(m³K) (kod 20 °C),

$q_{\text{ve,fan}}$ je obujamski protok zraka kroz ventilator, u m³/h.

U skladu s HRN EN 13779 [87], u tablici 7.13 dana je razredba specifične snage ventilatora, a u tablici 7.14 dane su zadane kategorije specifične snage ventilatora.

Stupanj povrata topline ventilatora, $R_{\text{f,r}}$, je odnos topline koja s ventilatora prelazi na zrak i ventilatoru dovedene električne energije. Standardne vrijednosti stupnja povrata topline ventilatora, $R_{\text{f,r}}$, dane su u tablici 7.10. Ako je položaj motora nepoznat, mora se koristiti nepovoljnija vrijednost. Kod hlađenja to je slučaj kad je motor u struji zraka, a kod grijanja kad je izvan struje zraka.

Tablica 7.10 Standardne vrijednosti stupnja povrata topline ventilatora, $R_{\text{f,r}}$

Položaj motora za rad ventilatora	Standardna vrijednost $R_{\text{f,r}}$
Motor u struji zraka	0,9
Motor izvan struje zraka	0,6

Za uređaj s promjenjivim obujamskim protokom zraka vidjeti HRN EN 15241 [128].

7.4.5.6 Izmjenjivač topline za isključivo osjetilnu toplinu

Kod jednakog obujamskog protoka dobavnog i odsisnog zraka, promjene temperature zraka zbog izmjenjivača topline iznose nakon izmjenjivača topline:

$$\Theta_{\text{s2}} = \Theta_{\text{s1}} + \Delta T_{\text{HE,sup}} \quad (7.29)$$

$$\Theta_{\text{e2}} = \Theta_{\text{e1}} + \Delta T_{\text{HE,ext}} \quad (7.30)$$

gdje je:

Θ_{e1} temperatura odsisnog zraka prije izmjenjivača topline,

Θ_{s1} temperatura dobavnog zraka prije izmjenjivača topline,

Θ_{e2} temperatura odsisnog zraka nakon izmjenjivača topline,

Θ_{s2} temperatura dobavnog zraka nakon izmjenjivača topline,

$$\Delta T_{\text{HE,sup}} = \text{Eff}_{\text{HE}}(\Theta_{\text{e1}} - \Theta_{\text{s1}})$$

$$\Delta T_{\text{HE,ext}} = -\Delta T_{\text{HE,sup}}$$

Eff_{HE} stupanj povrata topline izmjenjivača topline za jednake ili približno jednake protoke dobavnog i odsisnog zraka.

U gornjim izrazima indeks HE naznačuje da se pripadni parametar odnosi na izmjenjivač topline.

7.4.5.7 Aspekti odleđivanja

Da bi se spriječilo zaleđivanje izmjenjivača topline postoje dvije mogućnosti:

- a) ako je moguće, izravna regulacija odleđivanja u izmjenjivaču topline (obilazak (Bypass), rotirajući izmjenjivač topline ili odvojeno isključenje ventilatora dobavnog zraka),
- b) upotreba uređaja za odleđivanje kojim se zagrijava (predgrije) vanjski zrak. Ovaj uređaj za odleđivanje je smješten ispred izmjenjivača topline, sa zadaćom da spriječi njegovo zaleđivanje.

U oba slučaja je temperatura otpadnog zraka, θ_{e2} , ograničena na jednu minimalnu vrijednost, $\theta_{e2,min}$.

Ako nema podataka na nacionalnoj razini, mogu se koristiti slijedeće standardne vrijednosti za $\theta_{e2,min}$:

Stambene zgrade	5 °C
Pločasti izmjenjivač topline za nestambene zgrade	0 °C
Rotirajući izmjenjivač topline za nestambene zgrade	-5 °C
Standardna vrijednost za $\theta_{set,defrost}$	5 °C

a) Izravna regulacija odleđivanja:

Na θ_{e2} mora se primijeniti korekcijska vrijednost $\Delta(\Delta T_{HE,ext})_a$

$$\Delta(\Delta T_{HE,ext})_a = \max(0 ; (\theta_{e2,min} - \theta_{e2})) \quad (7.31)$$

Ako su obujamski protoci dobavnog i odsisnog zraka jednaki, mora se primijeniti ista korekcijska vrijednost na temperaturu dobavnog zraka, θ_{s2} :

$$\Delta(\Delta T_{HE,sup})_a = -\Delta(\Delta T_{HE,ext})_a \quad (7.32)$$

Korigirana vrijednost za θ_{s2} je niža nego prvobitna vrijednost, što odgovara gubitcima topline zbog odleđivanja.

b) Uređaj za odleđivanje (odleđivač)

Vanjski zrak se zagrije do vrijednosti $\theta_{set,defrost}$. Za zagrijavanje zraka potrebna snaga grijanja, $P_{defrost}$, izražena u W, proračuna se iz jednadžbe:

$$P_{defrost} = \max[0; 34 \times q_{ve} \times (\theta_{set,defrost} - \theta_{s1})] \quad (7.33)$$

Da bi se održavala minimalna temperatura otpadnog zraka, $\theta_{e2,min}$, mora se proračunati vrijednost $\theta_{set,defrost}$, koja kod jednakih obujamskih protoka dobavnog i odsisnog zraka iznosi:

$$\theta_{set,defrost} = \theta_{e1} + \frac{(\theta_{e2,min} - \theta_{e1})}{Eff_{HE}} \quad (7.34)$$

Vrijednost $\theta_{set,defrost}$ raste s porastom stupnja povrata topline.

Karakteristične vrijednosti zraka proračunaju se kako slijedi:

$$\begin{aligned} \theta_{s1} &= \theta_{ext} \\ x_{s1} &= x_{ext} \\ \theta_{s2} &= \max(\theta_{s1}; \theta_{set,defrost}) \\ x_{s2} &= x_{s1} \end{aligned} \quad (7.35)$$

7.4.5.8 Ograničavanje temperature dobavnog zraka

Vrijedi samo ako postoji Bypass (prijenosnica).

Temperatura dobavnog zraka, θ_{s2} , može se ograničiti na najveću vrijednost, $\theta_{s2,max}$, kako bi se spriječio da se zagrijava zrak u razdoblju hlađenja. Vrijednost $\Delta T_{HE,sup}$ mora se korigirati na slijedeći način:

$$\Delta(\Delta T_{HE,sup})_b = \min[(0 ; \max(\theta_{s2,max} - \theta_{s2}; \theta_{s1} - \theta_{s2})] \quad (7.36)$$

Ako nema ograničenja, ista formula se može primijeniti kada se $\theta_{s2,max}$ postavi na visoku vrijednost (npr. 100 °C).

Nova vrijednost za θ_{s2} s regulacijom (θ_{s2})_c je onda:

$$(\theta_{s2})_c = \theta_{s2} + \Delta(\Delta T_{HE,sup})_a + \Delta(\Delta T_{HE,sup})_b \quad (7.37)$$

7.4.5.9 Komora za miješanje

Dobavni zrak je smjesa vanjskog zraka i optočnog zraka. Miješanje se događa u komori za miješanje (ili komori optočnog zraka) pomoću zaklopca za zrak.

Polazi se od toga da su poznati obujamski protoci dobavnog i otpadnog zraka u zgradi. Optočni zrak mijenja stoga samo protok zraka koji napušta zgradu i to kako slijedi:

$$q_{ve,s1} = (1 - R_{rec}) \times q_{ve,s2} \quad (7.38)$$

$$q_{ve,e2} = (1 - R_{rec}) \times q_{ve,e1} \quad (7.39)$$

$$\theta_{s2} = R_{rec} \times \theta_{e1} + (1 - R_{rec}) \times \theta_{s1} \quad (7.40)$$

$$x_{s2} = R_{rec} \times x_{e1} + (1 - R_{rec}) \times x_{s1} \quad (7.41)$$

$$\theta_{e2} = \theta_{e1} \quad (7.42)$$

$$x_{e2} = x_{e1} \quad (7.43)$$

gdje je:

- θ_{e1} temperatura odsisnog zraka prije komore za miješanje, u °C,
- x_{e1} vlažnost odsisnog zraka prije komore za miješanje, u g/kg suhog zraka,
- $q_{ve,e1}$ obujamski protok odsisnog zraka prije komore za miješanje, u m³/h,
- θ_{e2} temperatura odsisnog zraka nakon komore za miješanje, u °C,
- x_{e2} vlažnost odsisnog zraka nakon komore za miješanje, u g/kg suhog zraka,
- $q_{ve,e2}$ obujamski protok odsisnog zraka nakon komore za miješanje, u m³/h,
- θ_{s1} temperatura dobavnog zraka prije komore za miješanje, u °C,
- x_{s1} vlažnost dobavnog zraka prije komore za miješanje, u g/kg suhog zraka,
- $q_{ve,s1}$ obujamski protok dobavnog zraka prije komore za miješanje, u m³/h,
- θ_{s2} temperatura dobavnog zraka nakon komore za miješanje, u °C,
- x_{s2} vlažnost dobavnog zraka nakon komore za miješanje, u g/kg suhog zraka,
- $q_{ve,s2}$ obujamski protok dobavnog zraka nakon komore za miješanje, u m³/h,
- R_{rec} udio optočnog zraka u dobavnom zraku.

Slično kao kod izmjenjivača topline može se udio optočnog zraka regulirati, da bi se štedjela energija. Dovod vanjskog zraka povećava se samo ako je to potrebno.

7.4.5.10 Predgrijanje

Iz razloga ugodnosti, dobavni zrak se zagrije na vrijednost $\theta_{set,PH}$. Potrebna snaga grijanja $P_{preheat}$, u W, te temperatura i vlažnost proračunaju se kako slijedi:

$$P_{preheat} = \max[0; 0,34 \times q_{ve,PH} \times (\theta_{set,PH} - \theta_1)] \quad (7.44)$$

$$\theta_2 = \max(\theta_1; \theta_{set,PH}) \quad (7.45)$$

$$x_2 = x_1 \quad (7.46)$$

gdje je:

- $q_{ve,PH}$ obujamski protok zraka kroz predgrijač, u m³/h,
- $\theta_{set,PH}$ postavna temperatura za predgrijanje, u °C,
- θ_1 temperatura zraka prije predgrijača, u °C,
- θ_2 temperatura zraka nakon predgrijača, u °C,
- x_1 vlažnost zraka prije predgrijača, u g/kg suhog zraka,
- x_2 vlažnost zraka nakon predgrijača, u g/kg suhog zraka.

Vrijednosti za $\theta_{set,PH}$, ovisno o primjeni, mogu se nalaziti u području od 12 °C do 15 °C.

7.4.5.11 Predhlađenje

Iz razloga ugodnosti, dobavni zrak se ohladi na vrijednost $\theta_{set,PC}$. Potrebna snaga hlađenja $P_{precool}$, u W, proračuna se kako slijedi:

$$P_{precool} = q_{ve,PC} \times [0,83 \times (x_2 - x_1) + 0,34 \times (\theta_2 - \theta_1)] \quad (7.47)$$

gdje je:

- $q_{ve,PC}$ obujamski protok zraka kroz predhladnjak, u m³/h,
- θ_1 temperatura zraka prije predhladnjaka, u °C,
- θ_2 temperatura zraka nakon predhladnjaka, u °C,
- x_1 vlažnost zraka prije predhladnjaka, u g/kg suhog zraka,

$$x_2 = x_1 + \Delta x_{PC} \quad (7.48)$$

$$\theta_2 = \theta_1 + \Delta T_{PC} \quad (7.49)$$

gdje je:

$$\Delta T_{PC} = \max(0; \theta_1 - \theta_{set,PC})$$

$$\Delta x_{PC} = \min(0; x_{coil} - x_1) \times (1 - BP_{av,factor})$$

$$x_{coil} = \text{EXP}[18,8161 - 4110,34 / (\theta_{coil} + 235)]$$

$$BP_{av,factor} = \min[1; (\theta_2 - \theta_{coil}) / (\theta_1 - \theta_{coil})]$$

θ_{coil} temperatura predhladnjaka sa standardnom vrijednosti od 8 °C

$BP_{av,factor}$ je usrednjeni faktor spojnice (Bypass – Faktor), koji uzima u obzir regulaciju temperature i stoga može biti veći nego stvarni Bypass – Faktor.

7.4.5.12 Ovlaživanje u zimi

Polazeći od obujamskog protoka zraka uzrokovanog ventilacijskim uređajem proračunati će se vlažnost zraka koji ulazi u grijanu zonu i energija potrošena za njegovo ovlaživanje. Zrak se ovlažuje do vrijednosti $x_{set,hum}$, dane u g/kg suhog zraka. Potrebna toplinska snaga za ovlaživanje zraka kod konstantne temperature, P_{hum} , u W, proračuna se na slijedeći način:

$$P_{hum} = 0,83 \times q_{ve,hum} \times \max[0; (x_{set,hum} - x_1)] \quad (7.50)$$

gdje je:

- $q_{ve,hum}$ obujamski protok zraka kroz ovlaživač zraka, u m³/h,
- x_1 vlažnost zraka prije ovlaživača, u g/kg suhog zraka.

Svojstva zraka (θ_2 , x_2) nakon ovlaživača su:

$$\theta_2 = \theta_1$$

$$x_2 = \max(x_1; x_{set,hum})$$

gdje je:

- θ_1 temperatura zraka prije ovlaživača, u °C,
- θ_2 temperatura zraka nakon ovlaživača, u °C,
- x_2 vlažnost zraka nakon ovlaživača, u g/kg suhog zraka.

Pretpostavlja se da temperatura ostaje konstantna (ovlaživanje parom) ili da se zrak zagrije da bi se održavala konstantnom (ovlaživanje vodom).

Ove formule vrijede, stoga, samo za povećanje vlažnosti zraka u zimi da bi se izbjegao osjećaj suhoće a ne za toplinsku ugodnost u ljetnim uvjetima (hlađenje isparavanjem).

7.4.5.13 Odvlaživanje

S odvlaživanjem se treba postići određeni smanjeni stupanj vlažnosti zraka. Zrak se osuši do vrijednosti $x_{\text{set,dhum}}$ u g/kg suhog zraka. Za proračun se primjenjuje jednadžba koja je ranije dana za prethlađenje, pri čemu je temperatura tako prilagođena da se postigne postavna vrijednost vlažnosti.

U većini slučajeva je potrebno uključiti zagrijavanje, pri čemu se postupa kako je opisano za predgrijanje.

Proračun uslijedi samo kada je postavna vrijednost vlažnosti, $x_{\text{set,dhum}}$, u g/kg suhog zraka, manja nego stupanj vlažnosti prije odvlaživača, x_1 .

Ako je poznat faktor prijenosnice (Bypass-Faktor), BP_{coil} , tada se x_{coil} proračuna kako slijedi:

$$x_{\text{coil}} = \frac{(x_{\text{set,dhum}} - x_1 \times BP_{\text{coil}})}{(1 - BP_{\text{coil}})} \quad (7.51)$$

Ako faktor prijenosnice nije poznat, stavi se da je njegova vrijednost nula.

Temperatura odnosno postavna vrijednost temperature odvlaživača proračuna se kako slijedi:

$$\Theta_{\text{coil}} = \frac{4110,34}{(18,8161 - \ln(x_{\text{coil}}))} - 235 \quad (7.52)$$

$$\Theta_{\text{set,coil}} = \Theta_{\text{coil}}$$

7.4.6 Potrebna konačna energija za rad sustava za ventilaciju

Toplinski gubici sustava i potrebna konačna energija za rad sustava za ventilaciju određuju se u skladu s odgovarajućom normom za sustav ventilacije.

Kod proračuna toplinskih gubitaka sustava za ventilaciju u obzir se mora uzeti slijedeće:

- 1 *toplinski gubici zbog propuštanja ventiliranog zraka, ako postoje ventilacijski kanali.*
Toplinski gubici zbog propusnosti zraka ventilacijskih kanala moraju se uključiti, ovisno o lokaciji kanala, kao povratni toplinski gubici, dodani unutarnjim toplinskim dobitcima zgrade ili zone zgrade, ili kao ukupni gubici i kao toplinski gubici sustava vraćeni u sustav ventilacije.
- 2 *centralno predgrijanje ili predhlađenje, ako postoji.*

a) godišnja potrebna konačna energija za centralno predgrijanje dobavnog zraka, $Q_{V,\text{sys,pre-heat,an}}$, izražena u MJ, dana jednadžbom:

$$Q_{V,\text{sys,pre-heat,an}} = \sum_m \left(\frac{f_{H,m} \times Q_{V,\text{nd,pre-heat,m}}}{\eta_{V,\text{sys,pre-heat}}} \right) \quad (7.53)$$

gdje je:

$f_{H,m}$ dio mjeseca m koji je dio stvarne sezone grijanja za rad uređaja ovisnih o duljini sezone grijanja, proračunat prema točki 6.8.7,

$Q_{V,\text{nd,pre-heat,m}}$ potrebna korisna energija za predgrijanje u mjesecu m , proračunana prema točki 6.13, u MJ,

$\eta_{V,\text{sys,pre-heat}}$ ukupna efikasnost sustava za sustav predgrijanja, uključujući gubitke proizvodnje, prijenosa, pohrane, razvoda, predaje i regulacije, osim ako je odvojeno iskazano kao pomoćna energija, određeno u skladu s odgovarajućim normama za sustave grijanja i ventilacije.

b) godišnja potrebna konačna energija za centralno predhlađenje dobavnog zraka, $Q_{V,sys,pre-cool,an}$, izražena u MJ, dana jednadžbom:

$$Q_{V,sys,pre-cool,an} = \sum_m \left(\frac{f_{C,m} \times Q_{V,nd,pre-cool,m}}{\eta_{V,sys,pre-cool}} \right) \quad (7.54)$$

gdje je:

$f_{C,m}$ dio mjeseca m koji je dio stvarne sezone hlađenja za rad uređaja ovisnih o duljini sezone hlađenja, proračunat prema točki 6.9.7,
 $Q_{V,nd,pre-cool,m}$ potrebna korisna energija za predhlađenje u mjesecu m , proračunana prema točki 6.13, u MJ,
 $\eta_{V,sys,pre-cool}$ ukupna efikasnost sustava za sustav predhlađenja, uključujući gubitke proizvodnje, prijenosa, pohrane, razvoda, predaje i regulacije, osim ako je odvojeno iskazano kao pomoćna energija, određeno u skladu s odgovarajućim normama za sustave hlađenja i ventilacije.

U sezonskoj metodi, mjesečni se zbroj zamjenjuje omjerom stvarne duljine sezone grijanja ili sezone hlađenja i utvrđene duljine sezone grijanja ili hlađenja, u skladu s točkom 6.8.7.2, odnosno 6.9.7.2.

3 potrebna konačna energija za rad ventilatora i regulacije:

- konačna energija za ventilatore,
- konačna energija za odmrzavanje jedinice za povrat topline.

7.5 SUSTAVI HLAĐENJA PROSTORA

7.5.1 Uvod

Hlađenje prostora je proces snižavanja i održavanja temperature zraka u nekom prostoru na temperaturi nižoj od okolišne, odvođenjem topline. Hlađenje zraka može biti izravno (zrak je preko izmijenjivačkih ploha u izravnom dodiru s radnom tvari) ili neizravno (zrak je preko izmijenjivačkih ploha u dodiru s prijenosnikom rashladne energije). Cilj hlađenja boravišnog prostora je stvaranje toplinski ugodnog ambijenta.

Ako se u nekoj prostoriji želi održavati temperatura zraka koja je niža od temperature zraka u okolici prostorije, onda se mora iz te prostorije stalno odvoditi toplina koja u nju prodire iz okolice i toplina koju oslobađaju toplinski izvori u samoj prostoriji, a za što je potrebno utrošiti određenu količinu energije. To se praktički može riješiti na način da se u prostoriji instalira sustav cijevi kroz koje struji hladna voda. Hladna voda (toplinski spremnik niže temperature) preuzima na sebe toplinu iz prostorije i pri tome se ugrije pa ju je potrebno ponovno ohladiti. Da bi se voda ohladila mora se prenijeti toplina s još uvijek relativno hladne vode na okolicu znatno više temperature (toplinski spremnik više temperature). Kako toplina, sama od sebe, ne prelazi s tijela niže temperature na tijelo više temperature, potrebno je uložiti određenu količinu rada (energije). To se postiže primjenom Carnotova kružnog procesa koji se vrši obrnutim smjerom.

Uređaj za hlađenje je uređaj kojim se hladi zrak ili voda, a njegovu osnovu čini dizalica topline, zasnovana na ljevokretnom kružnom procesu. Kružni proces je proces tijekom kojeg se radna tvar, nakon niza uzastopnih promjena stanja, vraća u početno stanje. U jednom dijelu kružnog procesa radna tvar je u plinovitom stanju, a u drugom dijelu u tekućem stanju.

U rashladnom uređaju cirkulira radna tvar (rashladno sredstvo) u zatvorenom sustavu i u ciklusima se isparava i opet kondenzira. Pri tome je potrebno dovoditi energiju u sustav i odvoditi toplinu iz sustava. Radna tvar ima funkciju prijenosnika energije između niskotemperaturnog i visokotemperaturnog toplinskog spremnika. Ona preuzima toplinu u jednom dijelu rashladnog uređaja (isparivaču) i prenosi je na drugi dio uređaja (kondenzator) na kojem se toplina predaje okolicu.

Svaki rashladni uređaj je ustvari dizalica topline kod koje se koristi rashladna energija. Uređaj za hlađenje koristi toplinsku energiju izmijenjenu na isparivaču. Način rada rashladnog uređaja ne razlikuje se od rada dizalice topline, samo im je namjena suprotna. Rashladni uređaj služi za hlađenje, a dizalica topline za grijanje određenog sudionika u kružnom procesu.

Prema korištenoj pogonskoj energiji, koja omogućuje prijenos topline u spremnik više temperature, razlikuju se dva osnovna tipa rashladnih uređaja:

- kompresijski rashladni uređaji (pogonska energija je mehanička energija – najčešće elektromotorni kompresor),
- apsorpcijski rashladni uređaji (pogonska energija je toplota – plin, para, otpadna toplota).

Za kompresijski rashladni uređaj potreban je pogon elektromotorom, a za apsorpcijski rashladni uređaj potrebno je grijanje.

Uređaji za hlađenje sastavni su dijelovi klimatizacijskih sustava.

7.5.2 Kompresijski rashladni uređaj

Kompresijski rashladni uređaj se sastoji od četiri osnovne komponente:

- kompresora (koji obavlja kompresiju radne tvari),
- kondenzatora (na kojem se toplota kondenzacije radne tvari predaje okolišu – potrebno hlađenje kondenzatora vodom ili zrakom),
- prigušnog ventila (koji prigušuje radnu tvar s tlaka kondenzacije na tlak isparavanja),
- isparivača (na kojem se ostvaruje hlađenje zraka ili tekućine).

Unutar ovih komponenata struji radna tvar koja u isparivaču isparava i zatim se ponovo u kondenzatoru kondenzira i to se stalno ponavlja u kontinuiranim ciklusima.

Kompresor siše paru radne tvari i, uz dodatni utrošak energije, komprimira je na tlak kondenzacije pri čemu temperatura radne tvari raste iznad temperature okoline. To omogućuje da u kondenzatoru dolazi do ukapljivanja radne tvari. Radna tvar se najprije ohladi do temperature kondenzacije a zatim se uslijed daljnjeg odvođenja topline ona kondenzira, tako da se sve više smanjuje količina pare u kondenzatoru, a povećava količina radne tvari u tekućem stanju. Toplinu kondenzacije preuzima okolni zrak ili voda predviđeni za hlađenje kondenzatora. Zatim radna tvar u tekućem stanju istječe iz kondenzatora i prolazi kroz prigušni ventil koji služi za smanjenje tlaka radne tvari s tlaka kondenzacije na tlak isparavanja kod čega se snižava i temperatura radne tvari. U isparivaču se nalazi zrak, voda ili neka smjesa koje se žele ohladiti. Prolazom kroz isparivač radna tvar preuzima toplinu od zraka ili tekućine koje se želi rashladiti. Zbog toga radna tvar isparuje, a zrak odnosno tekućina se ohlađuje. Time je zatvoren jedan ciklus kružnog procesa.

Radne tvari za kompresijske rashladne uređaje mogu biti anorganske (amonijak, sumporov dioksid, ugljikov dioksid ili voda) ili organske poznate pod trgovačkim nazivima freoni, frigeni ili haloni. U pravilu se kao radne tvari koriste lako ishlapljive tekućine. U rashladnim uređajima radne tvari se označavaju velikim slovom R (eng.: refrigerant) iza kojeg slijede dvije ili tri brojke (npr. metan ima oznaku R50).

Prenošenje topline kod ljevokretnog kružnog procesa ne odvija se samo od sebe već je za rad kompresora potrebno utrošiti određenu energiju. Učinkovitost kompresijskog rashladnog procesa iskazuje se **faktorom hlađenja**, ε_{hl} (eng.: Energy Efficiency Ratio – EER), koji je definiran kao omjer učina isparivača, Φ_{isp} (toplina odvedena iz tvari u procesu koju želimo ohladiti) u W, i snage dovedene kompresoru, P_{komp} (utrošenog mehaničkog rada), u W:

$$\varepsilon_{hl}(EER) = \frac{\Phi_{isp}}{P_{komp}} \quad (7.55)$$

Faktor hlađenja rashladnog uređaja postiže vrijednosti do 3, 5 i više. Faktor EER predstavlja energetska učinkovitost toplinske pumpe koja radi u režimu hlađenja. I ovdje se umjesto faktora EER sve više koristi sezonski faktor hlađenja SEER (eng.: Seasonal Energy Efficiency Ratio) koji je pokazatelj energetske učinkovitosti rashladnog uređaja u realnim uvjetima korištenja.

7.5.3 Apsorpcijski rashladni uređaji

Kompresijski rashladni uređaji koriste mehaničku energiju, a **apsorpcijski rashladni uređaji** za ostvarivanje rashladnog učinka koriste toplinsku energiju („toplinski kompresor“). Apsorpcijski rashladni uređaji kao radnu tvar koriste smjesu dviju tvari, najčešće amonijak i voda ili voda i litijev bromid. Jedna tvar je rashladna radna tvar koja kondenzira u kondenzatoru i isparava u isparivaču (najčešće amonijak). Druga tvar mora imati sposobnost da prvu tvar apsorbira (otopi) da bi kao radna smjesa kružila u krugu kompresora. Energija se u krug dovodi zagrijavanjem radne smijese (amonijaka i vode).

Apsorpcijski uređaji za hlađenje sastoje se od kruga radne tvari s kondenzatorom, prigušnim ventilom i isparivačem i kruga toplinskog kompresora s generatorom pare, prigušnim ventilom, apsorberom i pumpom.

Prilikom apsorpcije razvija se toplina koju treba odvoditi iz apsorbera.

7.5.4 Rashladnici vode (rashladni agregati)

Rashladnici vode (eng.: chillers) služe za hlađenje vode (prijenosnik rashladne energije) koja se koristi za posredne sustave hlađenja. Ohlađena voda se pomoću pumpi razvodi cijevima do izmjenjivača topline u klima komorama, ventilokonvektorima ili do stropnih zračećih panela s cijevnim registrom koji su postavljeni u prostorijama zgrade i na njima se hladi zrak u prostoriji.

Rashladnici vode mogu biti kompresijski ili apsorpcijski. Prema načinu hlađenja kondenzatora, dijele se na:

- vodom hlađene kondenzatore (toplina se odvodi vodom),
- zrakom hlađene kondenzatore (toplina se odvodi okolnim zrakom).

Najčešće se koristi optočno hlađenje vodom u rashladnim tornjevima.

Prema izvedbi rashladnici vode mogu biti:

- paketni (svi dijelovi u jednom kućištu),
- s izdvojenim kondenzatorom.

Rashladnici vode sa zrakom hlađenim kondenzatorom montiraju se u vanjskom prostoru, najčešće na krovu zgrade. Kod rashladnika s vodom hlađenim kondenzatorom, uređaj se instalira u strojarnici zgrade, a rashladni toranj u vanjskom prostoru.

Rashladnici vode najčešće se koriste u klimatizacijskim sustavima kao izvori rashladne energije za hlađenje zraka cirkulacijom hladne vode kroz hladnjak u klima komorama.

7.5.5 Spremnici rashladne energije

Spremnici rashladne energije ili **banke leda** sastoje se od toplinski izoliranog spremnika za vodu s ugrađenim izmjenjivačem topline. Kada kroz izmjenjivač topline struji rashladni medij, hladi se voda u spremniku. Ako je rashladni medij temperature niže od 0 °C, voda u spremniku se smrzava. Ovakav proces pohrane rashladne energije vrši se u pravilu tijekom noći kada je jeftinija električna energija potrebna za rad rashladnog uređaja. Tijekom dana kada je rashladni uređaj isključen ili u vrijeme vršnih opterećenja, ovako pohranjena rashladna energija hladi rashladni medij iz uređaja za hlađenje. Na ovaj način smanjuju se zahtjevi na potrebnu snagu rashladnog uređaja a time se smanjuje i potrošnja električne energije.

7.5.6 Potrebna konačna energija za rad sustava hlađenja

Potrebna korisna energija za hlađenje je količina energije koja se mora odvesti iz prostorije kako bi se u njoj, tijekom godine, održali uvjeti ugodnosti u okviru definiranog raspona uz tipične meteorološke uvjete.

Potrebna korisna energija za hlađenje prostora proračunata prema točki 6.9 je ulazni podatak za proračun potrebne konačne energije za rad sustava hlađenja.

Potrebna konačna energija za rad sustava hlađenja je izračunata količina ulazne energije u sustav hlađenja tijekom godine kojom se osiguravaju uvjeti ugodnosti u okviru definiranog raspona za tipične meteorološke uvjete.

Potrebna konačna energija koju treba dovesti sustavu hlađenja za njegov rad određuje se bilancom energije na razinu sustava. Sustav hlađenja mora osigurati energiju za podmirenje potrebne korisne energije za hlađenje prostora, zatim za nepovratne toplinske gubitke sustava hlađenja te za vraćene toplinske gubitke unutar zgrade.

Konačna energija dovedena sustavu hlađenja iskazuje se po vrsti energenta ($E_{C,gas/oil/...,del}$). Posebno se iskazuje isporučena električna energija ($E_{C,el,del}$).

Najčešće se kao nositelje energije za razvod rashladne energije po zgradi koristi voda ili zrak. Hladna voda hladi zrak prostora u uređajima za izmjenu topline koji su smješteni u hladenoj prostoriji.

Sustavi hlađenja najčešće su dio sustava klimatizacije i u pravilu imaju paralelnu strukturu sa sustavom grijanja. Funkcije grijanja i hlađenja mogu se odvijati izmjenično: u podsustavu predaje (ventilokonvektori), podsustavu razvoda (kanali, cijevi) ili u podsustavu proizvodnje energije (split sustavi za grijanje i hlađenje).

Principi proračuna potrebne konačne energije za sustav hlađenja prostora dani su u okviru istog proračuna za sustav klimatizacije.

7.6 SUSTAVI KLIMATIZACIJE PROSTORA

7.6.1 Uvod

Klimatizacija je proces termodinamičke pripreme i dovođenja zraka u klimatizirani prostor zgrade radi postizanja i održavanja higijenskih uvjeta i odgovarajućeg stupnja ugodnosti za boravak ljudi, odnosno zadovoljenja tehnoloških zahtjeva proizvodnog procesa u prostoru zgrade. Termodinamička priprema zraka znači dovođenje ili odvođenje topline i/ili vlage zraku te ostvarivanje odgovarajuće razine čistoće zraka, sve u skladu s postavljenim zahtjevima. Klimatizacijom se postiže i održava temperatura zraka (grijanje i hlađenje), vlažnost zraka (ovlaživanje i odvlaživanje), kemijska i mehanička čistaća zraka (prisilna izmjena zraka i filtriranje), te osiguravaju odgovarajuća brzina i raspored strujanja zraka, tlak zraka i razina buke (koja se širi sustavom ili je posljedica rada sustava klimatizacije) u prostoru zgrade. Upravljanje procesom klimatizacije vrši se automatski, ovisno o promjenjivim parametrima vanjskog okoliša i toplinskim opterećenjima unutar zgrade. U svakodnevnom govoru izraz klimatizacija se koristi često samo za hlađenje zraka u prostoriji.

Sustav klimatizacije je tehnički sustav zgrade kojim se djeluje na temperaturu, vlažnost i kvalitetu zraka radi ostvarenja željenih parametara zraka i njihovo održavanje u prostoru zgrade [129]. Klimatizacijski sustavi obavezno uključuju i ventilaciju prostora, jer sustavi bez dovoda svježeg zraka nisu klimatizacijski sustavi.

Sustav djelomične klimatizacije je tehnički sustav zgrade kod kojeg jedna ili više funkcija koje mora ispunjavati sustav klimatizacije nije ispunjena i kontrolirana.

Prema namjeni (području primjene) sustavi klimatizacije se dijele na:

- komforni sustav klimatizacije (osnovni zadatak sustava je ostvarivanje uvjeta toplinske ugodnosti za osobe koje koriste prostor),

- industrijski sustav klimatizacije (osnovni zadatak sustava je održavanje mikroklimе prema potrebama proizvodnog procesa ili proizvoda).

Prema prijenosniku energije sustavi klimatizacije se dijele na:

- sustave klimatizacije samo sa zrakom kao prijenosnikom energije,
- sustave klimatizacije s vodom i zrakom kao prijenosnicima energije.

Prema smještaju jedinice za pripremu zraka sustavi klimatizacije se dijele na:

- centralne sustave klimatizacije (komponente za pripremu zraka nalaze se na jednom mjestu tj. unutar centralne klimatizacijske jedinice),
- lokalne sustave klimatizacije.

Mali klima uređaji se dijele na:

- kompaktne uređaje, kod kojih se svi dijelovi uređaja nalaze u zajedničkom kućištu,
- split sustave, kod kojih postoje najmanje dvije odvojene jedinice (dva kućišta).

Sustavi grijanja, ventilacije i klimatizacije danas se najčešće promatraju kao jedan zajednički sustav. Zbog kratkoće naziva, sustav koji kontrolira temperaturu, mehaničku ventilaciju i vlažnost u prostoru zgrade, naziva se GVIK sustav (grijanje, ventilacija i klimatizacija, eng.: HVAC – Heating, Ventilation and Air-Conditioning).

Razredba sustava GVIK u različite kategorije s obzirom na mogućnost kontrole temperature i sadržaja vlage zraka u prostoriji dana je u tablici 7.11. Pojedine funkcije se smatraju ispunjene samo ako sustav može kontrolirati tu funkciju tako da se mogu zadovoljiti zadani granični uvjeti u prostoriji. Tako se na primjer nekontrolirano odvlaživanje u jedinici za hlađenje ne računa kao funkcija odvlaživanja kontrolirana sustavom.

Tablica 7.11: Osnovne vrste sustava GVIK prema funkcijama sustava (prema HRN EN 13779 [87])

Kategorija	Funkcije kontrolirane sustavom					Naziv sustava	Boja dobavnog zraka (u nacrtima)
	Ventilacija	Grijanje	Hlađenje	Ovlaživanje	Odvlaživanje		
THM-C 0	X	-	-	-	-	Čisti ventilacijski sustav	Zelena
THM-C 1	X	X	-	-	-	Ventilacijski sustav sa sustavom grijanja	Crvena
THM-C 2	X	X	-	X	-	Sustav djelomične klimatizacije s ovlaživanjem zraka u prostoriji	Plava
THM-C 3	X	X	X	-	(X)	Sustav djelomične klimatizacije s hlađenjem zraka u prostoriji	Plava
THM-C 4	X	X	X	X	(X)	Sustav djelomične klimatizacije s hlađenjem i ovlaživanjem zraka u prostoriji	Plava
THM-C 5	X	X	X	X	X	Sustav potpune klimatizacije zraka u prostoriji	Ljubičasta

- funkcija nije pod utjecajem sustava
- X funkcija kontrolirana sustavom i zajamčena u prostoriji
- (X) funkcija pod utjecajem sustava, ali nije zajamčena u prostoriji

U procesu grijanja ili hlađenja bez ovlaživanja /odvlaživanja dolazi do izmjene osjetilne topline tj. mijenja se samo temperatura zraka, a sadržaj vlage u zraku ostaje nepromijenjen.

Ovlaživanje zraka je proces kojim se povećava količina vlage u zraku prostorije. Primjenjuje se u zimskom razdoblju kada je nizak sadržaj vlage u vanjskom zraku.

Odvlaživanje zraka je proces smanjivanja sadržaja vlage u zraku. To se postiže hlađenjem zraka na hladnjaku klimatizacijske jedinice čija je površinska temperatura niža od temperature rošenja zraka. Hlađenje s odvlaživanjem u pravilu se provodi u ljetnom razdoblju kad je velik sadržaj vlage u vanjskom zraku. Kod procesa hlađenja s odvlaživanjem osim izmjene osjetilne topline (promjena temperature) dolazi i do izmjene latentne topline (promjena sadržaja vlage).

7.6.2 Centralni sustav klimatizacije

7.6.2.1 Sustavi samo sa zrakom (zračni sustavi)

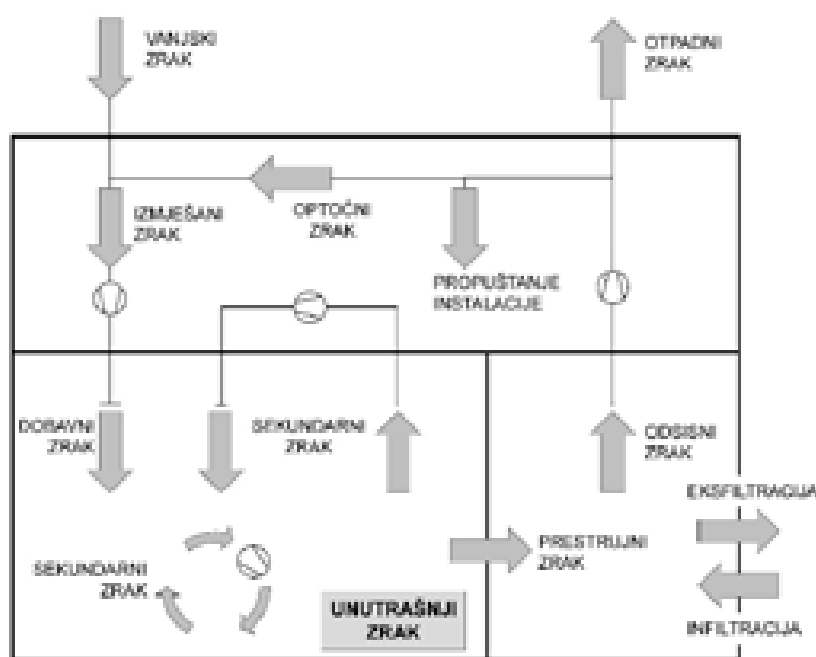
Vrste zraka u zgradi i u sustavu klimatizacije ili sustavu ventilacije specificirane su u tablici 7.12 i prikazane na slici 7.25. Kratice i boje navedene u tablici 7.12 moraju se koristiti za označavanje vrste zraka u nacrtima sustava ventilacije ili klimatizacije. Boja dobavnog zraka bira se na osnovu funkcija koje kontrolira sustav u skladu s tablicom 7.11.

Tablica 7.12: Specifikacija vrsta zraka prema [87]

Redni broj	Vrsta zraka	Kratika	Boja (u nacrtima)	Definicija
1	Vanjski zrak Outdoor Aussenluft Air neuf	ODA AUL ANF	Zelena	Zrak koji ulazi u sustav ili otvor izvana, prije bilo kakve obrade
2	Dobavni zrak Supply air Zuluft Air fourni	SUP ZUL FOU	Prema tablici 7.11	Struja zraka koji ulazi u obrađivanu prostoriju ili zrak koji ulazi u sustav nakon obrade
3	Unutrašnji zrak Indoor air Raumluft Air intérieur	IDA RAL INT	Siva	Zrak u obrađenoj prostoriji ili zoni
4	Prestrujni zrak Transferred air Überströmluft Air transféré	TRA ÜSL TRA	Siva	Unutrašnji zrak koji prolazi iz jedne obrađivane prostorije u drugu
5	Odsisni zrak Extract air Abluft Air repris	ETA ABL REP	Žuta	Struja zraka koji napušta obrađivani prostor
6	Optočni zrak Recirculation air Umluft Air recyclé	RCA UML REC	Narančasta	Odsisni zrak koji se vraća u sustav obrade zraka

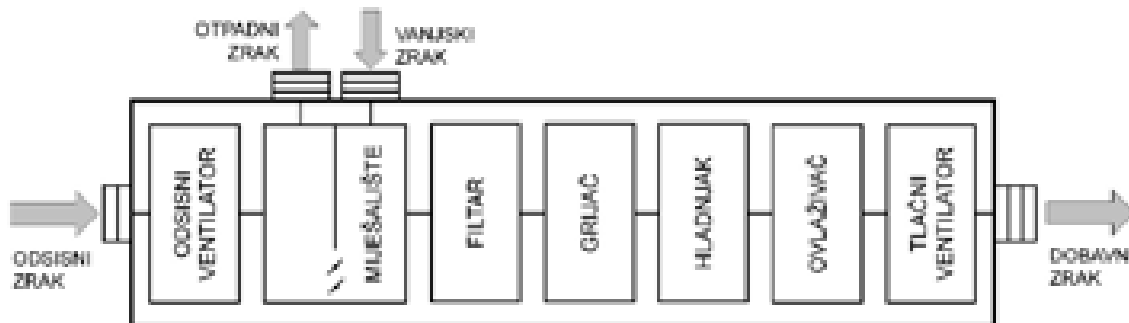
7	Otpadni zrak Exhaust air Fortluft Air rejeté	EHA FOL RJT	Smeđa	Struja zraka koji se ispušta u okolicu
8	Sekundarni zrak Secondary air Sekundärluft Air brassé	SEC SEK BRA	Narančasta	Struja zraka uzeta iz prostorije i vraćena u istu prostoriju nakon obrade (npr. ventilokonvektori)
9	Propuštanje instalacije Leakage Leckluft Fuites	LEA LEC FUI	Siva	Struja zraka nastala propuštanjem sustava
10	Infiltracija Infiltration Infiltration Infiltration	INF INF INF	Zelena	Utjecanje zraka u zgradu kroz slučajna mjesta propuštanja u vanjskoj ovojnici zgrade
11	Eksfiltracija Exfiltration Exfiltration Exfiltration	EXF EXF EXF	Siva	Istjecanje zraka iz zgrade kroz slučajna mjesta propuštanja u vanjskoj ovojnici zgrade
12	Izmiješani zrak Mixed air Mischluft Air mélangé	MIA MIL MEL	Struje različitih boja	Zrak koji sadrži dvije ili više zračnih struja

U stupcu 2 tablice 7.12 pred hrvatskog naziva za vrstu zraka, dani su i nazivi na engleskom, njemačkom i francuskom jeziku.



Slika 7.25: Shematski prikaz vrsta zraka u zgradi prema [87]

Kod centralnog sustava klimatizacije priprema zraka i smještaj izvora toplinske i rashladne energije je na jednom mjestu za cijelu zgradu ili dio zgrade. Postoje sustavi koji pripremaju samo vanjski zrak i sustavi u kojima se miješaju u određenom omjeru vanjski zrak i zrak iz prostora (optočni ili recirkulacijski zrak). Na slici 7.26 dan je shematski prikaz presjeka centralne klimatizacijske jedinice s osnovnim komponentama.



Slika 7.26: Shematski prikaz presjeka centralne klimatizacijske jedinice s osnovnim komponentama

Kod sustava s miješalištem, količina vanjskog zraka se regulira većim ili manjih stupnjem otvaranja zaklopke pomoću elektromotora.

Sustav klimatizacije samo sa zrakom sastoji se od:

- ulaznog otvora za uzimanje vanjskog zraka i izlaznog otvora za izbacivanje otpadnog zraka s regulacijskim zaklopkama, zaštitom od oborina i mrežicom za zaštitu od kukaca (vanjska usisna i ispušna rešetka),
- jedinice za središnju pripremu zraka (klimakomora), koja može sadržavati miješalište za miješanje svježeg i optočnog zraka s regulacijskom zaklopkom, filtre za zadržavanje mehaničkih onečišćenja, sustav za povrat topline iz onečišćenog zraka, zatim predgrijač, dogrijač, grijač, hladnjak te odvlaživač i ovlaživač kako bi se postigla željena temperatura i vlažnost dobavnog zraka, tlačni ventilator za dovod pripremljenog zraka i odsisni ventilator za odvod onečišćenog zraka iz prostora zgrade,
- kanalnog razvoda,
- istrujnih otvora za dobavni zrak i odsisnih otvora za onečišćeni zrak iz prostorije (unutarnji tlačni i odsisni distributeri).

Navedenim komponentama sustava klimatizacije treba još dodati izvor toplinske energije (npr. toplovodni kotao) i izvor rashladne energije (npr. rashladnik vode – eng. chiller) s pripadajućim instalacijama.

Prema načinu razvođenja zraka sustavi klimatizacije koji kao prijenosnika energije koriste samo zrak, mogu se podijeliti na jednokanalne i dvokanalne.

Prema obujamskom protoku zraka centralni sustavi klimatizacije dijele se na:

- sustave s konstantnim obujamskim protokom zraka (eng.: Constant Air Volume – CAV),
- sustave s promjenjivim obujamskim protokom zraka (eng.: Variable Air Volume – VAV).

Kod jednokanalnog sustava s konstantnim protokom zrak se dovodi do prostorije s promjenjivom temperaturom tijekom vremena, ali konstantnim protokom. Ovaj sustav se koristi u zgradama gdje ne postoje veće razlike u zahtjevima za grijanjem ili hlađenjem između pojedinih prostorija.

Kod jednokanalnog sustava s promjenjivim protokom temperatura zraka je konstantna, a protok zraka je promjenjiv. Ovi sustavi se koriste u prostorijama s promjenjivim toplinskim opterećenjem.

Dvokanalni sustavi se koriste u zgradama u kojima prostorije imaju različita toplinska opterećenja. Kod dvokanalnog sustava kroz dva kanala struje topli i hladni zrak i tek prije ulaza u prostoriju miješaju se u odgovarajućem omjeru u miješajućoj kutiji, ovisno o toplinskom opterećenju prostorije. Kod dvokanalnog sustava s konstantnim protokom zraka, ukupni protok zraka nakon miješanja je konstantan, za razliku od VAV sustava kod kojeg je protok promjenjiv.

Prema brzini strujanja zraka u kanalima, sustavi klimatizacije mogu biti izvedeni kao:

- visokobrzinski ili visoko tlačni (brzina strujanja u kanalima 10 do 30 m/s),
- niskobrzinski ili niskotlačni (brzina strujanja u kanalima 2 do 10 m/s).

7.6.2.2 Sustavi s vodom i zrakom (zračno – vodni sustavi)

Sustavi s vodom i zrakom kao prijenosnicima energije najčešće se koriste u slučajevima kada istodobno postoje velika toplinska opterećenja i beznačajni izvori onečišćenja (npr. uredske zgrade). Kod ovog sustava se najčešće u centralnoj klimatizacijskoj jedinici priprema vanjski zrak samo za potrebe ventilacije prostora i kanalima razvodi do pojedinih prostorija. Za pokrivanje potreba grijanja i hlađenja prostora koristi se poseban sustav s vodom kao prijenosnikom toplinske odnosno rashladne energije, dvocijevnim ili četverocijevnim razvodom s cirkulacijskim crpkama i regulacijskom armaturom te odgovarajućim izmjenjivačima topline u prostorijama (npr. ventilokonvektori, indukcijski uređaji, rashladne plohe,...).

7.6.3 Lokalni sustavi klimatizacije

Lokalni sustavi klimatizacije nemaju centralnu jedinicu za pripremu zraka niti kanalni razvod zraka po cijeloj zgradi. Lokalni sustavi su manji uređaji koji omogućuju promjenu nekih parametara zraka (grijanje, hlađenje, odvlaživanje i filtriranje, bez ovlaživanja) samo u jednoj prostoriji ili u manjoj skupini prostorija. Ventilacija prostora ostvaruje se u pravilu prirodnim putom, odnosno u slučaju potrebe dodatnim sustavom mehaničke ventilacije.

Lokalni sustavi klimatizacije koriste se u stambenim i manjim uredskim prostorijama.

Prema izvedbi lokalni sustavi klimatizacije dijele se na:

- kompaktne sustave (paketna izvedba),
- split sustave (razdvojena izvedba, eng.: split – podijeliti, razdvojiti).

7.6.3.1 Kompaktni sustavi

Kompaktni klima uređaji imaju zajedničko kućište sa svim potrebnim komponentama: kompresorom, isparivačem, kondenzatorom, ventilatorom, filtrom, automatskom regulacijom.... Prema načinu i mjestu ugradnje dijele se na:

- prozorske klima uređaje (eng.: window type air-conditioner),
- krovne klima uređaje (eng.: rooftop type air-conditioner).

Prozorski klima uređaji ugrađuju se u prozore. Najčešće imaju mogućnost grijanja s toplinskom crpkom ili s ugrađenim elektrogrijačima te mogućnost miješanja vanjskog zraka (do 20%) i zraka iz prostorije. S pojavom split sustava sve se manje ugrađuju.

Krovni klima uređaji postavljaju se na krov zgrade, neposredno iznad prostora koji se klimatizira. Sve komponente sustava nalaze se unutar zajedničkog kućišta. Pripremljeni zrak se dovodi do prostorije ili grupe prostorija tlačnim kanalom i kroz istrujne otvore ulazi u prostor, a iz prostorije se kroz odsisne otvore onečišćeni zrak iz prostorije odsisnim kanalom vraća u uređaj. Pri tome uređaj može uzimati do 20% vanjskog svježeg zraka.

7.6.3.2 Split (razdvojeni) sustavi

Split sustavi su sustavi kod kojih su sastavni dijelovi smješteni u najmanje dvije razdvojene jedinice: vanjsku i unutarnju jedinicu. Obje jedinice zajedno čine jedinstven funkcionalni sustav. Najčešće se u vanjskoj jedinici nalaze kompresor i kondenzator, a u unutarnjoj jedinici isparivač i ventilator. Unutarnja jedinica ujedno služi i kao isturjni i odsisni otvor za zrak. Radi se o manjim klima uređajima rashladnog učina od 2 do 5 kW.

Prema broju unutarnjih jedinica povezanih s jednom vanjskom jedinicom, split sustavi se dijele na:

- pojedinačne ili monosplit sustave (eng.: monosplit), koji se sastoje od jedne vanjske i jedne unutarnje jedinice,
- višedijelne ili multisplit sustave (eng.: multisplit), koji se sastoje od jedne vanjske i više unutarnjih jedinica (do 30 jedinica).

Monosplit sustavi u pravilu rade s konstantnim obujmom radne tvari u optoku. Multisplit sustavi mogu raditi s promjenjivim obujmom radne tvari (eng.: Variable Refrigerant Volume – VRV). VRV sustavi omogućuju održavanje različitih temperatura u pojedinim prostorijama te istodobno grijanje jedne grupe prostorija a hlađenje druge grupe prostorija.

7.6.4 Komponente sustava klimatizacije

7.6.4.1 Klima komora

Klima komora je osnovni dio centralnog sustava klimatizacije sa zrakom kao prijenosnikom energije [130]. Ona služi za pripremu zraka (filtracija, miješanje, hlađenje, grijanje, ovlaživanje, odvlaživanje) kako bi se postigla željena kvaliteta i termodinamičko stanje zraka. Izbor osnovnih komponenata – funkcionalnih jedinica, koje se slažu u složeni sklop klima komore, ovisi o postavljenim zahtjevima na parametre zraka u klimatiziranom prostoru.

Ovisno o namjeni proizvodi se više vrsta klima-komora: ležeće kompaktne klima-komore, klima ormari, klima-komora u dvoetažnoj izvedbi, krovna klima-centrala.

Glavni dijelovi klima-komore shematski su prikazani na slici 7.26.

Zadatak **filtra** je poboljšanje kvalitete zraka i zaštita opreme od onečišćenja. Grubi filtri se koriste za uklanjanje čestica veličine 3 do 80 μm (prašina, pelud,...). Fini filtri se koriste za uklanjanje čestica veličine 0,3 do 3 μm (bakterije, virusi, dim,...). Adsorpcijski filtri s aktivnim ugljenom koriste se za uklanjanje neugodnih mirisa.

Grijač (predgrijač, dogrijač) se koristi za zagrijavanje zraka. Najčešće se izvodi kao orebreni izmjenjivač topline voda-zrak (ogrijevni medij je voda) ili para-zrak (ogrijevni medij je suhozasićena para). Ovisno o izvedbi sustava grijanja, grijač se može nalaziti i u samoj obrađivanoj prostoriji.

Hladnjak se koristi za hlađenje i odvlaživanje zraka u zgradi. Kod njega dolazi do izmjene i osjetilne i latentne topline. Najčešće se izvode kao orebreni izmjenjivači hladna voda-zrak. Ovisno o izvedbi sustava hlađenja, hladnjak se može nalaziti i u samoj obrađivanoj prostoriji.

Sustav povrata topline koristi za zagrijavanje dobavnog zraka toplinsku energiju u otpadnom zraku, koja bi se inače odbacila u okoliš. Time je omogućen djelomični povrat toplinske energije iz otpadnog zraka, čime se smanjuje potrošnja energije za grijanje. Sustav povrata topline radi na principu izmjene topline između struja dobavnog i otpadnog zraka, koje su međusobno odvojene tankim slojevima od toplinski vodljivog materijala. U sezoni grijanja vanjski zrak se na taj način predgrijava, a u sezoni hlađenja ohlađuje.

U slučaju većeg sadržaja vlage u odsisnom zraku i niske temperature vanjskog zraka može doći do kondenzacije vlage iz odsisnog zraka na površini izmjenjivača, a potom i do njenog smrzavanja. Ovo stvaranje leda može se spriječiti predgrijanjem vanjskog zraka.

Neke klima komore opremljene su obilaznim vodom (eng.: by-pass) kroz koji zračna struja zaobilazi sustav povrata topline. Obilazni vod se koristi ljeti, ponekad i u prijelaznim razdobljima, kada ne treba grijati dovodni zrak ili kada se želi povećati protok zraka (zbog smanjenog gubitka tlaka za pad tlaka izmjenjivača topline). By-pass vod se koristi i kad treba sustav povrata topline zaštititi od smrzavanja.

Učinkovitost sustava povrata osjetilne topline karakterizira se **stupnjem povrata topline**, Φ , koji je za jednake masene protoke dobavnog i odsisnog zraka, dan izrazom:

$$\Phi = \frac{(\Theta_{s2} - \Theta_{s1})}{(\Theta_{e1} - \Theta_{s1})} \quad (7.56)$$

gdje je:

- Θ_{e1} temperatura odsisnog zraka na ulazu u uređaj, u °C,
- Θ_{s1} temperatura vanjskog zraka na ulazu u uređaj, u °C,
- Θ_{s2} temperatura dobavnog zraka na izlazu iz uređaja, u °C.

Kod nižih temperatura vanjskog zraka s malim sadržajem vlage može doći do niske relativne vlažnosti dobavnog zraka, niže od još prihvatljive granične vrijednosti po kriteriju ugodnosti. Ovakva situacija se može izbjeći primjenom izmjenjivača topline s povratom vlage. Kod njega se vlaga iz odsisnog zraka prenosi na dobavni zrak. S povratom vlage dobije se natrag i toplota kondenzacije sadržana u vodenoj pari.

Moguća je, dakle, izvedba sustava za povrat topline kod kojeg se izmjenjuje samo osjetilna toplota (mijenja se samo temperatura zraka) ili se izmjenjuje osjetilna i latentna toplota (mijenja se temperatura i vlažnost zraka). Sustav za povrat osjetilne topline nazivamo **rekuperator**, a sustav za povrat osjetilne i latentne topline nazivamo **regenerator**.

Povrat latentne topline karakterizira se **stupnjem povrata vlage**, Ψ , koji je za jednake masene protoke dobavnog i odsisnog zraka, dan izrazom:

$$\Psi = \frac{(x_{s2} - x_{s1})}{(x_{e1} - x_{s1})} \quad (7.57)$$

gdje je:

- x_{e1} sadržaj vlage u odsisnom zraku na ulazu u uređaj, u kg/kg,
- x_{s1} sadržaj vlage u vanjskom zraku na ulazu u uređaj, u kg/kg,
- x_{s2} sadržaj vlage u dobavnom zraku na izlazu iz uređaja, u kg/kg.

Prema tehničkoj realizaciji rekuperativnog sustava razlikuje se:

- pločasti izmjenjivač topline s križnim strujanjem zraka,
- pločasti izmjenjivač topline s križnim protusmjernim strujanjem zraka,
- kanalni izmjenjivač topline.

Kod regenerativnih sustava prijelaz topline se odvija preko akumulacijske mase. Toplina iz struje odsisnog zraka pohranjuje se u odgovarajućem akumulacijskom bloku i zatim ponovno predaje struji dobavnog zraka. Prema izvedbi, regenerativni sustavi se mogu podijeliti na:

- rotirajući regenerator (može biti sorpcijski ili kondenzacijski),
- nepokretni regenerator (povrat topline u dvije faze: u prvoj fazi akumulacijski blok se zagrijava strujom odsisnog zraka, a u drugoj fazi blok predaje akumuliranu toplotu dobavnom zraku. S dva bloka koja naizmjenično akumuliraju toplotu i odaju toplotu može se postići kontinuirani rad).

Kod rotirajućeg izmjenjivača topline rotor u obliku saća od aluminijske služi kao akumulacijska masa. Vanjski zrak / dobavni zrak i odsisni zrak / otpadni zrak struje svaki protusmjerno kroz polovicu rotora. Tijekom rotacije rotor preuzima toplotu i vlagu struji odsisnog zraka i predaje ih struji dobavnog zraka.

Ovlaživač je komponenta sustava ventilacije / klimatizacije kojom se u zimskom razdoblju ovlažuje zrak koji se dovodi u prostor zgrade. Zimi hladni vanjski zrak ima niski sadržaj vlage i potrebno ga je dodatno ovlažiti kako bi se sadržaj vlage u dobavnom zraku povisio na

potrebnu razinu toplinske ugodnosti. Masa vode koju je potrebno predati dobavnom zraku, m_w , u kg/s, dana je izrazom:

$$m_w = m_a \times (x_2 - x_1) \quad (7.58)$$

gdje je:

m_a maseni protok suhog zraka u kg/s,

x_1 sadržaj vlage početnog stanja, u kg/kg,

x_2 sadržaj vlage krajnjeg stanja, u kg/kg.

Ovlaživanje dobavnog zraka se može vršiti na tri načina: raspršivanjem vode u kapljevitom stanju, direktnim dodavanjem vodene pare zraku i ishlapljivanjem.

Kod prvog načina voda se raspršuje u vrlo sitne kapljice koje se ubrizgavaju u zrak koji treba ovlažiti. Fine kapljice vode u zraku isparavaju, a energiju potrebnu za isparavanje izvlače iz struje okolnog zraka, što uzrokuje njegovo blago hlađenje. Zato nakon ovlaživanja struju zraka treba dogrijati (dogrijačem nakon ovlaživača).

Kod direktnog dodavanja vodene pare, voda u posudi se zagrije do temperature vrenja i proizvedena vodena para se ubrizgava u okolni zrak. Za isparavanje vode potrebno je utrošiti dodatnu energiju (električna energija ili plin). Kod ovlaživanja vodenom parom temperatura struje zraka se praktički ne mijenja.

Kod ovlaživanja dobavnog zraka ishlapljivanjem, suhi zrak struji preko velike vodene površine (sačasta površina preko koje se slijeva voda), pri čemu apsorbira vodenu paru. Energija potrebna za ishlapljivanje izvlači se iz zraka koji prolazi kroz uređaj, tako da se njegova temperatura lagano snižava.

Regulacija ovlaživača vrši se preko osjetnika vlage koji se može nalaziti u prostoru ili u odsisnom kanalu.

Ventilator je komponenta sustava klimatizacije kojom se ostvaruje strujanje dobavnog i odsisnog zraka za ventilaciju. Ventilator pretvara mehaničku energiju vrtnje u kinetičku energiju strujanja plina. Osnovne pogonske karakteristike ventilatora su protok zraka i ukupni pad tlaka u sustavu. Odabrani ventilator mora osigurati traženi protok zraka i svladati ukupni pad tlaka u sustavu klimatizacije.

Snagu ventilatora P , u W, proračunavamo jednadžbom:

$$P = \frac{q \times \Delta p}{3600 \times \eta} \quad (7.59)$$

gdje je:

q obujamski protok zraka, u m³/h,

Δp ukupni pad tlaka u sustavu, u Pa,

η stupanj djelovanja ventilatora.

Specifična snaga ventilatora, P_{SFP} , u W×m⁻³×s, (eng.: specific fan power, SFP), je snaga ventilatora za jedinični obujamski protok zraka. Definirana je izrazom:

$$P_{SFP} = \frac{P}{q_{ve}} \quad (7.60)$$

gdje je:

P_{SFP} specifična snaga ventilatora, u W×s/m³,

P ulazna snaga motora ventilatora, u W,

q_{ve} nazivni protok zraka kroz ventilator, u m³/s.

Razredba specifične snage ventilatora dana je u tablici 7.13.

Tablica 7.13: Razredba specifične snage ventilatora, prema HRN EN 13779 [87]

Kategorija	P_{SFP} u $W \times m^{-3} \times s$
SFP 1	< 500
SFP 2	500 – 750
SFP 3	750 – 1250
SFP 4	1250 – 2000
SFP 5	> 2000

Potrebna kategorija specifične snage ventilatora ovisi o padu tlaka, stupnju djelovanja ventilatora i tipu motora. Ako nema nacionalnog propisa koriste se zadane vrijednosti iz tablice 7.14.

Tablica 7.14: Zadane kategorije SFP za pojedine ventilatore, prema HRN EN 13779 [87]

Primjena	Zadana kategorija SFP za pojedini ventilator
Ventilator za dobavni zrak:	
- složeni HVAC sustav	SFP 3
- jednostavni sustav ventilacije	SFP 2
Ventilator za odsisni zrak:	
- složeni HVAC sustav	SFP 3
- jednostavni sustav ventilacije	SFP 2
- odsisni sustav	SFP 2

Ovisno o smjeru strujanja zraka ventilator može biti radijalni ili centrifugalni i aksijalni. Kod radijalnih ventilatora zrak ulazi usporedno, a izlazi okomito na os vrtnje, a kod aksijalnih ventilatora zrak struji usporedno s osi vrtnje.

7.6.4.2 Kanalni razvod

Kanalni razvod služi za dovođenje pripremljenog zraka od centralne klimatizacijske jedinice do klimatiziranog prostora i odvođenje onečišćenog zraka iz prostora u okolicu. Osnovni dijelovi kanalnog razvoda su:

- kanali pravokutnog, okruglog ili ovalnog poprečnog presjeka,
- kutni elementi (lukovi, koljena), prijelazni elementi (suženja, proširenja) i elementi za grananje razvoda (npr. T-element),
- prigušivači buke i vibracija (jedreno platno kojim se ventilator spaja na kanalni razvod).

Kanalni razvod se izrađuje od nehrđajućeg čelika ili aluminija.

Kanali se, po potrebi, toplinski izoliraju radi:

- smanjenja izmjene topline između zraka u kanalu i okoliša,
- zaštite kanala od požara,
- apsorpcije buke koja se širi kanalom i povećanja zvučne izolacije.

7.6.4.3 Istrujni i odsisni otvori

Istrujni i odsisni otvori ili distributeri služe za dovodenje pripremljenog zraka iz kanala u klimatizirani prostor i odvođenje onečišćenog zraka iz prostora u kanal. Tip, broj komada i lokacija distributera unutar prostorije utječu na ostvarivanje odgovarajuće razdiobe strujanja zraka u zoni boravka.

Za postizanje jednakomjerne razdiobe zraka po prostoru dovod i odvod zraka ne smiju biti preblizu jedan drugom.

Distributeri se dijele na tri glavne skupine: rešetke, difuzore i sapnice.

7.6.4.4 Cirkulacijska pumpa (crpka)

Osnovna zadaća cirkulacijske pumpe je da poveća tlak i / ili brzinu tekućeg medija. Namjena cirkulacijske pumpe je da održava stalni protok medija, a time i konstantnu temperaturu medija.

7.6.4.5 Armatura

Nepovratni ventil ima funkciju da spriječi vraćanje medija u smjeru suprotnom od strujanja medija.

Zaporni ventil služi da se, u slučaju kvara u sustavu, njegovim zatvaranjem mogu odvojiti pojedini dijelovi cjevovoda i obaviti zamjena ili popravak pokvarenog dijela.

Sigurnosni ventil služi kao zaštita sustava od previsokog tlaka. Ako tlak prekorači dopuštenu vrijednost ovi ventili se automatski otvaraju i ispuštaju dio medija, čime se smanjuje tlak u sustavu i izbjegavaju havarije u sustavu.

Troputni elektromotorni ventil primjenjuje se za regulaciju temperature miješanjem u sustavima grijanja i hlađenja. Time se osigurava konstantan protok medija ali s različitim temperaturama.

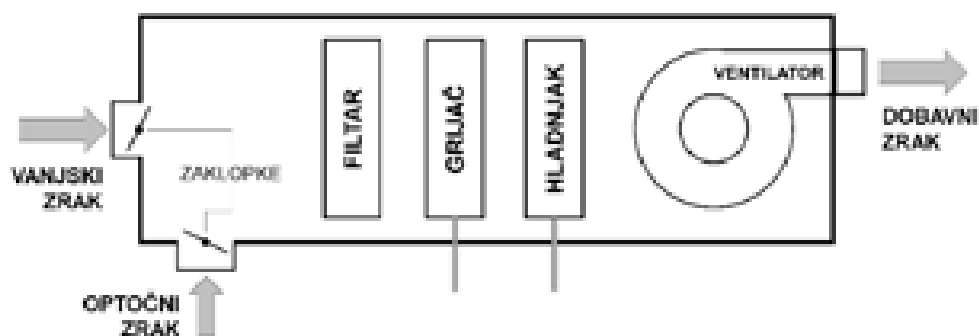
Ispusna slavina služi za brzo pražnjenje sustava u slučaju kvara ili potrebe servisiranja sustava.

7.6.4.6 Ventilokonvektori

Ventilokonvektori (eng.: fan coil) su uređaji za grijanje i hlađenje struje zraka pomoću izmjenjivača topline zrak – voda. U njemu se miješa struja vanjskog zraka iz klima jedinice i struja zraka iz prostorije i ta mješavina se zatim grije ili hladi na grijaču odnosno hladnjaku kroz koje struji topla odnosno hladna voda, te se pomoću ventilatora ugrija ili ohladi zrak ubacuje u prostoriju. Moguće je i rješenje u kojem se zrak iz klima jedinice direktno dovodi u prostoriju, a zatim zrak iz prostorije prolazi kroz ventilokonvektor i dodatno se grije odnosno hladi.

Topla ili hladna voda struje u zatvorenom krugu. U slučaju hlađenja put strujanja vode je: rashladni agregat koji osigurava hladnu vodu, polazni vod za hladnu vodu, izmjenjivač u ventilokonvektoru, povratni vod za hladnu vodu, rashladni agregat. U slučaju grijanja put vode je: kotlovnica koja osigurava toplu vodu (ili dizalica topline, toplinska podstanica itd.), polazni vod tople vode, izmjenjivač topline u ventilokonvektoru, povratni vod tople vode, kotlovnica.

Cjevovodi su najčešće bakreni. Sustav može biti dvocjevni ili četverocjevni. Dvocjevni sustav se koristi za sezonski rad tj. kada je potrebno grijanje kroz cijevi struji topla voda, a kad je potrebno hlađenje hladna voda. U ovom sustavu ventilokonvektori imaju samo jedan izmjenjivač topline kroz koji struji topla ili hladna voda. Kod četverocjevnog sustava jedan par vodova služi za struju tople vode, a drugi par cijevi za struju hladne vode. Postoje i dva izmjenjivača topline: jedan za toplu, a drugi za hladnu vodu. Kod ovog sustava moguće je hlađenje ili grijanje po želji.



Slika 7.27: Shema ventilokonvektora u presjeku – stropna izvedba

7.6.4.7 Indukcijski uređaji

Kod indukcijskog uređaja pripremljeni zrak iz centralne jedinice pod tlakom struji kroz sapnice uređaja (nema dodatnog ventilatora) pri čemu se inducira strujanje zraka iz prostorije kroz izmjenjivač zrak – voda te se na taj način zrak u prostoriji grije odnosno hladi.

7.6.4.8 Rashladne / ogrjevne plohe

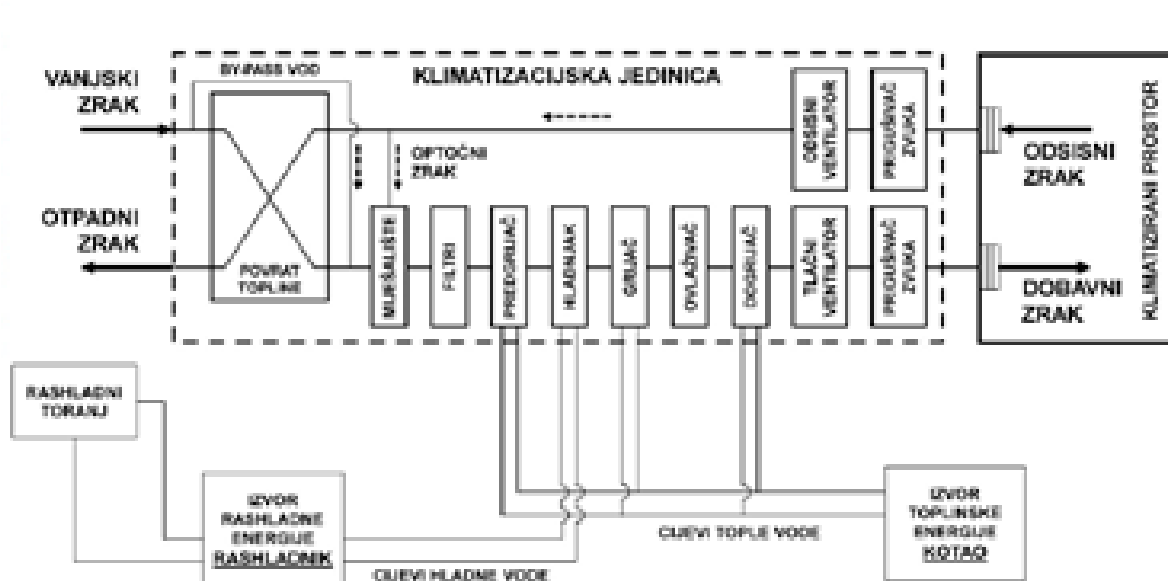
Rashladne / ogrjevne plohe su dio sustava klimatizacije s vodom i zrakom kao prijenosnicima energije koji omogućava grijanje i hlađenje zraka iz prostorije. Izvode se u obliku panela – metalnih ploha s cijevnim registrom, koji se priključuje na razvod hladne odnosno tople vode. Pričvršćuju se ili ugrađuju na zid, strop ili pod. Izmjena topline odvija se zračenjem i konvekcijom. Ventilacijske potrebe prostora pokrivaju se zračnim sustavom.

7.6.4.9 Prigušivač zvuka

Prigušivač zvuka je komponenta sustava ventilacije / klimatizacije namijenjena smanjenju razine buke koju stvara ventilator i koja se širi kanalnim razvodom. Izrađen je od lamela kamene vune kaširane staklenim voalom, koje su ugrađene u okvire od pocinčanog lima.

7.6.4.10 Zbirni prikaz komponenata sustava klimatizacije i njihove funkcije

Na slici 7.32 prikazana je funkcionalna shema složenog sustava klimatizacije, a u tablici 7.13 nabrojene su sve komponente sustava klimatizacije s kratkim opisom njihovih funkcija.



Slika 7.28: Shematski prikaz složenog sustava klimatizacije

Tablica 7.13: Komponente sustava klimatizacije s kratkim opisom njihovih funkcija

Komponenta sustava klimatizacije	Funkcija komponente
STRANA ZRAKA:	
Ulazni otvor za vanjski zrak s regulacijskim zaklopkama, protukišnim žaluzinama i žičanom mrežom za zaštitu od kukaca	Usis vanjskog zraka koji će se nakon obrade koristiti za klimatizaciju prostora
Sustav za povrat topline	Povrat topline iz odsisnog zraka
Miješalište	Miješanje vanjskog i optočnog zraka
Filtri	Odstranjivanje nečistoća iz vanjskog zraka
Predgrijač	Predgrijavanje svježeg vanjskog zraka
Hladnjak	Hlađenje i odvlaživanje zraka na željenu temperaturu i vlažnost dobavnog zraka tijekom ljeta
Grijač	Grijanje zraka na željenu temperaturu dobavnog zraka tijekom zime
Ovlaživač	Ovlaživanje vanjskog zraka na željenu vlažnost dobavnog zraka tijekom zime
Dogrijač	Dogrijavanje zraka na željenu temperaturu dobavnog zraka
Tlačni i odsisni ventilator	Prisilno strujanje zraka u tlačnim odnosno odsisnim kanalima
Prigušivač zvuka	Smanjenje razine buke ventilatora
Istrujni i odsisni elementi	Ubacivanje obrađenog zraka i izvlačenje potrošenog zraka iz klimatiziranog prostora

Kanalni razvod (tlačni, odsisni, optočni)	Razvod zraka u prostoru zgrade
Ventilokonvektori, indukcijski uređaji	Priprema zraka u prostoriji
IZVORI TOPLINSKE ENERGIJE:	
Kotao s opremom	Izvor ogrjevnog medija (tople vode ili pare)
Cijevi ogrjevnog medija s armaturom	Razvod ogrjevnog medija
Ekspanzijski sustav toplog kruga	Održavanje tlaka u krugu tople vode
Ekspanzijski sustav hladnog kruga	Održavanje tlaka u krugu hladne vode
Cirkulacijske pumpe	Prisilno strujanje vode
IZVORI RASHLADNE ENERGIJE:	
Rashladnici vode s opremom	Izvor rashladne energije

7.6.5 Proračun potrebne konačne energije za rad HVAC sustava

7.6.5.1 Pregled sustava HVAC

HVAC sustav je sustav koji u zgradi osigurava kontrolu temperature, mehaničku ventilaciju i kontrolu vlažnosti. Sustav može osigurati svaku ili sve navedene kontrole. Osnovne kategorije tipa GVIK sustava ovisne su o mogućnosti sustava da kontrolira kvalitetu i termodinamička svojstva zraka u prostoriji. U nastavku je dan općeniti prikaz proračuna potrebne konačne energije za zgrade sa sustavom klimatizacije prostora.

Proračun potrebne konačne energije za rad HVAC sustava ovisi o konfiguraciji sustava. Moguć je veliki broj različitih konfiguracija sustava. U tablici 7.14 dan je pregled osnovnih kombinacija sustava GVIK (prema HRN EN 15243 [127]). Neki sustavi obično osiguravaju funkcije grijanja i ventilacije u integriranom sustavu. Ostali (vidi stupac 3 i 4 u tablici 7.14) obično zahtijevaju odvojenu opskrbu instalacijama za te funkcije. U nekim slučajevima (npr. u A5, B4 i C1) odvojeno grijanje se može izvesti električnim grijačima na izlazu zraka u prostoriju (unutar sustava za predaju topline u prostoriji). Ako je sustav ventilacije izveden posebno, on se razmatra kao dodatni GVIK sustav.

Tablica 7.14: Pregled sustava GVIK

Oznaka	Naziv sustava	Ne uključuje uvijek opskrbu grijanja i smije se upotrijebiti s odvojenim grijanjem	Ne uključuje potpunu opskrbu ventilacijskim zrakom i smije se upotrijebiti s odvojenim sustavom ventilacije
A	Sustavi sa zrakom		
A1	Sustav s jednim kanalom		
A2	Sustav s dva kanala		

A3	Sustav s jednim kanalom, dogrijavanje na izlazu zraka		
A4	Konstantni obujamski protok zraka (s odvojenim grijanjem)	x	
A5	Promjenjivi obujamski protok zraka (s odvojenim grijanjem)	x	
B	Sustavi s vodom		
B1	Sustav ventilokonvektora, dvije cijevi	x	x
B2	Sustav ventilokonvektora, tri cijevi		x
B3	Sustav ventilokonvektora, četiri cijevi		x
B4	Sustav s indukcijom, dvije cijevi, bez prebacivanja režima	x	
B5	Sustav s indukcijom, dvije cijevi, s prebacivanjem režima		
B6	Sustav s indukcijom, tri cijevi		
B7	Sustav s indukcijom, četiri cijevi		
B8	Paneli za površinsko hlađenje s dvije cijevi	x	x
B9	Paneli za površinsko hlađenje s četiri cijevi		x
B10	Ugrađeni sustav hlađenja (podno, zidno ili stropno)		x
B11	Stropni sustav s aktivnim klimatizacijskim gredama	x	x
B12	Sustavi s krugom dizalice topline		x
C	Kompaktne jedinice za klimatizaciju		
C1	Sobne jedinice	x	x
C2	Pojedinačni split sustav s izravnom ekspanzijom	x	x
C3	Multi split sustav s izravnom ekspanzijom (uključujući sustave s promjenjivim protokom radne tvari)	x	x

Ako postoji zahtjev za kontrolom vlažnosti najprije se proračuna potrebna energija za ovlaživanje i odvlaživanje (latentno opterećenje) (vidjeti točku 7.4.5 – prema HRN EN 15241 [128] za centralnu klimatizacijsku jedinicu). Za lokalne sustave klimatizacije proračun vlažnosti unutarnjeg zraka i potrebne energije za odvlaživanje dan je u dodatku H norme HRN EN 15243 [127].

Za proračun karakteristika dobavnog zraka kod zračnih sustava koristi se točka 7.4.5 (u skladu s HRN EN 15241 [128]).

Ukoliko nema zahtjeva za hlađenjem, potrebna energija za grijanje proračuna se prema točki 7.2.6 (u skladu s nizom normi HRN EN 15316 od [112] do [125]).

Tehnička oprema s kojom će se zadovoljiti očekivana opterećenja grijanja i hlađenja mora se dimenzionirati u skladu s uobičajenim inženjerskim metodama i podacima proizvođača opreme. S odabranom opremom može se provesti proračun godišnje potrošnje energije kako bi se sustav optimizirao.

7.6.5.2 Odnos metoda proračuna potrebne korisne energije za prostor zgrade i konačne energije za rad sustava

Potrebna korisna energija za grijanje ili hlađenje prostora je količina energije koja se mora dovesti (u slučaju grijanja) odnosno izdvojiti (u slučaju hlađenja) iz klimatizirane prostorije kako bi se u njoj održali uvjeti ugodnosti u okviru određenog raspona temperatura, uz tipične meteorološke uvjete. Određuje se prema poglavlju 6 (u skladu s HRN EN 13790 [100]). Ona predstavlja ulazni podatak za proračun potrebne konačne energije za rad HVAC sustava.

Potrebna konačna energija za rad sustava grijanja je količina energije koja se mora dovesti sustavu kako bi se održali njegovi predviđeni radni uvjeti tijekom godine uz tipične meteorološke uvjete.

Potrebna konačna energija za rad sustava hlađenja je ulazna energija u sustav hlađenja kojom se pokriva potrebna energija za sustav hlađenja.

Proračun potrebne korisne energije za grijanje odnosno hlađenje zgrade i potrebne konačne energije za rad tehničkog sustava zgrade provodi se za razdoblje od jedne godine. Kod toga se godina podijeli u više manjih vremenskih koraka: sate, mjesece, sezonu, i proračuni energije se provedu za ta razdoblja s ulaznim podacima karakterističnim za odabrani vremenski korak proračuna. Glavna razlika postoji između satnih metoda i metoda u kojima se upotrebljavaju dulji vremenski koraci. U tablici 7.15 prikazane su moguće kombinacije proračunskih metoda.

Tablica 7.15: Kombinacija metoda proračuna zgrade i tehničkog sustava

		Proračuni na razini tehničkog sustava	
		Satni	Mjesečni, sezonski, godišnji
Proračuni na razini zgrade (građevinski dio)	Satni	BhSh	BhSm
	Mjesečni, sezonski	BmSh	BmSm

Ovdje znači:

Bh proračun zgrade na osnovi satnih vrijednosti,

Bm proračun zgrade na osnovi mjesečnih ili sezonskih vrijednosti,

Sh proračun tehničkog sustava na osnovi satnih vrijednosti,

Sm proračun tehničkog sustava na osnovi mjesečnih, sezonskih ili godišnjih vrijednosti.

Tip proračuna BhSh koristi se npr. u slučaju VAV sustava kada protok zraka ovisi o potrebnom hlađenju ili kod latentnog opterećenja koje je teško proračunati na mjesečnoj bazi. Ovaj tip proračuna omogućuje da se u obzir uzmu satna međudjelovanja ponašanja zgrade i sustava.

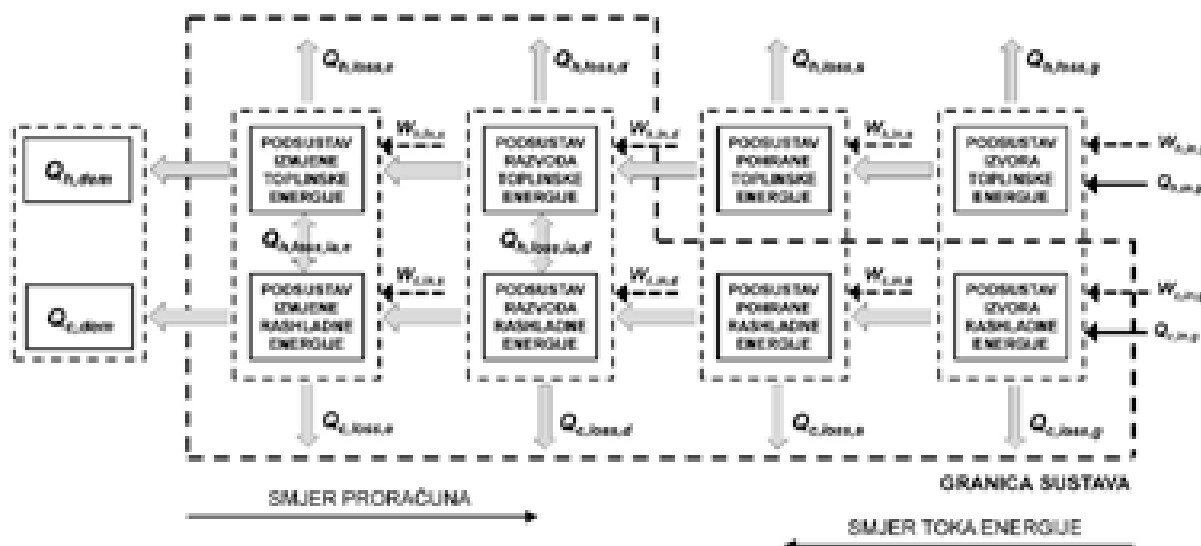
Tip proračuna BmSh je moguć npr. u sustavima kod kojih ponašanje sustava ne ovisi o ponašanju zgrade (sustavi koji reagiraju uglavnom na parametre vanjske klime: temperaturu i vlažnost zraka). U ovom se slučaju ponašanje sustava proračunava prije provedbe proračuna zgrade.

Tipovi proračuna BmSm i BhSm koriste se za proračun srednje mjesečne, sezonske ili godišnje vrijednosti uporabom opće statističke analize na osnovi satnih proračuna za tipične klimatske i druge uvjete.

U praksi se koriste tipovi proračuna BhSh ili BmSh. Satna metoda za proračun sustava kombinira se sa satnim ili mjesečnim ili sezonskim proračunima zgrade.

7.6.5.3 Proračun potrebne konačne energije za rad sustava

Opća struktura sustava i tokovi energije prikazani su na slici 7.29 podijeljeni u podsustave. Sustavi grijanja i hlađenja općenito imaju paralelnu strukturu. Funkcije grijanja i hlađenja smiju se kombinirati u podsustavu za predaju (ventilokonvektori) i dijelovima za razvod (cijevi, kanalima) i u podsustavu za proizvodnju (split sustavi za grijanje i hlađenje). U većini sustava razvod topline i hladnoće provodi se vodom i zrakom. Toplina i „hladnoća“ prelaze iz vode u zrak u izmjenjivačima topline u centralnoj klimatizacijskoj jedinici ili u odgovarajućim uređajima u klimatiziranoj prostoriji.



Slika 7.29: Opća struktura sustava HVAC i tokovi energije s podjelom na podsustave, prema HRN EN 15243 [127]

Na slici su označene granice tehničkog sustava za potrebe proračuna. Na strani potreba granica sustava je između podsustava za predaju i klimatiziranog prostora. Za hlađenje je granica sustava s desne strane podsustava za proizvodnju hlađenja. Za grijanje granica sustava smije biti na različitim mjestima, ovisno o vrsti sustava. Proizvodnja topline i pohrana uvijek su izvan granice sustava. U proračun je uključena i izmjena topline između podsustava predaje i između podsustava razvoda za grijanje i hlađenje.

Svaki podsustav smije imati toplinske gubitke i potrošnju pomoćne energije. Podsustavi za proizvodnju topline i hladnoće troše gorivo ili električnu struju.

Za promatrano razdoblje, potrebna konačna isporučena energija u pogonu grijanja, $Q_{h,in,g}$, dana je izrazom:

$$Q_{h,in,g} = Q_{h,dem} + Q_{h,loss,e} + Q_{h,loss,ia,e} + Q_{h,loss,d} + Q_{h,loss,ia,d} + Q_{h,loss,s} + Q_{h,loss,g} \quad (7.61)$$

a potrebna energija u pogonu hlađenja, $Q_{c,in,g}$, izrazom:

$$Q_{c,in,g} = Q_{c,dem} + Q_{c,loss,e} + Q_{c,loss,ia,e} + Q_{c,loss,d} + Q_{c,loss,ia,d} + Q_{c,loss,s} + Q_{c,loss,g} \quad (7.62)$$

U nekim instalacijama, smiju se za proizvodnju topline ili hladnoće upotrijebiti različiti nositelji energije, npr.:

- instalacija grijanja upotrebljava električnu struju za kompresor toplinske pumpe i plin za dodatne kotlove,
- instalacija hlađenja upotrebljava plin za apsorpcijski hladnjak, a električnu energiju za kompresor hladnjaka.

U tim se slučajevima isporučena energija mora proračunati odvojeno za različite nositelje energije, npr. $Q_{h,in,g}(El)$, $Q_{h,in,g}(Gas)$, $Q_{h,in,g}(Oil)$ za isporučenu električnu energiju, plin ili lož ulje.

Ukupna potrošnja pomoćne energije za grijanje, $W_{h,in,tot}$, i za hlađenje, $W_{c,in,tot}$, dana je izrazima:

$$W_{h,in,tot} = W_{h,in,e} + W_{h,in,d} + W_{h,in,s} + W_{h,in,g} \quad (7.63)$$

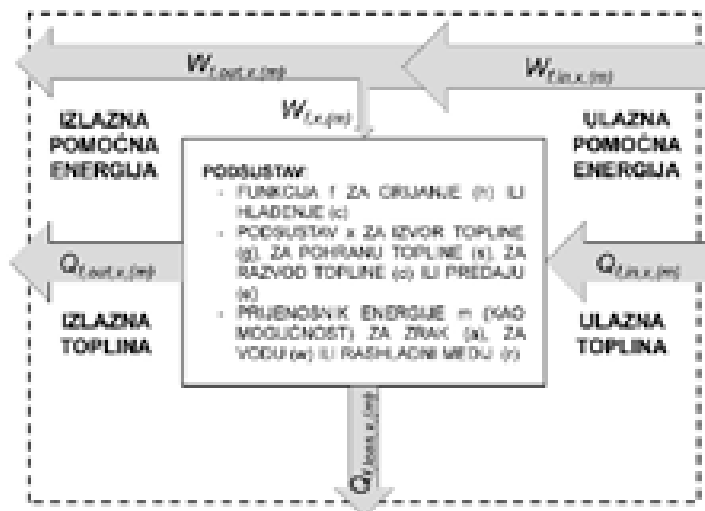
i

$$W_{c,in,tot} = W_{c,in,e} + W_{c,in,d} + W_{c,in,s} + W_{c,in,g} \quad (7.64)$$

Simboli u gornjim izrazima imaju slijedeća značenja:

$Q_{h,in,g}$	isporučena energija (potrošnja goriva) za grijanje, u J,
$Q_{h,dem}$	potrebna korisna toplota za grijanje zgrade, u J, (jednaka $Q_{H,nd}$),
$Q_{h,loss,e}$	toplinski gubitak podsustava za predaju topline u prostor, u J,
$Q_{h,loss,ia,e}$	toplinski gubitak podsustava za predaju, prouzročen međudjelovanjem sa sustavom hlađenja, u J,
$Q_{h,loss,d}$	toplinski gubitak podsustava za razvod topline, u J,
$Q_{h,loss,ia,d}$	toplinski gubitak podsustava za razvod, prouzročen međudjelovanjem s podsustavom za razvod hlađenja, u J,
$Q_{h,loss,s}$	toplinski gubitak podsustava za pohranu topline, u J,
$Q_{h,loss,g}$	toplinski gubitak podsustava za proizvodnju topline, u J,
$Q_{c,in,g}$	potrebna energija za sustav hlađenja, u J,
$Q_{c,dem}$	potrebna korisna toplota za hlađenje zgrade, u J, (jednaka $Q_{C,nd}$),
$Q_{c,loss,e}$	gubitak „hladnoće“ podsustava za predaju hladnoće u prostor, u J,
$Q_{c,loss,ia,e}$	gubitak hladnoće podsustava za predaju, prouzročen međudjelovanjem sa sustavom grijanja, u J,
$Q_{c,loss,d}$	gubitak „hladnoće“ podsustava za razvod „hladnoće“, u J,
$Q_{c,loss,ia,d}$	gubitak „hladnoće“ podsustava za razvod, prouzročen međudjelovanjem s razvodom sustava grijanja, u J,
$Q_{c,loss,s}$	gubitak „hladnoće“ podsustava za pohranu, u J,
$Q_{c,loss,g}$	gubitak „hladnoće“ podsustava za proizvodnju, u J,
$W_{h,in,tot}$	ukupna potrošnja pomoćne energije za pogon pomoćnih uređaja sustava grijanja, u J,
$W_{h,in,e}$	potrošnja pomoćne energije podsustava za predaju topline, u J,
$W_{h,in,d}$	potrošnja pomoćne energije podsustava za razvod topline, u J,
$W_{h,in,s}$	potrošnja pomoćne energije podsustava za pohranu topline, u J,
$W_{h,in,g}$	potrošnja pomoćne energije podsustava za proizvodnju topline, u J,
$W_{c,in,tot}$	ukupna potrošnja pomoćne energije za pogon pomoćnih uređaja sustava za hlađenje, u J,
$W_{c,in,e}$	potrošnja pomoćne energije podsustava za predaju „hladnoće“, u J,
$W_{c,in,d}$	potrošnja pomoćne energije podsustava za razvod „hladnoće“, u J,
$W_{c,in,s}$	potrošnja pomoćne energije podsustava za pohranu „hladnoće“, u J,
$W_{c,in,g}$	potrošnja pomoćne energije podsustava za proizvodnju „hladnoće“, u J.

Na slici 7.30 dana je osnovna shema toka energije za podsustav, uključujući simbole toka energije.



Slika 7.30: Shematski prikaz tokova energije za podsustav

Postoji veliki broj proračunskih metoda predviđanja ukupne potrebne energije za rad HVAC sustava. One se razlikuju po opsegu proračuna, složenosti proračuna i količini zahtijevanih ulaznih podataka. Proračun energije sustava HVAC može se provesti pojednostavnjeno ili detaljno. Pojednostavljene metode rade s duljim vremenskim koracima proračuna – tipično mjesec dana. Podrobne (detaljne) metode proračun energije provode uporabom satnog koraka za razdoblje čitave godine.

Neke osnovne metode proračuna potrebne konačne energije za rad sustava, toplinskih gubitaka sustava i potrebne pomoćne energije za rad sustava prikazane su u normi HRN EN 15243 [127].

Potrebna konačna energija (električna) za pogon tlačnog rashladnog uređaja, $E_{C,gen,el}$, u kWh, dobije se iz izraza:

$$E_{C,gen,el} = \frac{Q_{C,in,g}}{SEER} \quad (7.65)$$

gdje je:

$Q_{C,in,g}$ potrebna rashladna energija za sustav hlađenja, u kWh,
 $SEER$ sezonski faktor energetske učinkovitosti rashladnog uređaja, u kW/kW.

Potrebna konačna energije (toplinska) za pogon apsorpcijskog rashladnog uređaja, $Q_{C,gen,therm}$, u kWh, dobije se iz izraza:

$$Q_{C,gen,therm} = \frac{Q_{C,in,g}}{\zeta_{av}} \quad (7.66)$$

gdje je:

ζ_{av} srednji godišnji toplinski faktor hlađenja, broj bez dimenzije. To je odnos između snage hlađenja (korist) i uređaju dovedene topline (utrošena energija).

7.7 SUSTAVI ELEKTRIČNE RASVJETE ZGRADA

7.7.1 Uvod

Oko 80% svih informacija koje čovjek prima dolazi preko organa vida. Zato je kod projektiranja i građenja zgrada potrebno osigurati odgovarajuću razinu osvjetljenja unutarnjeg prostora zgrade koja mora biti prilagođena vrsti aktivnosti koja će se u njoj odvijati. Dobro osvjetljenje prostora stvara ugodan vizualni okoliš koji omogućava korisnicima zgrade sigurno kretanje, efikasno ostvarivanje zadaća koje ovise o kvaliteti osvjetljenja, bez posebnog zamora očiju.

Najprirodniji, najugodniji i energetski najpovoljniji način osvjetljenja unutarnjeg prostora zgrade je korištenje prirodne sunčeve (dnevne) svjetlosti. Zgrade moraju biti koncipirane i smještene u prostor na način da se omogući korištenje prirodne svjetlosti za osvjetljenje unutarnjeg prostora zgrade, osim u slučaju kad to nije prikladno za predviđeni proces rada u zgradi. Prirodna svjetlost nije međutim uvijek jednaka niti po svojoj kvaliteti niti po svojem intenzitetu. Ona ovisi o zemljopisnoj lokaciji zgrade, dobu godine, dobu dana, vremenskim prilikama, veličini, orijentaciji i nagibu otvora u ovojnici zgrade, položaju susjednih zgrada, okolnoj vegetaciji,... Zato prirodno osvjetljenje prostora zgrade nije dovoljno. Ono mora biti upotpunjeno umjetnim osvjetljenjem. Konačni cilj rješavanja zahtjeva osvjetljenja unutarnjeg prostora zgrade je dobiti takvu razinu osvjetljenosti koja će najbolje odgovarati predviđenoj uporabi zgrade i sigurnosti korisnika.

Prvi umjetni izvor svjetlosti, koji se uz prirodnu sunčevu svjetlost koristio stoljećima, bio je plamen svijeće. Prvu električnu žarulju sa žarnom niti razvio je i patentirao Thomas Edison 1879. godine. Od tada kreće intenzivan razvoj različitih umjetnih izvora svjetlosti koja koriste električnu energiju. Danas su razvijeni sustavi automatske regulacije intenziteta osvjetljenosti unutarnjeg prostora zgrade umjetnim i prirodnim izvorima svjetlosti, tako da se kombiniranjem prirodne i umjetne svjetlosti može postići konstantna razina osvjetljenosti radnih ploha u zgradi, ako je potrebno i tijekom 24 sata.

Rasvjeta je rješenje kojim se prirodnim ili umjetnim izvorima svjetlosti osigurava potrebna osvjetljenost prostora. Primjenu umjetne svjetlosti dobivene električnom strujom nazivamo **električna rasvjeta**.

Prema načinu na koji daju svjetlost, umjetni izvori svjetlosti koji koriste električnu energiju, mogu se podijeliti u tri skupine:

- izvori svjetlosti s toplinskim zračenjem (klasična žarulja sa žarnom niti, halogene žarulje,...).
- izvori svjetlosti s izbojem u plinovima (fluorescentne cijevi, živine žarulje, natrijeve žarulje, kompaktne fluorescentne žarulje – štedne žarulje),
- poluvodički izvori svjetlosti (LED rasvjeta).

Svaki od navedenih načina proizvodnje svjetlosti ima svojih prednosti i nedostataka, tako da za svakog od njih postoji najpovoljnije mjesto primjene.

U žaruljama sa žarnom niti i kod halogenih žarulja svjetlost nastaje zračenjem užarenog tijela s dovoljno velikim električnim otporom, koje se zagrije kada kroz njega prolazi električna struja. U svjetlo se pretvara samo 5% do 10% uložene energije, dok ostatak otpada na toplinsku energiju.

Kod izvora svjetlosti s izbojem u plinovima svjetlo nastaje u cijevima s plinovima i parama prilikom lučnog pražnjenja koje je popraćeno emisijom elektromagnetskog zračenja. Kompaktna fluorescentna sijalica snage 20 W stvara jednaki svjetlosni tok kao žarulja sa žarnom niti snage 100 W.

LED (eng.: Light Emitting Diode) diode su maleni elektronički čipovi od posebnih kristala poluvodiča koji izravno pretvaraju električnu energiju u svjetlo. LED dioda snage 12 W zamjenjuje žarulju sa žarnom niti snage 60 W. LED tehnologija omogućila je prelazak iz

„doba žarulja“ u „doba digitalne i kreativne rasvjete“. LED rasvjeta ne predstavlja više samo zadovoljenje potrebe za svjetlom nego ona postaje sastavni dio uređenja interijera.

U EU oko 14 % ukupne potrošnje električne energije otpada na rasvjetu. Najviše električne energije za rasvjetu troši se za unutrašnju rasvjetu nestambenih zgrada. Prema provedenim istraživanjima potrošnja električne energije za rasvjetu zgrada javne namjene iznosi do 35 % ukupne potrošnje primarne energije. Potrošnja energije za rasvjetu zgrada javne namjene sasvim se, dakle, približila potrošnji energije za grijanje i klimatizaciju. Zato kod proračuna energetske učinkovitosti nestambenih zgrada obavezno treba uzeti u obzir i potrošnju energije za rasvjetu. Kako bi se smanjila potrošnja energije za rasvjetu, potrebno je poboljšati kvalitetu instalacija rasvjete i ugraditi automatizirani prilagodljiv sustav upravljanja („pametna zgrada“). Cilj ovih mjera je smanjiti instaliranu snagu i potrošenu snagu za rasvjetu, pri čemu ne smije doći do smanjenja vizualnog komfora.

7.7.2 Osnovne fotometrijske veličine

Svjetlo je veličina fiziološkog značaja, a ne fizikalnog. Bez oka koje vidi pojam „svjetlo“ gubi svaki smisao. Zato se mjerenje svjetlosnih veličina temelji na svjetlosnom utisku koji o nekoj svjetlosnoj pojavi stječe ljudsko oko. Razne postupke mjerenja svjetla, koje omogućuje viđenje predmeta, nazivamo fotometrija.

Svjetlost (eng.: light) je elektromagnetsko zračenje koje je vidljivo ljudskom oko. Obuhvaća područje valnih duljina zračenja od 380 nm do 780 nm.

Svjetlosni tok, Φ , je ukupan iznos svjetlosti koju emitira izvor svjetlosti. Mjernu jedinicu za svjetlosni tok u Međunarodnom sustavu mjernih jedinica nazivamo lumen (znak: lm). Zračenje od 1 W (pri valnoj duljini od 555 nm), za slučaj da se sva snaga zračenja pretvori u vidljivu svjetlost, iznositi će 683 lm. Svjetlosni tok žarulje sa žarnom niti snage 100 W iznosi, međutim, samo 1380 lm, a fluorescentne cijevi koja ima snagu 18 W, iznosi 1350 lm.

Osvjetljenje (osvijetljenost, rasvijetljenost), E , je fotometrijska veličina određena omjerom svjetlosnog toka, Φ , koji pada na određenu površinu i ploštine A osvijetljene površine:

$$E = \frac{\Phi}{A} \quad (7.67)$$

Jedinicu za osvjetljenje u SI sustavu mjernih jedinica nazivamo luks (znak: lx; lx = lm/m²). To je svjetlosni tok od 1 lm koji pada na plohu ploštine 1 m². Na jedinicu luks mogu se primjenjivati dekadski i decimalni višekratnici kao i na ostale jedinice.

Za sunčanog dana, osvjetljenje površina obasjanih Sunčevim zrakama je oko 100 000 lx, a u hladu oko 10 000 lx. Pri mjesečini osvjetljenost iznosi svega oko 0.2 lx. Prilagodljivost ljudskog oka omogućava da vidimo u svim ovim uvjetima.

Potrebna osvjetljenost pojedinih unutarnjih prostora zgrade ovisi o namjeni prostora. Važno je da čovjek pri obavljanju raznih zadaća ima dovoljnu količinu svjetla tj. da se zadovolje zahtjevi u vezi s vizualnom ugodnošću, mogućnosti kvalitetnog obavljanja vizualnih zadaća i sigurnost korisnika zgrade.

Potrebna razina osvjetljenja pojedinih radnih prostora unutar zgrade dana je u normi HRN EN 12464-1 [132], ovisno o namjeni prostora. Tako se primjerice za prostore namijenjene tehničkom crtanju zahtjeva osvjetljenje od 750 lx, za predavaonice i učionice u kojima se čita i piše 500 lx, za sportske dvorane 300 lx, za arhive 200 lx, za stubišta 150 lx, za hodnike 100 lx, itd.

7.7.3 Proračun energije utrošene za rasvjetu prostora zgrade

Kod proračuna se uzima u obzir samo instalacija ugrađene rasvjete tj. bez prenosive rasvjete (npr. stolne lampe,...), bez sigurnosne rasvjete (rasvjete za nuždu) i bez vanjske rasvjete (rasvjeta vanjskog parkirališta, arhitektonska rasvjeta pročelja,...). Ukupna

električna energija, W_t , u kWh, potrebna za rasvjetu promatrane prostorije ili zone, tijekom promatranog vremena t , određena je izrazom:

$$W_t = W_{L,t} + W_{P,t} \quad (7.68)$$

gdje je:

$W_{L,t}$ procijenjena električna energija potrebna za rasvjetu unutarnjeg prostora zgrade, u kWh, koja je određena izrazom:

$$W_{L,t} = \frac{\Sigma[P_n \times F_c \times (t_d \times F_O \times F_D + t_N \times F_O)]}{1000} \quad (7.69)$$

$W_{P,t}$ procijenjena parazitna električna energija potrebna za punjenje baterija rasvjete za nuždu i energija za pripremno stanje kontrolnih uređaja rasvjete u zgradi, u kWh, koja je određena izrazom:

$$W_{P,t} = \frac{\Sigma\{P_{pc} \times [t_y - (t_D + t_N)]\} + (P_{em} \times t_{em})}{1000} \quad (7.70)$$

Simboli u gornjim izrazima imaju sljedeće značenje:

- $P_n = \Sigma P_i$ je ukupna instalirana snaga svih rasvjetnih tijela u prostoriji ili zoni, mjerena u vatima. P_i je snaga rasvjetnog tijela tj. snaga koju potroši rasvjetno tijelo i kontrolna oprema, uključujući i parazitnu snagu kad je rasvjetno tijelo uključeno, izmjerena u vatima,
- P_{pc} je ukupna instalirana parazitna snaga kontrolnih sustava u rasvjetnim tijelima u prostoriji ili zoni, kada rasvjetna tijela ne rade, mjereno u vatima,
- P_{em} je ukupna instalirana snaga punjenja rasvjete za nuždu, mjereno u vatima,
- F_c je faktor konstantnosti osvjetljenja koji se odnosi na utrošak ukupne instalirane snage kad u prostoriji ili zoni radi uređaj za kontrolu konstantne osvjetljenosti,
- F_O je faktor ovisnosti o boravku u prostoriji ili zoni koji povezuje utrošak ukupne instalirane snage rasvjete i vremena korištenja prostorije ili zone,
- F_D je faktor ovisnosti o dnevnom svjetlu koji povezuje utrošak ukupne instalirane snage rasvjete i dostupnosti dnevnog svjetla u prostoriji ili zoni,
- t_D je vrijeme rada pri dnevnom svjetlu, u satima,
- t_N je vrijeme rada bez dnevnog svjetla, u satima,
- t_y je standardno vrijeme trajanja jedne godine. Uzima se da je $t_y = 8\,760$ sati,
- t_{em} je vrijeme punjenja rasvjete za nuždu, u satima.

Ukupna električna energija potrebna za rasvjetu, W_t , može se procijeniti za bilo koje vremensko razdoblje (sat, dan, tjedan, mjesec ili godina) u skladu s vremenskim razdobljem na koje se odnose faktori ovisnosti. Kod postojećih zgrada može se izmjeriti energija isporučena za rasvjetu. Mjerenje se može provesti za bilo koje vremensko razdoblje.

Prema normi HRN EN 15193 [131], za proračun se može koristiti opsežna metoda s detaljnim podacima (na godišnjoj, mjesečnoj ili satnoj bazi) ili brza pojednostavnjena metoda sa zadanim vrijednostima (na godišnjoj bazi). Preporučene zadane vrijednosti za projektiranje rasvjete, koje koristi brza metoda proračuna, dane su u tablici 7.16.

Rasvjeta mora biti projektirana i izvedena prema dobroj inženjerskoj praksi za rasvjetu. Kriteriji za projektiranje rasvjete dani su u normama HRN EN 12464-1 [132] i HRN EN 12193 [133]. Projektirana rasvjeta mora ispuniti osnovne zahtjeve za rasvjetu. U tablici 7.16 navedena su tri razreda kvalitete rasvjete:

- * osnovno ispunjenje zahtjeva
- ** dobro ispunjenje zahtjeva,
- *** opsežno ispunjenje zahtjeva.

Povećanjem razreda kvalitete rasvjete poboljšavaju se uvjeti vizualnog komfora korisnika i njegovo zadovoljstvo, ali značajno raste potrebna gustoća instalirane snage rasvjete, a to znači i LENI.

LENI (eng.: Lighting Energy Numeric Indicator) je **brojčani pokazatelj rasvjetne energije** za zgradu. On omogućava usporedbu zgrada slične namjene prema energetske učinkovitosti rasvjete. Određuje se jednačinom:

$$\text{LENI} = \frac{W}{A} \quad (7.71)$$

gdje je:

W ukupna godišnja energija utrošena za rasvjetu, u kWh/god,

A ukupna korisna ploština podova zgrade, u m².

Smanjenje LENI-ja, a to znači povećanje energetske učinkovitosti rasvjete bez smanjenja kvalitete rasvjete, može se postići ugradnjom energetski učinkovitijih rasvjetnih tijela i smanjenjem faktora F_C , F_0 i F_D što znači boljim iskorištavanjem dnevnog svjetla i boljom kontrolom rada rasvjete.

TABLICA 7.16 Zadane preporučene vrijednosti (prema HRN EN 15193 [131])																					
Namjena zgrade	Razred kvalitete	P _{em}	P _{pc}	P _N	t _D	t _N	F _C			F _O		F _D		Nema konst. osvjetljenosti		Konstantna osvjetljenost					
							kWh/(m ² ×god)	kWh/(m ² ×god)	W/m ²	h	h	Nema konst. osvjetljenosti	Konst. osvjetljenost	Ručno	Autom.	Ručno	Autom.	Granična vrijednost			
																		Ručno	Autom.	kWh/(m ² ×god)	kWh/(m ² ×god)
Ured	*	1	5	15	2250	250	1	0,9	1	0,9	1	0,9	42,1	35,3	38,3	32,2					
	**	1	5	20	2250	250	1	0,9	1	0,9	1	0,9	54,6	45,5	49,6	41,4					
	***	1	5	25	2250	250	1	0,9	1	0,9	1	0,9	67,1	55,8	60,8	50,6					
Obrazovanje	*	1	5	15	1800	200	1	0,9	1	0,9	1	0,8	34,9	27,0	31,9	24,8					
	**	1	5	20	1800	200	1	0,9	1	0,9	1	0,8	44,9	34,4	40,9	31,4					
	***	1	5	25	1800	200	1	0,9	1	0,9	1	0,8	54,9	41,8	49,9	38,1					
Bolnica	*	1	5	15	3000	200	1	0,9	0,9	0,8	1	0,8	70,6	55,9	63,7	50,7					
	**	1	5	25	3000	200	1	0,9	0,9	0,8	1	0,8	115,6	91,1	104,4	82,3					
	***	1	5	35	3000	200	1	0,9	0,9	0,8	1	0,8	160,6	126,3	144,9	114,0					
Hotel	*	1	5	10	3000	200	1	0,9	0,7	0,7	1	1	38,1	38,1	34,6	34,6					
	**	1	5	20	3000	200	1	0,9	0,7	0,7	1	1	72,1	72,1	65,1	65,1					
	***	1	5	30	3000	200	1	0,9	0,7	0,7	1	1	108,1	108,1	97,6	97,6					
Restoran	*	1	5	10	1250	125	1	0,9	1	1	1	-	29,6	-	27,1	-					
	**	1	5	25	1250	125	1	0,9	1	1	1	-	67,1	-	60,8	-					
	***	1	5	35	1250	125	1	0,9	1	1	1	-	92,1	-	83,3	-					
Sport	*	1	5	10	2000	200	1	0,9	1	1	1	0,9	43,7	41,7	39,7	37,9					
	**	1	5	20	2000	200	1	0,9	1	1	1	0,9	83,7	79,7	75,7	72,1					
	***	1	5	30	2000	200	1	0,9	1	1	1	0,9	123,7	117,7	111,7	106,3					
Prodaja	*	1	5	15	3000	200	1	0,9	1	1	1	-	78,1	-	70,6	-					
	**	1	5	25	3000	200	1	0,9	1	1	1	-	128,1	-	115,6	-					
	***	1	5	35	3000	200	1	0,9	1	1	1	-	178,1	-	160,6	-					
Proizvodnja	*	1	5	10	2500	150	1	0,9	1	1	1	0,9	43,7	41,2	39,7	37,5					
	**	1	5	20	2500	150	1	0,9	1	1	1	0,9	83,7	78,7	75,7	71,2					
	***	1	5	30	2500	150	1	0,9	1	1	1	0,9	123,7	116,2	111,7	105,					

8 ENERGETSKA UČINKOVITOST (ENERGETSKO SVOJSTVO) ZGRADE

8.1 Energetska učinkovitost (energetska efikasnost)

Učinkovitost i efikasnost su pojmovi koji potječu iz engleskog govornog područja, a koriste se u raznim stručnim disciplinama, često s različitim značenjem.

Općenito, **učinkovitost** (eng.: effectiveness) je sposobnost da se postigne željeni cilj. To je ocjena odnosa između postignutog rezultata i postavljenog cilja. Ako je nešto ocijenjeno kao učinkovito to znači da ono ima željeni ishod. Učinkovitost je relativno neodređen koncept, ne kvantitativan, s naglaskom na izbor ciljeva procesa. Biti učinkovit znači „načiniti dobru stvar“. Učinkovitost je određena bez pozivanja na utrošene resurse u realizaciji željenog učinka. Cilj učinkovitosti je realizacija kao takva, a ne resursi namijenjeni realizaciji željenog cilja.

S druge strane, **efikasnost** (eng.: efficiency), općenito, opisuje mjeru u kojoj su resursi dobro iskorišteni da bi se postigao željeni rezultat. Efikasnost predstavlja ostvarivanje nekog cilja s minimalnim utroškom resursa (princip minimuma). Efikasnost je, općenito, mjerljiv koncept, kvantitativno određen odnosom izlaza iz nekog procesa i ulaza u taj proces. Kod efikasnosti je važna, dakle, kvaliteta procesa. Biti efikasan znači „dobro načiniti neku stvar“.

Efikasnost znači, dakle, raditi stvari na pravi način, a učinkovitost znači raditi prave stvari. Prema tome, ono što je učinkovito ne mora biti nužno i efikasno.

U našoj stručnoj literaturi i komunikaciji u području energetike i zgradarstva najčešće se ne pravi razlika između pojmova efikasnosti i učinkovitosti, već se oba izraza promatraju u jednakom značenju, kao sinonimi.

Učinkovita uporaba energije ili kraće **energetska učinkovitost (energetska efikasnost)** označava stanje rada nekog sustava za koje je uporaba energije najmanja za jednaku učinjenu uslugu. Ona je mjera za utrošak energije s kojim se postižu utvrđene željene koristi. Energetska učinkovitost se može definirati kao odnos između dobivenog proizvoda, usluge ili dobivene energije i energije upotrijebljene za postizanje tog učinka. Neki događaj je onda učinkovit kad su određene koristi postignute s najmanjim utroškom energije. Energetska učinkovitost se uvijek odnosi na neki proizvod, proces ili sustav koji za svoj rad rabi energiju. Biti energetska učinkovita znači koristiti manje energije da bi se dobila jednaka usluga.

Porast energetske učinkovitosti vodi u nacionalnom gospodarstvu ka smanjenju potrošnje energije. Poboljšanje energetske učinkovitosti je, dakle, jedan od mogućih načina štednje (čuvanja) energije, ali uz zadovoljenje nužnog uvjeta da učinjena usluga bude istovjetna. S makro-ekonomskog gledišta cilj provođenje mjera energetske učinkovitosti je smanjenje globalnih energetske potreba. Energetska učinkovitost smanjuje izravne i neizravne troškove povezane s proizvodnjom i uporabom energije. Smanjujući uporabu energije ona doprinosi i smanjenju nepovoljnih ekoloških opterećenja (u prvom redu stakleničkih plinova) te povećava sigurnost opskrbe energijom.

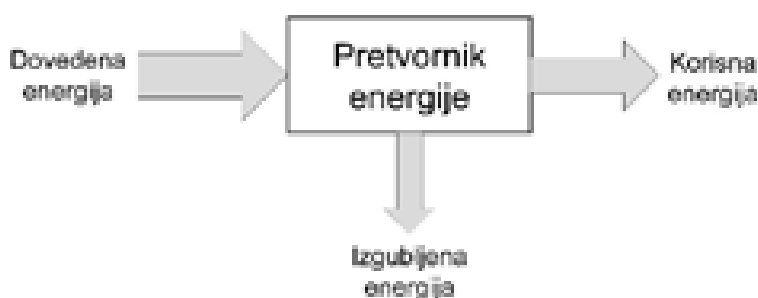
U zgradarstvu, poboljšanje energetske svojstava komponenata zgrade vodi ka poboljšanju energetske učinkovitosti zgrade. Kao mjera za energetska učinkovitost služi konačna potrebna energija za rad tehničkih sustava zgrade izražena potrebnom primarnom energijom. Brojčani ciljevi energetske učinkovitosti izražavaju se u obliku pokazatelja ukupno potrebne primarne energije za rad tehničkih sustava zgrade. Energetska ocjena zgrade radi određivanja njene energetske učinkovitosti provodi se metodologijom opisanom u krovnoj normi HRN EN 15603 [134] i pratećim normama, a dokumentira se u certifikatu energetske svojstva zgrade prema HRN EN 15217 [135].

8.2 Stupanj djelovanja

U fizici se kao mjera učinkovitosti pretvorbe energije iz jednog oblika u drugi ili učinkovitosti prijenosa energije koristi stupanj djelovanja. **Stupanj djelovanja**, η , općenito je definiran kao omjer izlazne (dobivene, korisne) i ulazne (dovedene, potrošene) snage, energije ili rada nekog uređaja, postrojenja ili sustava:

$$\text{Stupanj djelovanja} = \frac{\text{Korisna energija na izlazu}}{\text{Dovedena energija na ulazu}}$$

Razliku između dovedene i dobivene snage koja pri tome nastaje označavamo kao gubitak snage (vidjeti sliku 8.1).



Slika 8.1 Učinkovitost pretvorbe energije

Stupanj djelovanja je broj bez dimenzije i ima vrijednost između 0 i 1, odnosno izraženo u postocima između 0 % i 100 %. Stupanj djelovanja izražava se u % onoga što bi se kao ideal moglo očekivati, dakle 100 % kao idealan slučaj. Najviša vrijednost (1 odnosno 100 %) u praksi se ne može postići jer kod svih procesa dolazi do gubitka energije (u obliku toplinske energije).

Pored opće definicije stupnja djelovanja postoje i druge definicije i nazivi, ovisno o promatranom području tehnike. Kod toga je važno kako je promatrani sustav definiran (granice sustava), koji se rubni uvjeti uzimaju u obzir te posebnosti tokova energije u promatranom sustavu.

Kod sustava složenih iz više uređaja (n uređaja), ukupni stupanj djelovanja sustava, η_{uk} , dobije se tako da se međusobno pomnože stupnjevi djelovanja pojedinih uređaja:

$$\eta_{uk} = \eta_1 \times \eta_2 \times \dots \times \eta_n \quad (8.1)$$

Stupanj djelovanja koristi se za iskazivanje učinkovitosti tehničkog sustava zgrade ili njegova podsustava. On služi za praktičnu i izravnu usporedbu učinkovitosti različitih sustava ili podsustava.

Kod analize energetske učinkovitosti nekog sustava važno je utvrditi da li u analizu ulazi i materijal korišten za izradu sustava, u kojem slučaju se govori o energetske aspektu cijelog životnog ciklusa. Npr. ako se analizira sustav panela od fotonaponskih čelija, njegova energetska učinkovitost biti će beskonačna. On ne treba dodatnu energiju na ulazu u sustav, a Sunčevo zračenje je prisutno u okolišu i besplatno je. Ako se analizira cijeli životni ciklus ovih panela utvrditi će se da se energija, koja je utrošena na proizvodnju i instalaciju panela (ulazna energija u sustav) proizvede samim panelom u razdoblju od oko tri godine njegova rada. Za životni vijek fotonaponskih panela od preko 30 godina, energetska učinkovitost iznositi će više od 1 000 %. Da bi se ovaj podatak mogao usporediti s drugim izvorima energije, trebalo bi i za njih provesti jednaku analizu za čitav životni ciklus.

8.3. Ocjenjivanje energetske učinkovitosti (energetskog svojstva) zgrade

Energetska učinkovitost (energetsko svojstvo) zgrade je proračunata (procijenjena) ili izmjerena (stvarno potrošena) ukupna godišnja količina energije potrebna za rad tehničkih sustava zgrade, kojima se održavaju željeni uvjeti u prostoru zgrade povezani s:

- grijanjem prostora,
- hlađenjem i odvlaživanjem prostora,
- ventilacijom i ovlaživanjem prostora,
- pripremom potrošne tople vode,
- umjetnom rasvjetom prostora,
- drugim uslugama povezanim s potrošnjom energije (kao mogućnost).

Tehnički sustavi, koji u zgradama obavljaju gornje funkcije, u pravilu rabe više različitih nositelja energije, u različitim količinama, koje su često izražene različitim mjernim jedinicama, a svaki nositelj energije ima i različiti ekološki utjecaj na okoliš. Da bi se ovako različiti nositelji energije mogli zajedno obuhvatiti i energetska učinkovitost (energetsko svojstvo) zgrade mogla karakterizirati jednim brojčanim podatkom i time omogućila međusobna usporedba energetske učinkovitosti različitih zgrada, potrebno je na jedinstvenoj bazi ocijeniti energiju isporučenu tehničkim sustavima zgrade. To ocjenjivanje se može provesti s obzirom na:

- potrebnu primarnu energiju,
- emisiju CO₂,
- neke druge parametre definirane na nacionalnoj razini u skladu s nacionalnom energetskom politikom.

Ocjenjivanje energetske učinkovitosti (energetskog svojstva) zgrade se provodi na način da se količine pojedinih isporučenih (procijenjenih) nositelja energije pomnože s odgovarajućim faktorima ili koeficijentima pretvorbe. Algebarski zbroj tako ponderiranih upotrijebljenih (procijenjenih) nositelja energije predstavlja **karakteristiku energetske učinkovitosti (energetskog svojstva) zgrade** ili kraće **energetsku karakteristiku zgrade** (potrebnu primarnu energiju, emisiju CO₂ ili politikom definiranu karakteristiku).

Energetska učinkovitost (energetsko svojstvo) zgrade prikazuje se ukupnim **pokazateljem energetske učinkovitosti (energetskog svojstva) zgrade**, *EP* (eng.: energy performance), koji je odnos karakteristike energetske učinkovitosti zgrade i ploštine kondicionirane površine poda zgrade, A_c .

Pokazatelj energetske učinkovitosti ili kraće energetski pokazatelj može prikazivati:

- potrebnu primarnu energiju (E_P),
- emisiju CO₂ (m_{CO_2}),
- politikom definirani parametar.

Mjerna jedinica pokazatelja energetske učinkovitosti (energetskog svojstva), *EP*, može biti MJ/(m²×a) ili kW×h/(m²×a) ili kgCO₂/(m²×a) ili EURA/(m²×a), zavisno o odabranom pokazatelju.

Energetski pokazatelji omogućuju kvantitativno energetsko vrednovanje zgrade na jedinstvenoj bazi i mjera su energetske kvalitete (učinkovitosti) zgrade.

Za energetsko ocjenjivanje zgrade koristi se integralni pristup, a to znači zajedničko ocjenjivanje tijela zgrade i tehničkih sustava zgrade, uzimajući u obzir i njihovo uzajamno međudjelovanje.

Proračun je utemeljen na karakteristikama zgrade i ugrađenih tehničkih sustava zgrade, a provodi se na tri razine:

1. razina proračuna – proračun potrebne korisne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade

U ovom dijelu proračuna analiziraju se samo svojstva tijela zgrade, a ne i tehničkih sustava zgrade. Rezultat proračuna je korisna toplinska energija koju moraju ogrjevna tijela predati u prostor zgrade ili energija koja se mora odvesti iz prostora zgrade, kako bi se održala predviđena unutarnja temperatura. Za provedbu tih proračuna potrebni su podaci o unutarnjoj i vanjskoj klimi, unutarnjim toplinskim dobicima i toplinskim karakteristikama tijela zgrade.

2. razina proračuna – proračun potrebne konačne energije za rad sustava grijanja, hlađenja, ventilacije, potrošne tople vode i rasvjete te proračun ukupne energije isporučene zgradi

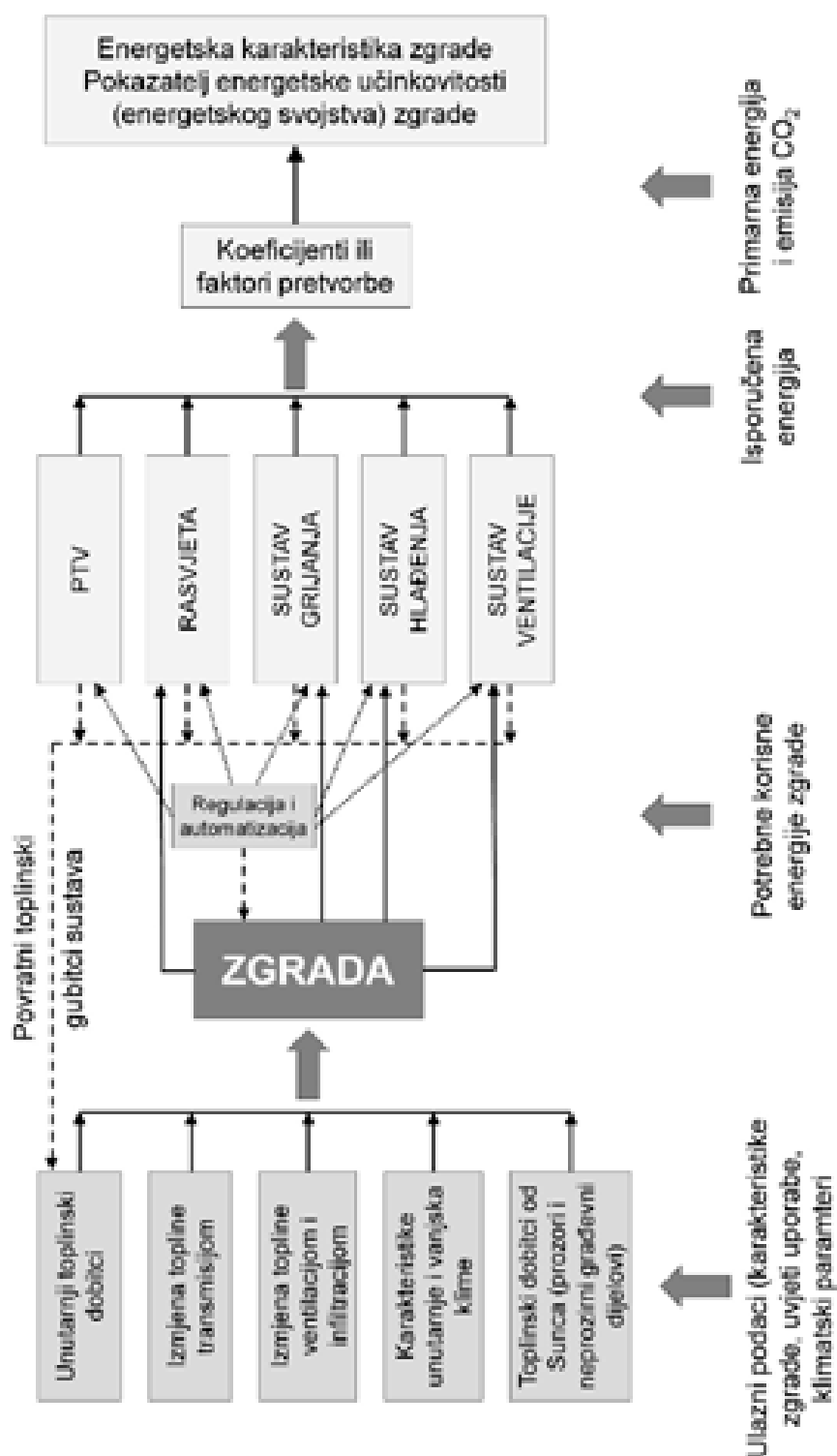
Kod ovog proračuna uzimaju se u obzir karakteristike sustava za grijanje, hlađenje, ventilaciju, potrošnu toplu vodu i rasvjetu, uključujući elemente za regulaciju i automatsko upravljanje tim sustavima. Rezultat proračuna je potrebna konačna energija za rad pojedinih tehničkih sustava zgrade. U obzir se uzima i potrebna pomoćna energija za rad pumpi, ventilatora i td. Odvojeno se utvrdi energija potrošena za različite usluge i energija iz različitih nositelja energije. Zbrajanjem istovrsnih nositelja energije potrebnih za rad pojedinih sustava zgrade dobije se ukupna energija isporučena zgradi izražena količinom pojedinih nositelja energije.

3. razina proračuna – proračun karakteristika energetske učinkovitosti (energetskog svojstva) zgrade (potrebne primarne energije, emisije CO₂ i td) i ukupnih pokazatelja energetske učinkovitosti.

Ponderiranjem rezultata proračuna iz točke 2 radi iskazivanja potrošnje energije jednim brojem dobije se potrebna primarna energija i druge karakteristike potrošnje energije te pridruženi pokazatelji energijske učinkovitosti (energetskog svojstva) zgrade.

Smjer proračuna karakteristika energetske učinkovitosti zgrade je od potrebnih korisnih energija prema primarnoj energiji.

Tijek proračuna energetske učinkovitosti (energetskog svojstva) zgrade prikazan je na slici 8.2. [136].



Slika 8.2 Tijek proračuna energetske učinkovitosti (energetskog svojstva) zgrade

8.4 Potrošnja energije u zgradi

Ocjenjivanje energetske učinkovitosti zgrade mora obuhvatiti slijedeće vrste usluga :

- grijanje prostora (proces dobave topline radi ostvarenja toplinske ugodnosti tijekom zime),
- hlađenje prostora (proces odvođenja topline radi ostvarenja toplinske ugodnosti tijekom ljeta) i odvlaživanje (proces uklanjanja vodene pare iz zraka radi smanjenja relativne vlažnosti),

- ventilaciju (proces dobave svježeg zraka u prostor ili uklanjanja potrošenog zraka iz prostora, prirodnim ili mehaničkim načinom) i ovlaživanje (proces dodavanja vodene pare u zrak radi povećanja relativne vlažnosti),
- pripremu potrošne tople vode (zagrijavanje hladne vode iz vodovodne mreže na željenu temperaturu na mjestu izljeva),
- rasvjetu (proces dobave nužnog umjetnog osvjjetljenja) – za stambene zgrade samo kao mogućnost,
- ostale usluge (usluge ostvarene uređajima koji troše energiju) – kao mogućnost.

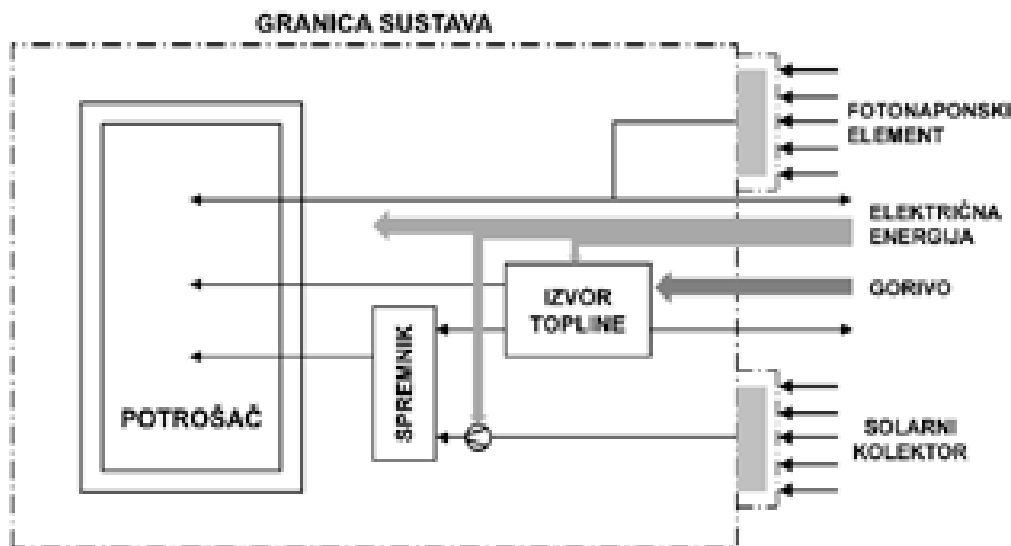
Godišnja potrošnja energije uključuje pomoćnu energiju i gubitke svih tehničkih sustava.

8.5 Granica sustava

Prije proračuna godišnje potrošnje energije u nekoj zgradi mora se jednoznačno odrediti granica ocjenjivanja energetske učinkovitosti zgrade. Ta granica se naziva **granicom sustava**. Granica sustava je granica kojom su obuhvaćene sve površine pridružene zgradi (unutar i izvan zgrade) gdje se troši ili proizvodi energija. Granica sustava se odnosi na predmet ocjenjivanja (npr. stan, zgrada,...).

Unutar granice sustava toplinski gubici sustava se uzimaju u obzir eksplicitno, a izvan granice sustava u obzir se uzimaju pomoću faktora pretvorbe.

Kroz granicu sustava energija se može unositi ili izvoziti. Većina tih energijskih tokova može se izraziti količinama pomoću mjerila potrošnje pojedinih nositelja energije. Granica sustava za nositelje energije su mjerila potrošnje plina, električne energije, daljinskog grijanja i vode, a za tekuće i krute nositelje energije to su ulazna mjesta uređaja za njihovu pohranu. Ukupnu energiju, izraženu po nositeljima energije, koja je predana tehničkim sustavima zgrade na granici sustava radi zadovoljenja energijskih potreba grijanja, hlađenja, ventilacije, potrošne tople vode i rasvjete, ili za potrebe proizvodnje električne energije na lokaciji zgrade, nazivamo **isporučena energija**.



Slika 8.3. Primjeri tokova energije kroz granicu sustava

Ako se dio tehničkog sustava zgrade (npr. kotao, rashladni toranj,...) nalazi izvan ovojnice zgrade, ali čini dio ocjenjivanih tehničkih sustava zgrade, smatra se da je on unutar granica sustava, a gubici sustava uzimaju se u obzir eksplicitno.

Za aktivne energetske sustave koji koriste energiju Sunca, vjetra ili vode, upadno Sunčevo zračenje na sunčane kolektore ili kinetička energija vjetra ili vode nisu dio energetske bilance

zgrade. U energetske bilancu ulaze samo isporučena energija iz uređaja za proizvodnju i pomoćna energija potrebna za dovodenje energije od izvora (npr. sunčanog kolektora) do zgrade.

8.6 Vrste karakteristika energetske učinkovitosti zgrade (vrste energetske karakteristike zgrade)

Energetska karakteristika zgrade je ocjenjena energetska učinkovitost (energetsko svojstvo) zgrade, utemeljena na zbroju ponderiranih potrošenih ili procijenjenih količina nositelja energije. Postoje dva glavna tipa energetske karakteristike zgrade:

- energetska karakteristika zgrade određena proračunom (proračunana energetska karakteristika)
- energetska karakteristika zgrade određena mjerenjem (izmjerena energetska karakteristika).

Kod **energetske karakteristike zgrade određene proračunom** ocjenjivanje energetske učinkovitosti zgrade osniva se na proračunima ponderirane isporučene energije za potrebe grijanja, hlađenja, ventilacije, potrošne tople vode i rasvjete te proračunu izvezene energije proizvedene na lokaciji zgrade. Energetska karakteristika određena proračunom može biti standardna, projektna ili prilagođena.

Standardna energetska karakteristika zgrade je proračunana energetska karakteristika dobivena uporabom stvarnih podataka za zgradu i skupa standardnih podataka za korištenje (unutarnja i vanjska klima, podaci o okolini kao što je zaštita od Sunčeva zračenja ili zasjenjenje susjednim zgradama, zaposjednutost i dr.), koji je definiran na nacionalnoj razini. Ona predstavlja godišnju potrošnju energije u zgradi uz standardne uvjete. Ova energetska karakteristika se koristi kod energetske certifikacije zgrada.

Projektna energetska karakteristika zgrade je proračunana energetska karakteristika dobivena uporabom projektnih podataka za zgradu i skupa standardnih podataka za korištenje. Određuje se u fazi projektiranja zgrade i koristi se kod dobivanja dozvole za građenje od nadležnog tijela državne uprave. Za zgradu izgrađenu u skladu s projektom, projektna energetska karakteristika se može smatrati standardnom energetskom karakteristikom.

Prilagođena ili individualna energetska karakteristika je proračunana energetska karakteristika dobivena uporabom stvarnih podataka za zgradu, klimu, okolinu i korištenje. Ona se koristi kod optimizacije energetske učinkovitosti zgrada i planiranja mjera energetskog poboljšanja postojećih zgrada.

Kod **energetske karakteristike zgrade određene mjerenjem** ocjenjivanje energetske učinkovitosti zgrade osniva se na izmjerenim količinama isporučene i izvezene energije. Izmjerena energetska karakteristika je zbroj ponderiranih nositelja energije potrošenih u zgradi, izmjerenih mjerilima potrošnje ili na drugi način. Ona je mjera za stvarnu energetske učinkovitost korištene zgrade i omogućuje procjenu učinaka stvarnih uvjeta korištenja u odnosu na normirane uvjete te doprinosi potrošnje energije koja nije uključena u vrednovanje energetskog svojstva. Zato se standardna energetska karakteristika i izmjerena energetska karakteristika ne mogu međusobno izravno usporediti.

Pokazatelji energetske učinkovitosti (energetskog svojstva) zgrade mogu se temeljiti na standardnoj energetskoj karakteristici (za zgradu koja se projektira ili za postojeću zgradu) ili na izmjerenoj energetskoj karakteristici zgrade (za postojeće zgrade).

Ako je pokazatelj utemeljen na standardnoj energetskoj karakteristici zgrade naziva se **standardni energetski pokazatelj** (standardni pokazatelj energetske učinkovitosti).

Ako je pokazatelj utemeljen na izmjerenoj energetskoj karakteristici zgrade naziva se **izmjereni energetski pokazatelj** (izmjereni pokazatelj energetske učinkovitosti).

8.7 Energetska karakteristika zgrade određena proračunom

8.7.1 Postupak proračuna

Cilj proračuna je procijeniti ukupnu godišnju potrošnju energenata i energije, ukupnu godišnju primarnu energiju ili ukupnu godišnju emisiju CO₂. Proračunsko razdoblje je, dakle, jedna godina. Proračun se u pravilu provodi podjelom godine na određeni broj vremenskih proračunskih koraka (npr. mjeseci, sate,...) i provođenjem proračuna za svaki vremenski korak uzimajući u obzir vrijednosti koje zavise o tom koraku. Godišnje vrijednosti se dobiju zbrajanjem rezultata svih proračunskih koraka tijekom jedne godine.

Smjer proračuna polazi od potrebnih korisnih energija zgrade prema primarnoj energiji tj. suprotan je toku energije u tehničkom sustavu. Opskrba električnom strujom (rasvjeta, ventilacija, pomoćna energija) i opskrba toplinom (grijanje, hlađenje, ovlaživanje, odvlaživanje, potrošna topla voda) unutar granica zgrade promatraju se odvojeno. Odvojeno se promatraju i energija proizvedena na lokaciji zgrade iz lokalno dostupnih obnovljivih izvora i isporučena energija.

Energetsko bilanciranje svih tokova energije slijedi jednaki pristup: potrebna konačna energija za rad tehničkog sustava proizlazi iz potrebne korisne energije zgrade i toplinskih gubitaka tehničkog sustava zgrade. Potrebna primarna energija određuje se iz potrebne konačne energije (isporučena energija) kod čega je konačna energija, izražena po nositeljima energije, ponderirana s odgovarajućim faktorom konverzije.

8.7.2 Proračun potrebnih korisnih toplinskih energija zgrade

Potrebna korisna energija za grijanje ili hlađenje (eng.: energy need for heating or cooling) je toplota koja se mora isporučiti kondicioniranom prostoru ili iz njega odvesti radi održavanja predviđene temperature tijekom određenog vremena, ne uzimajući u obzir svojstva tehničkih sustava zgrade. Potrebna korisna energija za grijanje i hlađenje se određuje proračunom. Ona se ne može jednostavno izmjeriti.

Potrebna korisna energija za potrošnu toplu vodu (eng.: energy need for domestic hot water) je toplota koja se mora isporučiti potrebnoj količini potrošne tople vode za podizanje njene temperature od hladne vode iz vodovodne mreže do temperature prethodno određene za isporuku tople vode na mjestu isporuke, ne uzimajući u obzir tehnički sustav zgrade.

Potrebna korisna energija za ovlaživanje i odvlaživanje je latentna toplota u vodenoj pari koju tehnički sustav zgrade mora isporučiti u kondicionirani prostor ili odvesti iz njega, kako bi se održala specificirana najmanja ili najveća vlažnost zraka u prostoru zgrade.

Potrebne korisne topline zgrade, izmijenjene topline zgrade te toplinski dobitci u zgradi i povratni toplinski gubici sustava, prikazani su zajednički u tablici 8.1.

Tablica 8.1 Potrebne korisne energije zgrade

		C1	C2	C3	C4	C5
		Grijanje		Hlađenje		Potrošna topla voda
		Osjetil-na toplota	Latentna toplota (ovlaživanje)	Osjetil-na toplota	Latentna toplota (odvlaživanje)	
L1	Toplinski dobitci zgrade i povratni toplinski gubici sustava ^{a)}	$Q_{H,gn} + Q_{H,ls,rbl}$	-	$Q_{C,gn} + Q_{C,ls,rbl}$	-	-

L2	Izmijenjena toplina zgrade	$Q_{H,ht}$	-	$Q_{C,ht}$	-	-
L3	Potrebna korisna toplina zgrade	$Q_{H,nd}$	$Q_{H,hum,nd}$	$Q_{C,nd}$	$Q_{C,dhum,nd}$	$Q_{W,nd}$
a) Ako je primjenjivo						

Simboli u tablici 8.1 imaju slijedeća značenja:

$Q_{H,nd}$	potrebna korisna energija za grijanje zgrade (bez ovlaživanja), u MJ,
$Q_{C,nd}$	potrebna korisna energija za hlađenje zgrade (bez odvlaživanja), u MJ,
$Q_{W,nd}$	potrebna korisna energija za potrošnu toplu vodu, u MJ,
$Q_{H,hum,nd}$	potrebna toplinska energija za ovlaživanje, u MJ,
$Q_{C,dhum,nd}$	potrebna toplinska energija za odvlaživanje, u MJ,
$Q_{H,ht}$	izmijenjena toplina transmisijom i ventilacijom za zgradu kada se grije, u MJ,
$Q_{C,ht}$	izmijenjena toplina transmisijom i ventilacijom za zgradu kada se hladi, u MJ,
$Q_{H,gn}$	unutarnji i sunčevi dobitci topline za zgradu kada se grije, u MJ,
$Q_{C,gn}$	unutarnji i sunčevi dobitci topline za zgradu kada se hladi, u MJ,
$Q_{H,ls,rbl}$	povratni toplinski gubitci tehničkog sustava zgrade kada se grije, u MJ,
$Q_{C,ls,rbl}$	povratni toplinski gubitci tehničkog sustava zgrade kada se hladi, u MJ.

8.7.3 Proračun potrebnih konačnih energija za rad tehničkih sustava zgrade

8.7.3.1 Podaci o tehničkim sustavima zgrade bez dijela sustava za proizvodnju topline

Toplinski gubitci tehničkih sustava zgrade, električna i pomoćna energija, bez sustava za proizvodnju toplinske energije (izvora topline), zbirno su prikazani u tablici 8.2.

Tablica 8.2 Podaci o tehničkim sustavima zgrade (bez podsustava za proizvodnju topline)

		C1	C2	C3	C4	C5
		Grijanje	Hlađenje	Potrošna topla voda	Ventilacija	Rasvjeta
L4	Električna energija	$W_{H,ngen}$	$W_{C,ngen}$	$W_{W,ngen}$	E_V	E_L
L5	Toplinski gubitci sustava	$Q_{H,ngen,ls}$	$Q_{C,ngen,ls}$	$Q_{W,ngen,ls}$		
L6	Povratni toplinski gubitci sustava	$Q_{H,ngen,ls,rbl}$	$Q_{C,ngen,ls,rbl}$	$Q_{W,ngen,ls,rbl}$	$Q_{V,ls,rbl}$	$Q_{L,ls,rbl}$ ^{a)}
L7	Ulazna toplina u podsustav razvoda	$Q_{H,dis,in}$	$Q_{C,dis,in}$	$Q_{W,dis,in}$		
a) $Q_{L,ls,rbl}$ je povratna toplina koju oslobađa sustav rasvjete						

Toplinski gubitci tehničkih sustava zgrade bez dijela sustava za proizvodnju toplinske energije, uključuju toplinske gubitke kod predaje topline u prostor, gubitke razvoda topline i gubitke pohrane topline (ako pohrana nije uključena u dio za proizvodnju) odgovarajućeg tehničkog sustava.

Toplinski izlaz sustava razvoda kod hlađenja uključuje i potrebnu toplinu za odvlaživanje.

Toplinski izlaz sustava za ventilaciju uključuje i potrebnu toplinu za ovlaživanje.

Simboli u tablici 8.2 imaju slijedeća značenja:

$Q_{H,ngen,ls}$	toplinski gubitci sustava za grijanje, bez dijela sustava za proizvodnju topline, u MJ,
$Q_{H,ngen,ls,rbl}$	povratni toplinski gubitci sustava za grijanje, bez dijela sustava za proizvodnju topline, u MJ,
$W_{H,ngen}$	pomoćna energija sustava za grijanje, bez dijela sustava za proizvodnju toplinske energije, u MJ,
$Q_{H,dis,in}$	toplina koja ulazi u sustav razvoda, sustava za grijanje, u MJ,
$Q_{C,ngen,ls}$	toplinski gubici sustava za hlađenje, bez dijela sustava za proizvodnju topline, u MJ,
$Q_{C,ngen,ls,rbl}$	povratni toplinski gubitci sustava za hlađenje, bez dijela sustava za proizvodnju topline, u MJ,
$W_{C,ngen}$	pomoćna energija sustava za hlađenje, bez dijela sustava za proizvodnju topline, u MJ,
$Q_{C,dis,in}$	toplina koja ulazi u sustav razvoda, sustava za hlađenje, u MJ,
$Q_{W,ngen,ls}$	toplinski gubici sustava za potrošnu toplu vodu, bez dijela sustava za proizvodnju topline, u MJ,
$Q_{W,ngen,ls,rbl}$	povratni toplinski gubitci sustava za potrošnu toplu vodu, bez dijela sustava za proizvodnju topline, u MJ,
$W_{W,ngen}$	pomoćna energija sustava za potrošnu toplu vodu, bez dijela sustava za proizvodnju topline, u MJ,
$Q_{W,dis,in}$	toplina koja ulazi u sustav razvoda, sustava za potrošnu toplu vodu, u MJ,
E_V	potrebna konačna električna energija za sustav ventilacije (uključujući ovlaživanje), u MJ,
$Q_{V,ls,rbl}$	povratni toplinski gubici sustava za ventilaciju, u MJ,
E_L	potrebna konačna električna energija za sustav rasvjete, u MJ,
$Q_{L,ls,rbl}$	toplina koju disipira sustav rasvjete, u MJ.

8.7.3.2 Podaci o sustavima za proizvodnju toplinske energije

Ulaznu toplinsku energiju u sustav razvoda treba priskrbiti iz izlazne toplinske energije sustava za proizvodnju topline koji je u zgradi ili iz topline dobavljene izvan zgrade (npr. iz daljinskog grijanja).

Toplina dovedena sustavu razvoda, u skladu s projektom sustava, razdijeljena je na različite sustave za proizvodnju topline u zgradi i direktno dovedenu toplinu izvan zgrade.

U tablici 8.3 dane su relevantne energetske karakteristike za pojedine sustave za proizvodnju topline u zgradi (uključivo kogeneracijsko postrojenje, toplinske pumpe, rashladne sustave, sunčeve i fotonaponske sustave,...) kao i za toplinu isporučenu izravno sustavu razvoda bez pretvorbe energije u granicama sustava.

Tablica 8.3 Podaci o sustavima za proizvodnju topline

		C1	C2	C3
	Tip sustava za proizvodnju energije	Sustav za proizvodnju topline 1	Sustav za proizvodnju topline 2	Sustav za proizvodnju topline i
	<i>Opskrbljivani sustavi razvoda</i> ^{a)} →			
L8	Izlazna toplina iz sustava proizvodnje	$Q_{gen,out,1}$	$Q_{gen,out,2}$	$Q_{gen,out,i}$

L9	Pomoćna energija sustava proizvodnje	$W_{\text{gen},1}$	$W_{\text{gen},2}$	$W_{\text{gen},i}$
L10	Toplinski gubitci sustava proizvodnje	$Q_{\text{gen},\text{ls},1}$	$Q_{\text{gen},\text{ls},2}$	$Q_{\text{gen},\text{ls},i}$
L11	Povratni toplinski gubitci sustava proizvodnje	$Q_{\text{gen},\text{ls},\text{rbl},1}$	$Q_{\text{gen},\text{ls},\text{rbl},2}$	$Q_{\text{gen},\text{ls},\text{rbl},i}$
L12	Ulazna energija u sustav proizvodnje	$E_{\text{gen},\text{in},1}$	$E_{\text{gen},\text{in},2}$	c)
L13	Proizvodnja električne energije	$E_{\text{el},\text{gen},\text{out},1}$	$E_{\text{el},\text{gen},\text{out},2}$	$E_{\text{el},\text{gen},\text{out},i}$
L14	Nositelj energije ^{b)} →			
a) naziv tehničkog sustava koji se opskrbljuje toplinom (grijanje, hlađenje, grijanje i potrošna topla voda,...) b) naziv nositelja energije za rad sustava za proizvodnju topline (nafta, plin, sunčeva toplina,...) c) ne uzima se u obzir ulazna energija u slučaju obnovljive energije proizvedene na lokaciji zgrade ili energija koja dolazi iz drugih sustava za proizvodnju energije postavljenih unutar granica sustava				

Simboli u tablici 8.3 imaju slijedeća značenja:

$Q_{\text{gen},\text{out},i}$	izlazna energija sustava za proizvodnju i (jednaka ulaznoj energiji koju zahtijevaju sustavi razvoda koje se opskrbljuje iz tog sustava proizvodnje), u MJ,
$W_{\text{gen},i}$	pomoćna energija sustava za proizvodnju i , u MJ,
$Q_{\text{gen},\text{ls},i}$	toplinski gubitci sustava za proizvodnju i , u MJ,
$Q_{\text{gen},\text{ls},\text{rbl},i}$	povratni toplinski gubitci sustava za proizvodnju i , u MJ,
$E_{\text{gen},\text{in},i}$	ulazna energija u sustav za proizvodnju i , u MJ, (jednaka je izlaznoj toplini i izlaznoj električnoj energiji iz sustava proizvodnje, plus toplinski gubitci sustava, minus, u pojednostavnjenom pristupu, vraćeni toplinski gubitci sustava),
$E_{\text{el},\text{gen},\text{out},i}$	proizvedena električna energija uređaja za proizvodnju i , u MJ.

Ako jedan sustav za proizvodnju energije snabdijeva drugi sustav za proizvodnju (npr. kogeneracijsko postrojenje snabdijeva apsorpcijski hladnjak) treba razlikovati između izlazne topline u sustav razvoda i izlazne topline za drugi sustav za proizvodnju. Izlazna toplina, toplinski gubitci i ulazna energija drugog sustava za proizvodnju navode se samo kao informacija ali se ne uzimaju u obzir u energijskoj bilanci sustava za proizvodnju.

Kod metode proračuna kogeneracijskog postrojenja uzima se da je ulazna energija jednaka zbroju izlazne topline i svih toplinskih gubitaka, a električna energija se računa kao dobitak.

Za toplinsku pumpu, razlika između ulazne energije i zbroja izlazne topline i toplinskih gubitaka uzima se u obzir u bilanci energije zgrade ili kao vraćena toplina unutar granica sustava ili kao obnovljiva energija proizvedena na lokaciji zgrade, kad je toplina dobivena kroz granicu sustava. (npr. toplinska pumpa s izmjenjivačem topline u tlu).

Ako se toplinska pumpa koristi za proizvodnju topline za grijanje ili za potrošnu toplu vodu i za uklanjanje (izvlačenje) topline kod hlađenja, tada se u retku L8 tablice 8.3 odvojeno navode dobavljena toplina i izvučena toplina.

Ako sustav za proizvodnju energije daje energiju za grijanje i za hlađenje, tada se njegovi toplinski gubitci i pomoćna energija dijele na te dvije usluge u skladu s izlaznim toplinama.

U pojednostavnjenom pristupu, vraćeni toplinski gubici sustava odbijaju se od toplinskih gubitaka sustava. Stoga se moraju ukupni vraćeni toplinski gubici sustava razdijeliti na različite sustave za proizvodnju, kako bi se dalje nastavio proračun do energijskih karakteristika uzimajući u obzir svakog pojedinog nositelja energije. U tu svrhu vraćene toplinske gubitke u pojedini sustav za proizvodnju proračunamo pomoću jednadžbe:

$$Q_{\text{gen,ls,rvd},i} = Q_{\text{Tot,sys,ls,rvd}} \times \left(\frac{Q_{\text{gen,out},i}}{\sum_i Q_{\text{gen,out},i}} \right) \quad (8.2)$$

gdje je:

$Q_{\text{gen,ls,rvd},i}$ vraćeni toplinski gubitak sustava, za sustav za proizvodnju i , u MJ,
 $Q_{\text{Tot,sys,ls,rvd}}$ ukupni vraćeni toplinski gubitak sustava, u MJ,
 $Q_{\text{gen,out},i}$ izlazna toplina sustava za proizvodnju i , u MJ,

Ulaznu energiju u sustav proizvodnje energije (zbroj toplinskih i električnih izlaza sustava za proizvodnju i toplinskih gubitaka sustava za proizvodnju) treba dobiti ulaznom energijom iz različitih nositelja energije i iz obnovljivih energija proizvedenih na lokaciji zgrade.

Proizvedena energija na lokaciji zgrade dijeli se, u skladu s projektnim rješenjem sustava, na energiju potrošenu u zgradi i na izvezenu energiju za potrošnju na drugim mjestima.

8.8 Energetska karakteristika zgrade određena mjerenjem

Količina nositelja energije isporučenih zgradi i izvezene energije mora se izmjeriti i prikazati kao u tablici 8.4.

Tablica 8.4 Prikaz nositelja energije za izmjerenu energetska karakteristiku

Redak	R1	R2	R3	R4
	Jedinice (l, kg, m ³ , kW×h, MJ,...)	Isporučena energija (količine energenta)	Bruto kalorijska vrijednost, H_i	Isporučena energija (sadržaj energije u kW×h ili MJ)
L1		Nositelj energije (i) (plin, nafta, električna energija, daljinsko grijanje)		R2 x R3
	Jedinice (kW×h, MJ,...)	Izvezena energija (količine)		Izvezena energija (sadržaj energije u kW×h ili MJ)
L2		Toplinska: Električna:		
		Obnovljiva energija proizvedena na lokaciji zgrade		
L3		Toplinska: Električna:		
<i>Napomena:</i> Stupce u tablici 8.4 treba prilagoditi za dotičnu zgradu				

Godišnja isporučena količina nositelja energije (stupac R2, redak L1) odgovara izmjerenoj ukupno isporučenoj količini svakog nositelja energije. Izvezena energija (stupac R2, redak L2) mjeri se mjerilom potrošnje energije ili odgovarajućim uređajem. Isporučene i izvezene količine nositelja energije navode se u jedinicama u kojima su izmjerene.

Potrošnja toplinske energije, Q_i , tijekom određenog razdoblja proračunava se množenjem utrošene količine nositelja energije i , E_i , i njegove bruto kalorijske vrijednosti, H_i :

$$Q_i = E_i \times H_i \quad (8.3)$$

Kalorijska vrijednost (ogrjevnost) je količina topline proizvedena potpunim izgaranjem jedinične količine goriva uz konstantni tlak zraka od 101 320 Pa. **Bruto kalorijska vrijednost** obuhvaća i toplinu vraćenu pri kondenzaciji vodene pare koja je posljedica gorenja vodika. **Neto kalorijska vrijednost** ne uzima u obzir latentnu toplinu.

Bruto kalorijske vrijednosti nekih krutih i tekućih goriva dane su u tablici 8.5.

Tablica 8.5 Bruto kalorijske vrijednosti nekih goriva (prema HRN EN 15603, [134])

Gorivo	Bruto kalorijska vrijednost, H_i , u MJ/kg
Antracit	32 do 35
Kameni ugljen	17 do 25
Mrki ugljen	29,6
Koks	28 do 31
Lignit	15 do 30
Treset	13 do 20
Drvo (suho)	14 do 17
Loživo ulje, lagano ($\rho=0,84$ do $0,85$ kg/l)	44,8
Loživo ulje, teško ($\rho=0,96$ kg/l)	50,2 do 42,3

Bruto kalorijske vrijednosti nekih plinovitih nositelja energije dane su u tablici 8.6.

Tablica 8.6 Bruto kalorijske vrijednosti nekih plinova (prema HRN EN 15603, [134])

Gorivo	Gustoća, ρ , u kg/m ³	Bruto kalorijska vrijednost, H_i , u MJ/m ³
Prirodni plin	0,64	35,2
Prirodni plin	0,61	41,3
Metan	0,55	39,9
Propan	1,56	100,9
Butan	2,09	133,9
Bioplin	1,2	4 do 8 *)
*) Zavisi o sadržaju metana		

8.9 Ponderirane karakteristike energetske učinkovitosti (energetskog svojstva) zgrade

8.9.1 Primarna energija kao energetska karakteristika zgrade

Primarna energija je energija koja nije bila izložena nikakvoj pretvorbi ili procesu transformacije. Ona obuhvaća neobnovljivu i obnovljivu energiju, koje se zajedno nazivaju ukupna primarna energija. Za zgrade to je energija potrošena za proizvodnju energije isporučene zgradi.

Potrebna primarna energija zgrade proračunava se iz udjela pojedinih nositelja energije u isporučenoj i izvezenoj energiji, uporabom faktora primarne energije.

Faktor ukupne primarne energije za danog nositelja energije je neobnovljiva i obnovljiva primarna energija podijeljena s isporučenom energijom. Pri tome je primarna energija ona energija koja je potrebna da bi se dobavila jedna jedinica isporučene energije, uzevši u obzir energiju potrebnu za sve radnje nužne za isporuku do zgrade u kojoj će se isporučena energija koristiti. Faktor ukupne primarne energije uvijek je veći od jedan.

Faktor neobnovljive primarne energije za danog nositelja energije je neobnovljiva primarna energija podijeljena s isporučenom energijom. Pri tome je neobnovljiva primarna energija ona neobnovljiva energija koja je potrebna da bi se dobavila jedna jedinica isporučene energije, uzevši u obzir energiju potrebnu za sve radnje nužne za isporuku do zgrade u kojoj će se isporučena energija koristiti. Faktor neobnovljive primarne energije može biti manji od jedan ako je korištena obnovljiva energija.

Postupak s primarnom energijom omogućava jednostavno zbrajanje različitih vrsta energije (npr. toplinske i električne). Za zbrajanje su potrebni faktori primarne energije (faktori pretvorbe), koji se donose na nacionalnoj razini, a uključuju gubitke izvan granica sustava zgrade tj. gubitke proizvodnje, pohrane, prijenosa i svih drugih radnji potrebnih za isporuku energije na granicu zgrade u kojoj se isporučena energija rabi. Faktor primarne energija za nekog nositelja energije je jednak odnosu primarne i isporučene energije.

U tablici 8.7 navedene su vrijednosti faktora primarne energije koje se mogu upotrijebiti ako nema propisanih nacionalnih podataka

Tablica 8.7 Faktori primarne energije i koeficijenti emisije CO₂ (prema HRN EN 15603, [134])

Izvor energije	Faktori primarne energije f_p		Koeficijenti emisije CO ₂ K
	Neobnovljive energije	Ukupne energije	kgCO ₂ /MW×h
Loživo ulje	1,35	1,35	330
Plin	1,36	1,36	277
Antracit	1,19	1,19	394
Lignit	1,40	1,40	433
Koks	1,53	1,53	467
Strugotine od drva	0,06	1,06	4
Trupci	0,09	1,09	14

Trupci bukovine	0,07	1,07	13
Trupci jelovine	0,10	1,10	20
Električna energija iz hidroelektrana	0,50	1,50	7
Električna energija iz nuklearnih elektrana	2,80	2,80	16
Električna energija iz elektrana na ugljen	4,05	4,05	1340
Mješavina električne energije (prema UCPTE)	3,14	3,31	617

Ako neka zgrada predaje toplinu drugoj zgradi koja se nalazi izvan granice ocjenjivanja, tada se ta toplina uzima u obzir kao da se radi o daljinskom grijanju. Faktor primarne energije za drugu zgradu uključuje proizvodnju i toplinske gubitke između tih dviju zgrada.

Potrebna primarna energija se proračuna iz isporučene i izvezene energije za svakog nositelja energije, prema slijedećem izrazu:

$$E_P = \sum_i (E_{\text{del},i} \times f_{P,\text{del},i}) - \sum_i (E_{\text{exp},i} \times f_{P,\text{exp},i}) \quad (8.4)$$

gdje je:

$E_{\text{del},i}$ isporučena energija za nositelja energije i , u MJ,

$E_{\text{exp},i}$ izvezena energija za nositelja energije i , u MJ,

$f_{P,\text{del},i}$ faktor primarne energije za isporučenog nositelja energije i ,

$f_{P,\text{exp},i}$ faktor primarne energije za izvezenog nositelja energije i .

Prikaz proračuna potrebne primarne energije kao energetske karakteristike zgrade provodi se kao u tablici 8.8.

8.9.2 Emisija ugljikovog dioksida, CO₂, kao energetska karakteristika zgrade

Koeficijent emisije CO₂ za određenog nositelja energije je količina ugljikovog dioksida emitirana u atmosferu po jedinici isporučene energije.

Ukupna emitirana masa CO₂ proračuna se iz isporučene i izvezene energije za svakog nositelja energije, prema slijedećem izrazu:

$$m_{\text{CO}_2} = \sum_i (E_{\text{del},i} \times K_{\text{del},i}) - \sum_i (E_{\text{exp},i} \times K_{\text{exp},i}) \quad (8.5)$$

gdje je:

$E_{\text{del},i}$ isporučena energija za nositelja energije i , u MJ,

$E_{\text{exp},i}$ izvezena energija za nositelja energije i , u MJ,

$K_{\text{del},i}$ koeficijent emisije CO₂ za isporučenog nositelja energije i ,

$K_{\text{exp},i}$ koeficijent emisije CO₂ za izvezenog nositelja energije i .

Koeficijenti emisije CO₂ moraju obuhvatiti sve emisije CO₂ povezane s potrošnjom primarne energije u zgradi. Ako su koeficijenti za goriva dani za jedinicu energije, tada se oni moraju temeljiti na bruto kalorijskim vrijednostima. Koeficijenti emisije CO₂ se donose na nacionalnoj razini, a ako nema propisanih nacionalnih podataka mogu se upotrijebiti vrijednosti iz tablice 8.7

Proračun emisije CO₂ prikazuje se u skladu s tablicom 8.8.

Tablica 8.8 Prikaz proračuna CO₂ kao energetske karakteristike zgrade (prema HRN EN 15603, [134])

Redak		C1	C2	C3
		Isporučena energija		
		Nositelj energije 1	Nositelj energije i	
1	Isporučena energija	$E_{del,1}$	$E_{del,i}$	
2	Koeficijent (ili faktor) ponderiranja	$K_{del,1}$	$K_{del,i}$	
3	Emisija CO ₂ (ili ponderirana isporučena energija)	$m_{CO_2,del,1}$	$m_{CO_2,del,i}$	$\Sigma_i m_{CO_2,del,i}$
		Izvezena energija		
		Toplinska	Električna	
4	Izvezena energija (prije ponderiranja)	$Q_{exp,T}$	$E_{exp,el}$	
5	Koeficijent (ili faktor) ponderiranja	$K_{exp,T}$	$K_{exp,el}$	
6	Emisija CO ₂ (ili ponderirana izvezena energija)	$m_{CO_2,exp,T}$	$m_{CO_2,exp,el}$	$\Sigma_i m_{CO_2,exp,i}$
7	Karakteristika energetskog svojstva			m_{CO_2}

8.9.3 Energetska karakteristika zgrade definirana politikom

Da bi se utjecalo na ponašanje građana u vezi s potrošnjom energije, mogu se primijeniti politički faktori kako bi se za neke nositelje energije potaknula uporaba, a uporaba nekih drugih „kaznila“. Energetska karakteristika definirana politikom proračuna se iz isporučene i izvezene energije za svakog nositelja energije, prema slijedećem izrazu:

$$E_{pol} = \Sigma_i (E_{del,i} \times f_{pol,del,i}) - \Sigma_i (E_{exp,i} \times f_{pol,exp,i}) \quad (8.6)$$

gdje je:

- $E_{del,i}$ isporučena energija za nositelja energije i , u MJ,
- $E_{exp,i}$ izvezena energija za nositelja energije i , u MJ,
- $f_{P,del,i}$ faktor politike za isporučenog nositelja energije i ,
- $f_{P,exp,i}$ faktor politike za izvezenog nositelja energije i .

8.10 Izvješćivanje o ocjenjivanju potrošnje energije neke zgrade

Za izvješćivanje o ocjenjivanju energetske učinkovitosti (energetskog svojstva) zgrade, zasnovanom na potrebnoj primarnoj energiji, emisiji CO₂ ili nacionalnoj energetskej politici, koristi se prikaz kao u tablici 8.9.

Tablica 8.9 Izvješćivanje o ukupnoj potrošnji energije ili emisiji CO₂ za energetska karakteristiku zgrade određenu proračunom ili mjerenjem

Samo za proračunatu energetska karakteristiku		Za proračunatu ili izmjerenu energetska karakteristiku	
Potrebna korisna toplina zgrade (bez tehničkih sustava zgrade)	Energetska učinkovitost (energetsko svojstvo) tehničkog sustava zgrade (toplinski gubici sustava minus vraćeni gubici)	Isporučena energija (sadržaj nositelja energije)	Energetska karakteristika zgrade (ponderirani nositelji energije)
Grijanje: $Q_{H,nd}$ $Q_{H,hum,nd}$ Potrošna topla voda: $Q_{W,nd}$ Hlađenje: $Q_{C,nd}$ $Q_{C,dhum,nd}$	Grijanje (H+W = grijanje plus topla voda): $Q_{HW,ls,nrvd}$ Hlađenje: $Q_{C,ls,nrvd}$ Električna energija^{*)}: Pomoćna energija za grijanje: W_{HW} Pomoćna energija za hlađenje: W_C Rasvjeta: E_L Ventilacija: E_V	Plin: $E_{gas,del}$ Nafta: $E_{oil,del}$ Elekt. energ.: $E_{el,del}$ Dalj. grijanje: $E_{dh,del}$ Drvo: $E_{Wd,del}$ Nositelj energije (i): $E_{i,del}$	$\sum_i E_{P,del,i}$ ili $\sum_i E_{pol,del,i}$ ili $\sum_i m_{CO2,del,i}$
		Izvezena energija (energenti prije ponderiranja)	$\sum_i E_{P,exp,i}$ ili $\sum_i E_{pol,exp,i}$ ili $\sum_i m_{CO2,exp,i}$
		Toplinska: $Q_{T,exp}$	
		Električna: $E_{el,exp}$	
			E_P; m_{CO2} ili E_{pol}
		Obnovljiva energija proizvedena na lokaciji zgrade	
		Toplinska: $Q_{H,gen,out}$	
		Električna: $E_{el,gen,out}$	
^{*)} Uključuje električnu energiju za ventilaciju, rasvjetu i pomoćnu energiju za termotehničke sustave. Nije uključena električna energija za grijanje, hlađenje, potrošnu toplu vodu, ovlaživanje i odvlaživanje.			

Energetska učinkovitost (energetsko svojstvo) tehničkog sustava zgrade iz tablice 8.9 određuje se pomoću slijedećih izraza:

$$Q_{HW,ls,nrvd} = Q_{H,ngen,ls} + \sum_i Q_{H,gen,ls,i} + Q_{W,ngen,ls} + \sum_i Q_{W,gen,ls,i} - Q_{WH,ls,rvd} \quad (8.7)$$

$$Q_{C,ls,nrvd} = Q_{C,ngen,ls} + \sum_i Q_{C,gen,ls,i} - Q_{C,ls,rvd} \quad (8.8)$$

$$W_{HW} = W_{H,ngen} + \sum_i W_{H,gen,i} + W_{W,ngen} + \sum_i W_{W,gen,i} \quad (8.9)$$

$$W_C = W_{C,ngen} + \sum_i W_{C,gen,i} \quad (8.10)$$

gdje je:

$Q_{WH,ls,rvd}$	vraćeni toplinski gubitak sustava grijanja i potrošne tople vode,
$Q_{WH,ls,nrvd}$	toplinski gubitak sustava grijanja i potrošne tople vode koji nije vraćen u sustav,
$Q_{C,ls,rvd}$	vraćeni toplinski gubitak sustava hlađenja,
$Q_{C,ls,nrvd}$	toplinski gubitak sustava hlađenja koji nije vraćen u sustav.

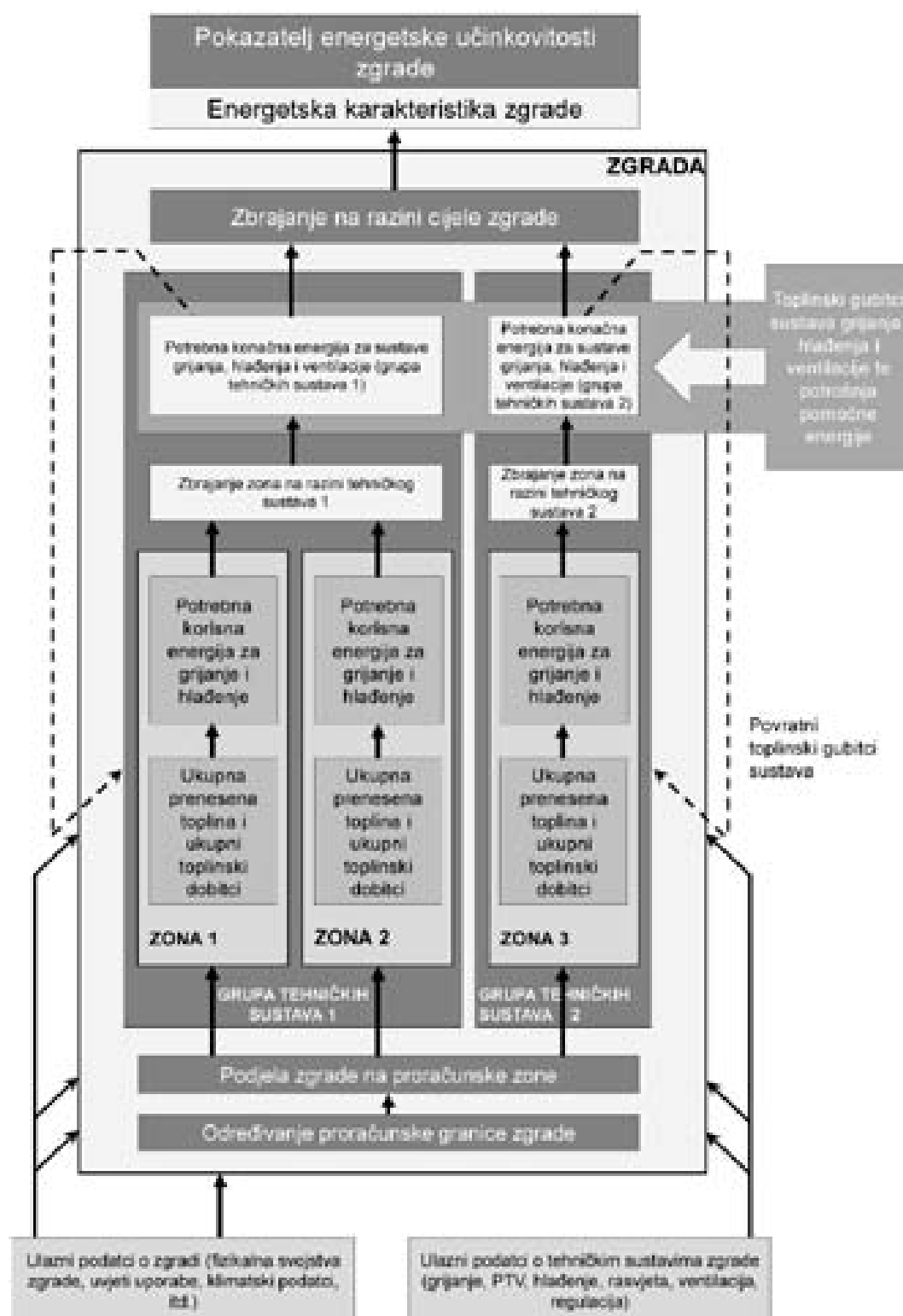
Pokazatelji energetske učinkovitosti (energetskog svojstva) zgrade su:

$EP = E_p / A_c$ [MJ/(m²×a)] ili [kWh/(m²×a)] – prikazuje potrebnu primarnu energiju,

$EP = m_{CO_2} / A_c$ [kgCO₂/(m²×a)] – prikazuje emisiju CO₂,

$EP = E_{pol} / A_c$ – prikazuje politikom definirani parametar.

Na slici 8.4 dan je dijagram toka glavnih koraka proračuna energetske učinkovitosti zgrade. Prikazane su tri zone s dvije skupine tehničkih sustava (grijanje, hlađenje i ventilacija) koji opslužuju različite zone.



Slika 8.4 Dijagram toka glavnih proračunskih koraka

Prilog 2.1 Grčki alfabet

A α	alfa	I ι	jota	P ρ	ro
B β	beta	K κ	kapa	Σ σ	sigma
Γ γ	gama	Λ λ	lambda	Τ τ	tau
Δ δ	delta	Μ μ	mi	Υ υ	ipsilon
E ε	epsilon	N ν	ni	Φ φ	fi
Z ζ	zeta	Ξ ξ	ksi	Χ χ	hi
H η	eta	Ο ο	omikron	Ψ ψ	psi
Θ θ	theta	Π π	pi	Ω ω	omega

Prilog 2.2 Predmetci za tvorbu decimalnih jedinica

Predmetak	Znak	Vrijednost
eksa	E	10^{18}
peta	P	10^{15}
tera	T	10^{12}
giga	G	10^9
mega	M	10^6
kilo	k	10^3
hekto	h	10^2
deka	da	10
deci	d	10^{-1}
centi	c	10^{-2}
mili	m	10^{-3}
mikro	μ	10^{-6}
nano	n	10^{-9}
piko	p	10^{-12}
femto	f	10^{-15}
ato	a	10^{-18}

Napomena: Predmetak se stavlja ispred jedinice, a u govoru se povezuje s nazivom te jedinice. Predmetak množi tu jedinicu s vrijednošću s kojom je definiran.

Prilog 3.1 Projektne vrijednosti za najčešće korištene građevne materijale (prema HRN EN ISO 10456 [57])

Materijal		Gustoća ρ kg/m ³	Projektna toplinska vodljivost λ W/(m·K)	Specifični toplinski kapacitet c_p J/(kg·K)	Faktor otpora difuziji vodene pare μ (-)	
					suho	mokro
Asfalt		2 100	0,70	1 000	50 000	20 000
Bitumen	čisti	1 050	0,17	1 000	50 000	50 000
	bitumenske trake	1 100	0,23	1 000	50 000	50 000
Beton ^a	srednje gustoće	1 800	1,15	1 000	100	60
		2 000	1,35	1 000	100	60
		2 200	1,65	1 000	120	70
	velike gustoće	2 400	2,00	1 000	130	80
	armirani (s 1% čelika)	2 300	2,30	1 000	130	80
	armirani (s 2% čelika)	2 400	2,50	1 000	130	80
Podne obloge	guma	1 200	0,17	1 400	10 000	10 000
	plastika	1 700	0,25	1 400	10 000	10 000
	podloga, pjenasta guma ili plastika	270	0,10	1 400	10 000	10 000
	podloga, pust	120	0,05	1 300	20	15
	podloga, vuna	200	0,06	1 300	20	15
	podloga, pluto	< 200	0,05	1 500	20	10
	ploče pluta	> 400	0,065	1 500	40	20
	tekstilna podna obloga	200	0,06	1 300	5	5
	linoleum	1 200	0,17	1 400	1 000	800
Plinovi	zrak	1,23	0,025	1 008	1	1
	ugljični dioksid	1,95	0,014	820	1	1
	argon	1,70	0,017	519	1	1
	sumporni heksafluorid	6,36	0,013	614	1	1
	kripton	3,56	0,0090	245	1	1
	ksenon	5,68	0,0054	160	1	1
Staklo	obično staklo (float staklo)	2 500	1,00	750	∞	∞
	kvarcno staklo	2 200	1,40	750	∞	∞
	stakleni mozaik	2 000	1,20	750		∞
Voda	led pri –10 °C	920	2,30	2 000	-	-
	led pri 0 °C	900	2,20	2 000	-	-
	snijeg, svježi (<30 mm)	100	0,05	2 000	-	-
	snijeg, meki (30 – 70 mm)	200	0,12	2 000	-	-

	snijeg, malo zbijen (70 – 100 mm)	300	0,23	2 000	-	-
	snijeg, zbijen (<200 mm)	500	0,60	2 000	-	-
	voda pri 10 °C	1 000	0,60	4 190	-	-
	voda pri 40 °C	990	0,63	4 190	-	-
	voda pri 80 °C	970	0,67	4 190	-	-
Metali	aluminijske legure	2 800	160	880	∞	∞
	bronza	8 700	65	380	∞	∞
	mjed	8 400	120	380	∞	∞
	bakar	8 900	380	380	∞	∞
	lijevano željezo	7 500	50	450	∞	∞
	olovo	11 300	35	130	∞	∞
	čelik	7 800	50	450	∞	∞
	nehrđajući čelik ^b , austen. ili aust.-fer.	7 900	17	500	∞	∞
	nehrđajući čelik ^b , fer. ili martenzitni	7 900	30	460	∞	∞
	cink	7 200	110	380	∞	∞
Plastični materijali, kruti	akril	1 050	0,20	1 500	10 000	10 000
	polikarbonat	1 200	0,20	1 200	5 000	5 000
	politetrafluoretilen (PTFE)	2 200	0,25	1 000	10 000	10 000
	polivinilklorid (PVC)	1 390	0,17	900	50 000	50 000
	polimetilmetaakrilat (PMMA)	1 180	0,18	1 500	50 000	50 000
	poliacetat	1 410	0,30	1 400	100 000	100 000
	poliamid (najlon)	1 150	0,25	1 600	50 000	50 000
	poliamid 6.6 s 25 % staklenih vlakana	1 450	0,30	1 600	50 000	50 000
	polietilen/politen, velike gustoće	980	0,50	1 800	100 000	100 000
	polietilen/politen, male gustoće	920	0,33	2 200	100 000	100 000
	polistiren	1 050	0,16	1 300	100 000	100 000
	polipropilen	910	0,22	1 800	10 000	10 000
	polipropilen s 25 % staklenih vlakana	1 200	0,25	1 800	10 000	10 000
	poliuretan (PU)	1 200	0,25	1 800	6 000	6 000
	epoksidna smola	1 200	0,20	1 400	10 000	10 000
	fenolna smola	1 300	0,30	1 700	100 000	100 000
	poliesterska smola	1 400	0,19	1 200	10 000	10 000
Guma	prirodna	910	0,13	1 100	10 000	10 000
	neopren (polikloropren)	1 240	0,23	2 140	10 000	10 000
	butil (izobuten), tvrdi / vruće taljen	1 200	0,24	1 400	200 000	200 000
	pjenasta guma	60 - 80	0,06	1 500	7 000	7 000

	tvrda guma (ebonit), kruta	1 200	0,17	1 400	∞	∞
	etilen-propilen-dijen-monomer	1 150	0,25	1 000	6 000	6 000
	poliizobutilen	930	0,20	1 100	10 000	10 000
	polisulfid	1 700	0,40	1 000	10 000	10 000
	butadijen	980	0,25	1 000	100 000	100 000
Brtvila, trake i toplinske brane	silikagel	720	0,13	1 000	∞	∞
	silikon, čisti	1 200	0,35	1 000	5 000	5 000
	silikon, punjeni	1 450	0,50	1 000	5 000	5 000
	silikonska pjena	750	0,12	1 000	10 000	10 000
	uretan / poliuretan (toplinska brana)	1 300	0,21	1 800	60	60
	polivinilklorid (PVC), savitljiv, s 40% omekšivača	1 200	0,14	1 000	100 000	100 000
	elastomerna pjena, savitljiva	60 – 80	0,05	1 500	10 000	10 000
	poliuretanska pjena (PU)	70	0,05	1 500	60	60
	Polietilenska pjena	70	0,05	2 300	100	100
Gips	gips	600	0,18	1 000	10	4
	gips	900	0,30	1 000	10	4
	gips	1 200	0,43	1 000	10	4
	gips	1 500	0,56	1 000	10	4
	gipskartonske ploče	700	0,21	1 000	10	4
	gipskartonske ploče	900	0,25	1 000	10	4
Vanjske i unutarnje žbuke	gipsana izolacijska žbuka	600	0,18	1 000	10	6
	gipsana žbuka	1 000	0,40	1 000	10	6
	gipsana žbuka	1 300	0,57	1 000	10	6
	gips, pijesak	1 600	0,80	1 000	10	6
	vapno, pijesak	1 600	0,80	1 000	10	6
	cement, pijesak	1 800	1,00	1 000	10	6
Tla	glina ili prah	1 200 – 1 800	1,5	1 670 – 2 500	50	50
	pijesak i šljunak	1 700 – 2 200	2,0	910 – 1 180	50	50
Kamen	prirodni, eruptivna stijena	2 800	3,5	1 000	10 000	10 000
	prirodni, sedimentna stijena	2 600	2,3	1 000	250	200
	prirodni, sedimentna stijena, lagana	1 500	0,85	1 000	30	20
	prirodni, porozni, npr. lava	1 600	0,55	1 000	20	15
	bazalt	2 700 – 3 000	3,5	1 000	10 000	10 000
	gnajs	2 400 – 2 700	3,5	1 000	10 000	10 000

	granit	2 500 – 2 700	2,8	1 000	10 000	10 000
	mramor	2 800	3,5		10 000	10 000
	slejt	2 000 – 2 800	2,2	1 000	1 000	800
	vapnenac, vrlo mekan	1 600	0,85	1 000	30	20
	vapnenac, mekan	1 800	1,1	1 000	40	25
	vapnenac, polutvrd	2 000	1,4	1 000	50	40
	vapnenac, tvrd	2 200	1,7	1 000	200	150
	vapnenac, vrlo tvrd	2 600	2,3	1 000	250	200
	pješčar (silikatni)	2 600	2,3	1 000	40	30
	prirodni plovuĉac	400	0,12	1 000	8	6
	umjetni kamen	1 750	1,3	1 000	50	40
Crijep (krovni)	glineni	20 000	1,0	800	40	30
	betonski	2 100	1,5	1 000	100	60
Drvena graĊa ^d		450	0,12	1 600	50	20
		500	0,13	1 600	50	20
		700	0,18	1 600	200	50
Paneli na bazi drva ^d	uslojeno drvo ^e	300	0,09	1 600	150	50
		500	0,13	1 600	200	70
		700	0,17	1 600	220	90
		1 000	0,24	1 600	250	110
	drvocementne ploĉe	1 200	0,23	1 500	50	30
	iverica	300	0,10	1 700	50	10
		600	0,14	1 700	50	15
		900	0,18	1 700	50	20
	OSB ploĉe	650	0,13	1 700	50	30
	vlaknatice, ukljuĉivo MDF ^f	250	0,07	1 700	5	3
		400	0,10	1 700	10	5
		600	0,14	1 700	20	12
		800	0,18	1 700	30	20

Napomena 1 Zbog proraĉuna vrijednost ∞ smije se zamijeniti proizvoljno velikom vrijednošću, npr. s 10^6

Napomena 2 Faktori otpora difuziji vodene pare dani su, prema HRN EN ISO 12572, za vrijednosti „suhe posude“ (rabe se kad je srednja relativna vlaŹnost kroz materijal manja od 70% - općenito vrijedi za materijale s unutarnje strane toplinsko-izolacijskog sloja) i za vrijednosti „mokre posude“ (rabe se kad je srednja relativna vlaŹnost kroz materijal jednaka ili veća od 70 % - općenito vrijedi za materijale s vanjske strane toplinsko-izolacijskog sloja). Ako nema posebnog toplinsko-izolacijskog sloja (raspodjeljena izolacija) vrijednosti „suhe posude“ primjenjuju se kad se graĊevni dio vlaŹi iz suhog stanja, a vrijednosti „mokre posude“ kad se on isušuje iz vlaŹnog stanja.

^a Gustoća betona je gustoća u suhom stanju.

^b U normi HRN EN 10088-1 dana su svojstva nehrĊajućih ĉelika koja se smiju upotrijebiti kad je poznat njegov toĉan sastav.

^c Toplinska vodljivost obuhvaća i slojeve kartona.

^d Ovdje se gustoća odnosi na ravnoteŹnu gustoću pri 20 °C i 65 % relativne vlaŹnosti.

^e Vrijednosti za uslojeno drvo smiju se rabiti i za panele od punog drva i laminirane graĊe, ako za njih nema odgovarajućih podataka.

^f MDF (eng.: Medium density fibreboard) je vlaknatice srednje gustoće, suhi proces.

Prilog 3.2 Koeficijenti pretvorbe za temperaturu (prema HRN EN ISO 10456 [57])

Tablica 3.2.1 Mineralna vuna (MW)

Tip proizvoda	Toplinska vodljivost, λ , W/(m·K)	Koeficijent pretvorbe, f_T , 1/K
Ploče, blazine, rahli materijal za ispunu	0,035	0,0046
	0,040	0,0056
	0,045	0,0062
	0,050	0,0069
Ploče	0,032	0,0038
	0,034	0,0043
	0,036	0,0048
	0,038	0,0053
Krute ploče	0,030	0,0035
	0,033	0,0035
	0,035	0,0035

Tablica 3.2.2 Ekspandirani polistiren (EPS)

Debljina proizvoda, d , mm	Toplinska vodljivost, λ , W/(m·K)	Koeficijent pretvorbe, f_T , 1/K
$d < 20$	0,032	0,0031
	0,035	0,0036
	0,040	0,0041
	0,043	0,0044
$20 < d < 40$	0,032	0,0030
	0,035	0,0034
	0,040	0,0036
$40 < d < 100$	0,032	0,0030
	0,035	0,0033
	0,040	0,0036
	0,045	0,0038
	0,050	0,0041
$d > 100$	0,032	0,0030
	0,035	0,0032
	0,040	0,0034
	0,053	0,0037

Tablica 3.2.3 Ekstrudirani polistiren (XPS)

Tip proizvoda	Toplinska vodljivost, λ , W/(m·K)	Koeficijent pretvorbe, f_T , 1/K
Bez opne	0,025	0,0046
	0,030	0,0045
	0,040	0,0045
S opnom, proizvodi s finim porama bez opne	0,025	0,0040
	0,030	0,0036
	0,035	0,0035
S nepropusnim pokrovom	0,025	0,0030
	0,030	0,0028
	0,035	0,0027
	0,040	0,0026

Tablica 3.2.4 Poliuretanska pjena (PUR)

Tip proizvoda	Toplinska vodljivost, λ , W/(m·K)	Koeficijent pretvorbe, f_T , 1/K
Proizvodi bez obloge	0,025	0,0055
	0,030	0,0050
Proizvodi s nepropusnom oblogom	0,022	0,0055
	0,025	0,0055

Tablica 3.2.5 Fenolna pjena

Tip proizvoda	Toplinska vodljivost, λ , W/(m·K)	Koeficijent pretvorbe, f_T , 1/K
Pjena sa zatvorenim porama (>90%) 0 °C do 20 °C 20 °C do 30 °C ^{a,b}		
	do 0,025	0,0020
	do 0,025	0,0050
Pjena s otvorenim porama 0 °C do 30 °C	0,032	0,0029

^a Pretvorba se mora provesti odvojeno za područje temperatura između 0 °C i 20 °C te za područje između 20 °C i 30 °C. Za pretvorbu između 10 °C i 25 °C prvo se provede pretvorba za područje temperatura od 10 °C do 20 °C, a zatim od 20 °C do 25 °C.

^b Koeficijenti pretvorbe odnose se na sredstva za uvlačenje zraka od pentana i hidrofluorouglijika (HFC). Pretvorba se može razlikovati u slučaju korištenja drugih sredstava za pjenjenje.

Tablica 3.2.6 Pjenasto staklo

Tip proizvoda	Toplinska vodljivost, λ , W/(m·K)	Koeficijent pretvorbe, f_T , 1/K
Svi proizvodi	0,035	0,0043
	0,040	0,0037
	0,045	0,0033
	0,050	0,0030
	0,055	0,0027

Tablica 3.2.7 Krute ploče od perlita, vlakana i veziva

Tip proizvoda	Toplinska vodljivost, λ , W/(m·K)	Koeficijent pretvorbe, f_T , 1/K
Svi proizvodi	Svi	0,0033

Tablica 3.2.8 Ploče od drvene vune

Tip proizvoda	Toplinska vodljivost, λ , W/(m·K)	Koeficijent pretvorbe, f_T , 1/K
Svi proizvodi	0,070	0,0040
	0,080	0,0041
	0,090	0,0046

Tablica 3.2.9 Ekspandirano pluto

Tip proizvoda	Toplinska vodljivost, λ , W/(m·K)	Koeficijent pretvorbe, f_T , 1/K
Svi proizvodi	Svi	0,0027

Tablica 3.2.10 Rahli sloj celuloznih vlakana

Tip proizvoda	Toplinska vodljivost, λ , W/(m·K)	Koeficijent pretvorbe, f_T , 1/K
Gustoća < 40 kg/m ³	Svi	0,0040
Gustoća ≥ 40 kg/m ³	Svi	0,0035

Tablica 3.2.11 Beton, pečena glina i mort

Tip proizvoda	Toplinska vodljivost, λ , W/(m·K)	Koeficijent pretvorbe, f_T , 1/K
Lagani beton	0,100	0,003
	0,150	0,002
	0,400	0,001
Gusti beton, pečena glina i mort	Svi	0,001

Tablica 3.2.12 Kalcijev silikat

Tip proizvoda	Toplinska vodljivost, λ , W/(m·K)	Koeficijent pretvorbe, f_T , 1/K
Svi proizvodi	Svi	0,0030

Tablica 3.2.13 Rahli sloj ekspandiranog perlita

Tip proizvoda	Toplinska vodljivost, λ , W/(m·K)	Koeficijent pretvorbe, f_T , 1/K
Svi proizvodi	0,040	0,0041
	0,050	0,0033

Tablica 3.2.14 Rahli sloj ekspandirane gline

Tip proizvoda	Toplinska vodljivost, λ , W/(m·K)	Koeficijent pretvorbe, f_T , 1/K
Svi proizvodi	0,070 do 0,150	0,004

Tablica 3.2.15 Rahli sloj vermikulita

Tip proizvoda	Toplinska vodljivost, λ , W/(m·K)	Koeficijent pretvorbe, f_T , 1/K
Svi proizvodi	0,070 do 0,150	0,003

Napomene:

- 1 – Za vrijednosti toplinske vodljivosti koje se nalaze između vrijednosti navedenih u tablicama 3.1.1 do 3.1.15, može se provesti linearna interpolacija.
- 2 – Vrijednosti toplinske vodljivosti dane su samo kao parametri identifikacije.
- 3 – Vrijednosti u tablicama 3.1.1 do 3.1.15 vrijede za srednje temperature do 0 °C do 30 °C.
- 4 – Podaci za ekstrudirani polistiren i poliuretansku pjenu vrijede za sva sredstva za pjenjenje.

**Prilog 3.3 - Vlažnosna svojstva i specifični toplinski kapacitet
toplinsko-izolacijskih materijala i materijala za zide
(prema HRN EN ISO 10456 [57])**

Materijal	Gustoća a	Sadržaj vlage pri 23 °C i 50 % RH		Sadržaj vlage pri 23 °C i 80 % RH		Koeeficijent pretvorbe vlage ^b				Faktor otpora vodenoj pari		Spec. topl. kapacitet
	ρ kg/m ³	u kg/kg	ψ m ³ /m ³	u kg/kg	ψ m ³ /m ³	sadržaj vlage u kg/kg	f_u	sadržaj vlage ψ m ³ /m ³	f_ψ	μ suš	μ mokar	c_p J/(kg K)
ekspandirani polistiren	10-50		0		0			<0,10	4	60	60	145'
ekstrudirana polistirenska pjena	20-65		0		0			<0,10	2,5	150	150	1450
poliuretanska pjena, kruta	28-55		0		0			<0,15	6	60	60	1400
mineralna vuna	10-200		0		0			<0,15	4 ^c	1	1	1030
fenolna pjena	20-50		0		0			<0,15	5	50	50	1400
čelijasto staklo	100-150	0		0		0	0			∞	∞	1000
perlitna ploča	140-240	0,02		0,03		0-0,03	0,8			5	5	900
ekspandirano pluto	90-140		0,008		0,011			<0,10	6	10	5	1560
ploča od drvene vune	250-450		0,03		0,05			<0,10	1,8	5	3	1470
drvena vlaknatica	40-250	0,1		0,16				<0,05	1,4	5	3	2000
urea-formaldehidna pjena	10-30	0,1		0,15		<0,15	0,7			2	2	1400
prskana poliuretanska pjena	30-50		0		0			<0,15	6	60	60	1400
rahli sloj mineralne vune	15-60		0		0			<0,15	4	1	1	1030
rahli sloj celuloznog vlakna	20-60	0,11		0,18		<0,20	0,5			2	2	1600
rahli sloj ekspandiranoga perlita	30-150	0,01		0,02		0-0,02	3			2	2	900
rahli sloj vermikulita bez ljuskica	30-150	0,01		0,02		0-0,02	2			3	2	1080
rahli sloj ekspandirane gline	200-400	0		0,001		0-0,02	4			2	2	1000
rahli sloj eksp. polistirenske podloge	10-30		0		0	<0,10		4	4	2	2	1400
pečena glina	100-2400		0,07		0,012			0-0,25	10	16	10	1000
kalcijski silikat	900-2200		0,012		0,024				10	20	15	1000

beton samo s plovućcem	500-1300		0,02		0,035				4	50	40	1000
beton i umjetni kamen	1600-2400		0,025		0,04				4	150	120	1000
beton s polistirenskim agregatom	500-800		0,015		0,025				5	120	60	1000
beton samo s ekspand. glinom	400-700	0,02		0,03		0-0,25	2,6			6	4	1000
beton s pretežno ekspand. glinom	800-1700	0,02		0,03		0-0,25	4			8	6	1000
beton s više od 70 % talioničke šljake	1100-1700	0,02		0,04		0-0,25	4			30	20	1000
beton s pretežnim agregatom iz piroprocesiranog kamenog uglja	1100-1500	0,02		0,04		0-0,25	4		15		10	1000
porasti beton	300-1000	0,026		0,045		0,025	4			10	6	1000
beton s drugim laganim agregatom	500-2000		0,03		0,05			0-0,25	4	15	10	1000
mort (za zide i žbukanje)	250-2000		0,04		0,06			0-0,25	4	20	10	1000
Opće vrijednosti dane su u ovoj tablici. Druge vrijednosti zavisne o materijalu i primjeni smiju se dati na nacionalnoj razini.												
^a Vidi točku 8.2 ^b Učinak prelaska mase tekućom vodom i vodenom parom i učinci promjene faze za vodu nisu obuhvaćene ovim podacima. Sadržaj vlage dan je u rasponu za koje vrijede koeficijenti. ^c Podaci ne vrijede ako bi mogao postojati kontinuirani dotok vlage na toploj strani izolacije.												

Prilog 4.1 Temperature rosišta za vodenu paru u zraku u ovisnosti o temperaturi i relativnoj vlažnosti zraka

Tempe- ratura °C	Temperatura rosišta u °C, kod relativne vlažnosti zraka, u %													
	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
30	10,5	12,9	14,9	16,8	18,4	20,0	21,4	22,7	23,9	25,1	26,2	27,2	28,2	29,1
29	9,7	12,0	14,0	15,9	17,5	19,0	20,4	21,7	23,0	24,1	25,2	26,2	27,2	28,1
28	8,8	11,1	13,1	15,0	16,6	18,1	19,5	20,8	22,0	23,1	24,2	25,2	26,2	27,1
27	8,0	10,2	12,3	14,1	15,7	17,2	18,6	19,9	21,1	22,2	23,3	24,3	25,2	26,1
26	7,1	9,4	11,4	13,2	14,8	16,3	17,6	18,9	20,1	21,2	22,3	23,3	24,2	25,1
25	6,2	8,5	10,5	12,2	13,9	15,3	16,7	18,0	19,1	20,3	21,3	22,3	23,2	24,1
24	5,4	7,6	9,6	11,3	12,9	14,4	15,8	17,0	18,2	19,3	20,3	21,3	22,3	23,1
23	4,5	6,7	8,7	10,4	12,0	13,5	14,8	16,1	17,2	18,3	19,4	20,3	21,3	22,2
22	3,6	5,8	7,8	9,5	11,1	12,5	13,9	15,1	16,3	17,4	18,4	19,4	20,3	21,2
21	2,8	5,0	6,9	8,6	10,2	11,6	12,9	14,2	15,3	16,4	17,4	18,4	19,3	20,2
20	1,9	4,1	6,0	7,7	9,3	10,7	12,0	13,2	14,4	15,4	16,4	17,4	18,3	19,2
19	1,1	3,2	5,1	6,8	8,4	9,8	11,1	12,3	13,4	14,5	15,5	16,4	17,3	18,2
18	0,2	2,3	4,2	5,9	7,4	8,8	10,1	11,3	12,5	13,5	14,5	15,4	16,3	17,2
17	-0,6	1,4	3,3	5,0	6,5	7,9	9,2	10,4	11,5	12,5	13,5	14,5	15,3	16,2
16	-1,4	0,6	2,4	4,1	5,6	7,0	8,2	9,4	10,5	11,6	12,6	13,5	14,4	15,2
15	-2,1	-0,3	1,5	3,2	4,7	6,0	7,3	8,5	9,6	10,6	11,6	12,5	13,4	14,2
14	-2,9	-1,1	0,6	2,3	3,8	5,1	6,4	7,5	8,6	9,6	10,6	11,5	12,4	13,2
13	-3,7	-1,8	-0,2	1,4	2,8	4,2	5,4	6,6	7,7	8,7	9,6	10,5	11,4	12,2
12	-4,4	-2,6	-1,0	0,5	1,9	3,3	4,5	5,6	6,7	7,7	8,7	9,6	10,4	11,2
11	-5,2	-3,4	-1,8	-0,4	1,0	2,3	3,5	4,7	5,7	6,7	7,7	8,6	9,4	10,2
10	-6,0	-4,2	-2,6	-1,2	0,1	1,4	2,6	3,7	4,8	5,8	6,7	7,6	8,4	9,2

Prilog 4.2 Tlak zasićene vodene pare i obujamska vlažnost zraka kod zasićenja

θ °C	p_{sat} Pa	v_{sat} kg/m ³	θ °C	p_{sat} Pa	v_{sat} kg/m ³
-20	103	0,00088	11	1312	0,00999
-19	113	0,00096	12	1402	0,01064
-18	124	0,00105	13	1497	0,01132
-17	137	0,00115	14	1598	0,01204
-16	150	0,00126	15	1704	0,01280
-15	165	0,00138	16	1817	0,01360
-14	181	0,00151	17	1937	0,01444
-13	198	0,00165	18	2063	0,01533
-12	217	0,00180	19	2196	0,01626
-11	237	0,00196	20	2337	0,01725
-10	259	0,00213	21	2486	0,01828
-9	283	0,00232	22	2642	0,01937
-8	309	0,00252	23	2808	0,02051
-7	338	0,00274	24	2982	0,02171
-6	368	0,00298	25	3166	0,02297
-5	401	0,00324	26	3359	0,02430
-4	437	0,00351	27	3563	0,02568
-3	475	0,00381	28	3778	0,02714
-2	517	0,00413	29	4003	0,02866
-1	562	0,00447	30	4241	0,03026
0	611	0,00484	31	4490	0,03194
1	656	0,00518	32	4752	0,03369
2	705	0,00555	33	5027	0,03552
3	757	0,00593	34	5316	0,03744
4	813	0,00634	35	5619	0,03945
5	872	0,00678	36	5937	0,04155
6	935	0,00724	37	6271	0,04374
7	1001	0,00773	38	6621	0,04603
8	1072	0,00825	39	6987	0,04843
9	1147	0,00880	40	7371	0,05092
10	1227	0,00938			

Prilog 4.3 Prikaz kompleksnih brojeva

Da bi se mogao izvaditi parni korijen iz negativnih brojeva uvedeni su imaginarni brojevi pomoću tzv. imaginarne jedinice i (npr. imaginarni broj $5i$) koja je određena uvjetom

$$i^2 = -1 \quad (4.1.1)$$

odnosno

$$i = +(-1)^{0.5} \quad (4.1.2)$$

Ponekad se imaginarna jedinica označava i simbolom j .

Algebarski zbroj realnog i imaginarnog broja naziva se kompleksni broj (npr.: $3 + 2i$).

Dva kompleksna broja koja se razlikuju samo u predznaku imaginarnog dijela nazivaju se konjugirano kompleksni brojevi (npr. $3 + 2i$ i $3 - 2i$).

Imaginarni i kompleksni brojevi ne nalaze se na brojnom pravcu već je za njihov prikaz potrebna cijela ravnina.

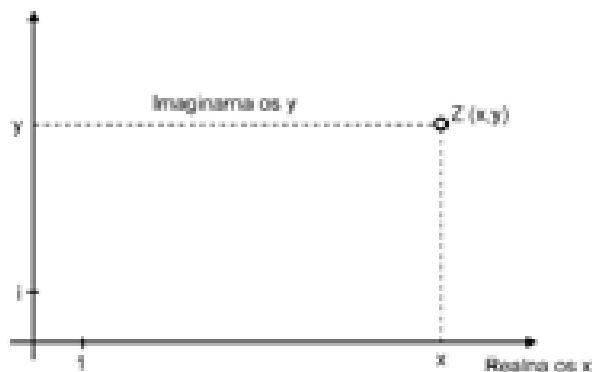
Uvođenjem kompleksnih brojeva omogućeno je i određivanje logaritma negativnih brojeva te rješavanje jednačbi oblika $\sin \varphi = k$ gdje je k bilo koji broj izvan zatvorenog intervala od -1 do $+1$.

Algebarski oblik kompleksnog broja z je:

$$z = x + i y \quad (4.1.3)$$

gdje su x i y realni brojevi, a i je imaginarna jedinica. x je realni dio, a y imaginarni dio kompleksnog broja z .

Svakom kompleksnom broju $z = x + i y$ pripada određena točka $z(x,y)$ u ravnini kompleksnih brojeva z (vidjeti sliku 4.1.1).



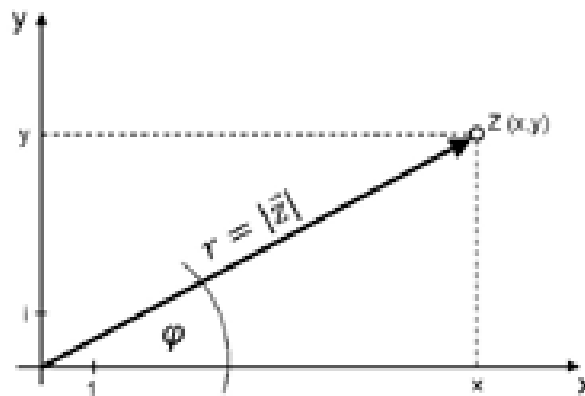
Slika 4.1.1 Geometrijski prikaz kompleksnog broja $z = x + i y$

Kompleksni broj se može prikazati i u obliku vektora koji ima početak u ishodištu koordinatnog sustava, a kraj u točki $z(x,y)$ (vidjeti sliku 4.1.2). Projekcije vektora na koordinatne osi su x i y . Duljina ili apsolutna vrijednost $r = |z|$ vektora z je

$$|z| = r = (x^2 + y^2)^{0.5} \quad (4.1.4)$$

Smjer φ vektora z određen je iz

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{y}{x} \quad (4.1.5)$$



Slika 4.1.2 Vektorski oblik kompleksnog broja

Prema slici 4.1.2 je

$$\begin{aligned} x &= r \times \cos \varphi \\ y &= r \times \sin \varphi \end{aligned} \quad (4.1.6)$$

Uvrštavanje izraza (4.1.6) u izraz (4.1.3) daje

$$z = r \times (\cos \varphi + i \sin \varphi) \quad (4.1.7)$$

Prikaz kompleksnog broja u obliku (4.1.7) nazivamo trigonometrijski oblik kompleksnog broja. r je modul kompleksnog broja z , i označava se kao $r = \text{mod}(z)$, a φ je argument kompleksnog broja z , i označavamo ga s $\varphi = \arg(z)$.

Za svaki kompleksni broj z argument φ ima beskonačno mnogo vrijednosti

$$\arg(z) = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) + 2 \times k \times \pi \quad (4.1.8)$$

gdje je $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Iz beskonačno mnogo vrijednosti $\arg(z)$ obično se izdvoji jedna koja se nalazi u intervalu

$$-\pi < \arg(z) \leq +\pi \quad (4.1.9)$$

ili

$$0 \leq \arg(z) < 2\pi \quad (4.1.10)$$

Pomoću Eulerovih formula

$$\begin{aligned} e^{i\varphi} &= \cos \varphi + i \sin \varphi \\ e^{-i\varphi} &= \cos \varphi - i \sin \varphi \end{aligned} \quad (4.1.11)$$

kompleksni broj z može se prikazati i u eksponencijalnom obliku

$$z = r \times e^{i\varphi}$$

Zbrajanje i oduzimanje kompleksnih brojeva u algebarskom obliku vrši se tako da se posebno zbroje realni dijelovi i posebno imaginarni dijelovi tih brojeva. Kompleksni brojevi u obliku vektora zbrajaju se i oduzimaju po pravilu zbrajanja i oduzimanja vektora.

Kompleksni brojevi zadani u algebarskom obliku množe se kao binomi pri čemu se uzima da je $i^2 = -1$. Za kompleksne brojeve prikazane u trigonometrijskom obliku, modul umnoška jednak je umnošku modula faktora

$$\text{mod}(z_1 \times z_2) = r_1 \times r_2 = \text{mod}(z_1) \times \text{mod}(z_2) \quad (4.1.12)$$

Argument umnoška jednak je zbroju argumenata faktora

$$\arg (z_1 \times z_2) = \varphi_1 + \varphi_2 = \arg (z_1) + \arg (z_2) \quad (4.1.13)$$

Količnik dva kompleksna broja $z_1 / z_2 = (x_1 + i y_1) / (x_2 + i y_2)$ određuje se tako da se brojnik i nazivnik pomnože s brojem koji je konjugiran s obzirom na nazivnik. Ako su kompleksni brojevi prikazani u trigonometrijskom obliku tada je

$$\operatorname{mod} \left(\frac{z_1}{z_2} \right) = \frac{r_1}{r_2} = \frac{\operatorname{mod} (z_1)}{\operatorname{mod} (z_2)} \quad (4.1.14)$$

i

$$\arg \left(\frac{z_1}{z_2} \right) = \varphi_1 - \varphi_2 = \arg (z_1) - \arg (z_2) \quad (4.1.15)$$

Kompleksni broj $z = x + i y$ može se prikazati i u matričnom obliku

$$z = \begin{vmatrix} x & y \\ -y & x \end{vmatrix} \quad (4.1.16)$$

Time je kompleksni broj pretvoren u realnu matricu drugog reda, a računanje s kompleksnim brojevima zamijenjeno je uobičajenim matričnim računom. Modul i argument kompleksnog broja mogu se odrediti iz realnog i imaginarnog dijela po izrazu

$$|z| = (x^2 + y^2)^{0.5} \quad (4.1.17)$$

Uz pretpostavku da je funkcija $\arctg$ definirana u rasponu od $-\pi/2$ do $+\pi/2$, $\arg (z)$ se odredi iz odgovarajuće formule u tablici 4.1.1.

Tablica 4.1.1 Argument kompleksnog broja

Vrijednosti x i y	$\arg (z)$ za upijanje topline	$\arg (z)$ za koeficijent prolaska topline
$y = 0$	0	0
$x > 0, y > 0$	$\arctg (y/x)$	$\arctg (y/x) - 2 \times \pi$
$x = 0, y > 0$	$\pi/2$	$-3 \times \pi/2$
$x < 0, y > 0$	$\arctg (y/x) + \pi$	$\arctg (y/x) - \pi$
$x > 0, y < 0$	$\arctg (y/x) + 2 \times \pi$	$\arctg (y/x)$
$x = 0, y < 0$	$3 \times \pi/2$	$-\pi/2$
$x < 0, y < 0$	$\arctg (y/x) + \pi$	$\arctg (y/x) - \pi$

Kod proračuna matrice prijenosa topline za pojedine građevne dijelove zgrade potrebno je provesti množenje matrica. Umnožak dviju matrica je matrica koja ima toliko redaka koliko ih ima prva matrica i toliko stupaca koliko ih ima druga matrica. Dvije matrice se množe tako da se svi elementi prvog retka prve matrice množe s pripadnim elementima prvog stupca druge matrice pa te umnoške zbrojimo i oni čine prvi element matrice umnoška. Na jednaki način postupa se i s prvim retkom prve matrice i drugim stupcem druge matrice i dobijemo drugi član prvog retka traženog umnoška. Na jednaki način množimo elemente drugog retka prve matrice s oba stupca druge matrice pa dobijemo prvi i drugi element drugog retka traženog umnoška. Umnožak dvije matrice općenito nije komutativan [$\mathbf{AB} \neq \mathbf{BA}$]. Za međusobno množenje više matrica vrijedi zakon asocijacije [$\mathbf{A(BC)} = (\mathbf{AB})\mathbf{C}$].

Kazalo pojmova

A

adsorpcija 200
aerogel 146
akumulacija topline 256
akumulirana dnevna temperaturna razlika 366
alternativni izvori energije 19
anorganski materijal 85
apsolutna temperatura 55
apsolutna vlažnost zraka 184
apsorpcija vode 200
apsorpcijski rashladni uređaj 495
atmosferski tlak 315

B

Bernoullijeva jednačica 318
bijelo tijelo 73
bilanca topline 349
biodizel 30
biokompozit 84
biomasa 30
bioplin 30
biopolimer 83
bitne značajke građevnog proizvoda 93
bituminozni pijesak 27
Boltzmanova konstanta 76
broj dana grijanja 366
broj izmjena zraka 301
brojčani pokazatelj rasvjetne energije 518
brzina vjetrova 319

C

celuloza 125
Celzijev stupanj 55
Celsijeva temperatura 56

centralni sustav klimatizacije 498
certifikacija 99
certifikat o stalnosti svojstava proizvoda 98
certifikat o sukladnosti tvorničke kontrole proizvodnje 98
cijevna obloga 89
cijevni razvod 445
COP 443
crno tijelo 73
crno zračilo 73
crpka ili pumpa 448

Č

čvrsta poliuretanska pjena 125
čvrstoća materijala 106
čvrstoća na savijanje 108
čvrstoća na vlak 107

D

daljinsko grijanje 451
debljina sloja zraka ekvivalentna difuziji vodene pare 203
decipol 291
desorpcija 200
desublimacija 60
difuzija vodene pare 109
difuzija vodene pare 202
dimovodni sustav 450
dinamička krutost 110
dinamički tlak 318
dinamičko stanje 254
direktiva 93
dnevna temperaturna razlika 366
dobro ventilirani sloj zraka 170

donja granica ukupnog toplinskog otpora 173, 175
donja ogrjevna vrijednost 19
drvena vlakna 126
drvena vuna 127
dugovalno zračenje 71
duljinski koeficijent prolaska topline 161
duroplast 83
dvocijevni razvod 437
dvodimenzionalni geometrijski model 225
dvostruki prozor 238, 240
džul 54

E

efekt staklenika 22
efekt staklenika 74
efektivna debljina 358
efektivna sunčana sabirna ploština 420
efektivni toplinski kapacitet 357
efikasnost 521
eko-materijal 84
eksfiltracija 314
ekspandirana glina 129
ekspandirani perlit 129
ekspandirani polistiren 130
ekspandirani vermikulit 132
ekspandirano pluto 133
ekstrudirani polistiren 134
ekstrudiranje 83
ekvivalentna debljina poda 389
elastomer 83
električna peć 434
električna rasvjeta 515
električni kalorifer 434
elektromagnetski valovi 70
emisivnost 78
energetska efikasnost 521
energetska karakteristika zgrade 523

energetska karakteristika zgrade definirana politikom 536
energetska karakteristika zgrade određena mjerenjem 527
energetska karakteristika zgrade određena proračunom 527
energetska učinkovitost 521
energetska učinkovitost zgrade 523
energetske rezerve 19
energetski resursi 19
energetski samodostatna kuća 46
energetsko svojstvo zgrade 523
energija 17
energija Sunčeva zračenja 30
energija vjetra 30
entalpija 61
europska tehnička ocjena 96
europski dokument za ocjenjivanje 96
eurorazredi 113

F

faktor iskorištenja toplinskih dobitaka za grijanje 355
faktor neobnovljive primarne energije 534
faktor otpora difuziji vodene pare 109
faktor otpora difuziji vodene pare 203
faktor prigušenja 280
faktor smanjenja za grijanje s prekidom 360
faktor temperature za površinu sa strane prostorije 189
faktor ukupne primarne energije 534
fazno promjenjivi materijali 156
fenolna pjena 135
filtar 502
fiziikalna atmoisfera 315
fosilna goriva 19
Fourierov zakon vođenja topline 64
frekvencija zračenja 71

G

Gay-Lussacov zakon 317
gel 146
geotermalna energija 28
gorenje 111
goriva 19
gornja granica ukupnog toplinskog otpora 173, 174
gornja ogrjevna vrijednost 19
graditeljstvo 81
građevina 81
građevinska vlaga 199
građevni dio zgrade 161
građevni materijal 82
granica sustava 526
granična vrijednost koncentracije onečišćujuće tvari 290
gravitacijsko grijanje 436
grijač 502
grijani podrum 398
grijani prostor 345
grijanje prostora 432
gusta struktura 85
gustoća energijskog toka zračenja 75
gustoća pohranjene energije 20
gustoća snage zračenja 75
gustoća toplinskog toka 65
gustoća tvari 102
GVIK sustav 509

H

hibridna ventilacija 308
hidrostatski tlak 315
higroskopna vlažnost 200
higroskopnost 199
hladnoća 54
hladnjak 502
hlađeni prostor 345

hlađenje 493
HVAC sustav 509

I

indukcijski uređaj 507
infiltracija 308, 314
infracrveno zračenje 71
isparavanje 60
isparavanje hlapljenjem 60
isparavanje vrenjem 60
isporučena energija 431
isporučena energija 526
ispusna slavina 506
istrujni otvori 506
izjava o svojstvima 99
izloženi opseg poda 389
izmjenjivač topline 488
izmjereni energetske pokazatelj 527
izolacijski materijal 85
izoterma 65
izoterma sorpcije 200
izvor zapaljenja 111
izvori energije 18
izvori topline 437

J

jednocjevni razvod 437
jednostrana ventilacija 476
jednostruki prozor 238, 239

K

kalandriranje 83
kalcijev silikat 135
kalorifer 449
kalorija 54
kaljeva peć 433
kamena vuna 139

kamin 433
kapilarno upijanje vode 202
karakteristična dimenzija poda 389
karakteristika energetske učinkovitosti 523
Kelvin 56
kemijsko onečišćenje zraka 287
keramički materijal 82
kinetička energija 21
kinetičko-molekularna teorija 53
Kirchoffov zakon 78
klasični izvori energije 19
klimatizacija 496
koeficijent difuzije vodene pare 204
koeficijent difuzijske vodljivosti 204
koeficijent emisije CO₂ 535
koeficijent izloženosti 336
koeficijent konvekcije 162
koeficijent prolaska topline 161
koeficijent rasterećenja 334
koeficijent strujanja 334
koeficijent tlaka vjetra 321
koeficijent toplinske veze 222
koeficijent unutarnjeg prijelaza topline 163
koeficijent vanjskog prijelaza topline 164
koeficijent zračenja 163
kogeneracija 444
kogeneracijski uređaj 445
kokos 136
kolektor Sunčevog zračenja 440
količina topline 57
komora za miješanje 490
kompaktna struktura 85
kompaktna toplinska stanica 452
kompaktni klima uređaj 501
kompozit 83
kompresijski rashladni uređaj 494
konačna energija 20

koncentracija 286
kondenzacija 186
kondenzacija 60
kondenzacijski kotao 438
kondenzat 186
kondicionirana površina 345
kondicionirani prostor 345
kondukcija 64
konoplja 137
konstrukcijski materijal 85
konvekcija 68
konvektor 449
korisna energija 20
kotao 438
kratkovalno zračenje 71
kritična vlažnost na površini građevnog dijela zgrade 186
krivulja parcijalnog tlaka vodene pare 206, 208
krivulja tlaka zasićene pare 206, 208
krovni klima uređaj 501
krutište 60
kuća nulte energije 44
kuća s viškom energije 45
kuhinjski štednjak 434
kvaliteta zraka 285

L

lagani agregat 89
lagani beton 142
lagani beton 89
lagani materijal za ispunu 89
lamelni izolacijski proizvod 88
lan 137
latentna toplina 59
LENI 517, 518
lijevanje 83
linijski toplinski most 221

lokalni sustav grijanja 433

ložište 439

M

masa sadržaja vlage po masi materijala 198

masa sadržaja vlage po obujmu materijala 198

masena koncentracija 286

masena vlažnost zraka 184

maseni protok 298

maseni udio 286

materija 81

materijal 81

materijal amorfne strukture 85

materijal kristalne strukture 85

materijal za oblaganje 85

materijal za toplinsku izolaciju 86

materijal za zvučnu izolaciju 86

materijal zasićen vodom 199

matrica prijenosa topline 273

mehanička ventilacija 307

metal 82

mineralna vuna 138

mokrina 183

N

nadtlak 315

nafta 27

naftonosni škrljevac 27

nagomilani oblici energije 21

nazivna vrijednost 94

negavat 18

negrijani podrum 400

nekodicionirani prostor 345

neobnovljivi izvori energije 19, 25

nepovratni ventil 506

nestacionarno stanje 254

neventilirani sloj zraka 169

niskoenergetska kuća 43

niskotemperaturni kotao 438

normirano stanje 316

nuklearna goriva 27

O

objavljena toplinska vrijednost 116

objavljena vrijednost 94

objavljeva vrijednost toplinske vodljivosti 103

obnovljivi izvori energije 19, 28

obujam sadržaja vlage po obujmu materijala 198

obujamska koncentracija 286

obujamska vlažnost zraka 184

obujamski protok 298

obujamski udio 286

ocjenjivanje sukladnosti 98

održiva gradnja 51

odsisni otvori 506

odvlaživanje zraka 492

ogrjevni medij 434

ogrjevno tijelo 448

okolišni tlak 315

olf 288

onečišćenje okoliša 22

operativna temperatura 345

organski materijal 85

osjetilna kvaliteta zraka 291

osjetilna toplota 59

osjetilno onečišćenje zraka 288

osvjetljenje 516

otpor unutarnjeg prijelaza topline 163

otpor vanjskog prijelaza topline 164

otpornost na požar 113

ovčja vuna 144

ovlaživač 503

ovlaživanje zraka 491

oznaka CE 100

ozračenost 72

P

pametni materijal 84

pamuk 140

parcijalni tlak vodene pare 185

parna brana 204

pasivna kuća 43

paskal 315

peć 433

peć na tekuća goriva 434

periodička dubina prodiranja 263

periodička dubina prodiranja 358, 402

periodički koeficijent prolaska topline 279

periodički koeficijent toplinske veze 270

periodički toplinski kapacitet 271

penasti porozni materijal 87

penasto staklo 141

penobeton 143

plamen 111

plamenik 439

Planckova formula 75

plastomer 83

plinska infracrvena grijalica 434

plinska peć 434

plošni koeficijent prolaska topline 161

plošni toplinski kapacitet 257

plošni toplinski kapacitet 281

pod na tlu 391

podni električni grijači 434

podstav tehničkog sustava zgrade 431

podtlak 315

pokazatelj ekološke kvalitete zgrade 41

pokazatelj energetske kvalitete zgrade 41

pokazatelj energetske učinkovitosti zgrade 523

polimer 83

pomak faze 261

pomoćna energija 453

ponašanje na požar 112

poprečna ventilacija 476

porasti beton 143

porobeton 142

porozitet 102

porozni materijal 86

postavna (unutarnja) temperatura 345

potencijalna energija 21

potrebna konačna energija 431

potrebna konačna energija za rad sustava za grijanje 452

potrebna konačna energija za rad sustava za hlađenje 496

potrebna korisna energija za grijanje 345

potrebna korisna energija za grijanje prostora 452

potrebna korisna energija za hlađenje 345

potrebna korisna energija za hlađenje 496

potrebna korisna energija za zagrijavanje potrošne tople vode 467

povratni toplinski gubitak sustava 431

površinski sustav grijanja 449

požar 111

požarna situacija 114

požarni scenarij 114

ppm 285

predgrijanje 490

predhlađenje 491

prenesena toplina transmisijom 354

prenesena toplina ventilacijom 355

prešanje 83

pretlak 315

prigušenje amplitude 261

prigušivač zvuka 507

prijavljeni ispitni laboratorij 98

prijavljeno tijelo za certificiranje proizvoda 98
 prijavljeno tijelo za certificiranje tvorničke kontrole proizvodnje 98
 prijelazni oblici energije 21
 prijenosnik energije 434
 prilagođena energetska karakteristika zgrade 527
 primarna energija 19
 priprema potrošne tople vode 465
 prirodna konvekcija 68
 prirodna ventilacija 307
 prirodni građevni materijal 84
 prirodni plin 27
 prisilna konvekcija 68
 prisilna ventilacija 307
 proizvod za toplinsku izolaciju 87
 projektna energetska karakteristika zgrade 527
 projektna toplinska vodljivost 121
 projektna vrijednost toplinske vodljivosti 103
 projektni faktor temperature za površinu sa strane prostorije 190
 projektni toplinski otpor 121
 proračunska zona 346
 prostorna proračunska granica zgrade 346
 protok zraka 298
 provjetravanje 308
 prozirni građevni dijelovi 237
 prozor krilo na krilo, 238, 242
 prozorski klima uređaj 501
 prozračivanje 308
 puzanje materijala 107

R

radijacija 70
 radijator 449
 radna temperatura 345

rashladnici vode (rashladni agregati) 495
 rasvjeta 515
 ravnina (razina) neutralnog tlaka 327
 ravnotežna vlažnost 200
 razbuktavanje 112
 razina 100
 razred 100
 razred zaklonjenosti zgrade 322
 razvodna mreža 452
 reakcija na požar 113
 referentna vrijednost 94
 reflektirajuća tankoslojna toplinska izolacija 155
 regeneratorski 503
 rekuperator 503
 relativna vlažnost zraka 184
 relativni tlak 315
 rosište 185
 rubna toplinska izolacija poda 392

S

SEER 514
 sekundarna energija 20
 sendvič panel 88
 sigurnosni ventil 506
 sintetska čvrsta pijena 83
 sirovina 81
 siva energija 48
 sivo tijelo 73
 slabo ventilirani sloj zraka 169
 slama 145
 sloj zraka 168
 snaga 17
 solarna stanica 440
 solarni medij 440
 solarni toplinski sustav 439
 sorpcija 200
 specifična entalpija 61

specifična toplina isparavanja 60
specifična toplina taljenja 60
specifični obujam 102
specifični toplinski kapacitet 57, 58
spektar elektromagnetskog zračenja 70
split (razdvojeni) sustav 502
spregnuti izolacijski panel 88
spremnici rashladne energije ili banke leda 495
spremnik tople vode 440
spremnik tople vode 466
srednja temperatura zračenja 345
stabilnost dimenzija 109
stacionarno stanje 254
staklena vuna 140
staklo 82
standardna energetska karakteristika zgrade 527
standardni energetski pokazatelj 527
standardni kotao 438
statičko stanje 254
Stefan-Boltzmanov zakon 76
strujanje topline 68
struktura s otvorenim porama 85
struktura sa zatvorenim porama 85
stupanj apsorpcije zračenja 72
stupanj djelovanja 522
stupanj emisije zračenja 78
stupanj povrata vlage 503
stupanj propustljivosti (transmisije) zračenja 72
stupanj refleksije zračenja 72
stupanj zasićenja vlagom 199
stupanj-dan grijanja 366
stupanj-dan metoda 365
sublimacija 60
sunčana (solarna) konstanta 31
Sunčevo zračenje 71

sustav centralnog grijanja 434
sustav djelomične klimatizacije 496
sustav grijanja 432
sustav grijanja s prisilnom cirkulacijom 436
sustav klimatizacije 496
sustav povrata topline 502
sustav prirodne ventilacije 473, 478
sustav prisilne odsisne ventilacije 473, 482
sustav prisilne odsisno-tlačne ventilacije 473, 482
sustav prisilne tlačne ventilacije 473, 481
sustav toplinske izolacije 89
sustav za pripremu potrošne tople vode 465
sustavi ocjenjivanja i provjere stalnosti proizvoda 97
svjetlosni tok 516
svjetlost 516
svojstva građevnog proizvoda 93

T

talište 60
taljenje 60
tehnički sustavi zgrade 431
temeljni zahtjevi za građevinu 81
temperatura 54, 55
temperatura dodira 265
temperatura rošenja 185
temperatura zapaljenja 111
temperaturna krivulja 179
temperaturni gradijent 57
Temperaturno polje 65
termodinamička temperatura 55
termodinamički proces 53
termodinamički sustav 53
termodinamika 53
termometri 57
termoplast 83

termotehnički sustavi 431
 Tiechelmannov razvod 437
 tijela za tehničko ocjenjivanje 96
 tinjanje 111
 tlačna čvrstoća 107
 tlak vjetra 320
 tlak zasićene vodene pare 185
 tlak zraka 315
 točkasti koeficijent prolaska topline 161
 točkasti toplinski most 221
 toplina 53
 toplina isparavanja 60
 toplina kondenzacije 60
 toplina skrućivanja 60
 toplina taljenja 60
 toplinska crpka (pumpa) ili dizalica topline 441
 toplinska difuzivnost 263
 toplinska inercija 260
 toplinska inercija apsorpcije 262
 toplinska inercija transmisije 261
 toplinska izolacija 85
 toplinska ovojnica zgrade 161
 toplinska podstanica 452
 toplinska prodornost 264
 toplinska svojstva 106
 toplinska tromost 260
 toplinska vodljivost 102
 toplinska vodljivost 64, 65,
 toplinska zona 346
 toplinski dobitci 420
 toplinski gubitak sustava 431
 toplinski kapacitet 256
 toplinski kapacitet 357
 toplinski kapacitet 59
 toplinski most 218
 toplinski otpor 106
 toplinski otpor 161
 toplinski otpor 65,
 toplinski tok 65
 toplinsko zračenje 71
 toplinsko-izolacijska blazina 88
 toplinsko-izolacijska opeka 89
 toplinsko-izolacijska ploča 88
 toplinsko-izolacijska žbuka 89
 toplinsko-izolacijski beton 89
 toplinsko-izolacijski materijal 85
 toplinsko-izolacijski proizvod 88
 toplinsko-izolacijski proizvod izrađen in situ 89
 toplovodno grijanje 436
 trajna vlaga 199
 trajnožareća (željezne) peć 433
 transparentna toplinska izolacija 150
 treset 26
 trigeneracijski sustav 445
 trodimenzionalni geometrijski model 224
 troputni elektromotorni ventil 506
 trstika 145
 tvar 81

U

učinkovitost 521
 učinkovitost ventilacije 297
 ugljen 26
 ukupni toplinski otpor 165
 ultraljubičasto zračenje 72
 uljna peć 434
 umjetni građevni materijal 85
 unutarinja energija 21
 unutarinja toplinska energija 54, 55
 unutarinji referentni tlak, irp 326
 upijanje topline 277
 upijanje vode 108
 upijanje vode 198
 uređaj za hlađenje 493

usklađena norma 95
usklađena tehnička specifikacija 95
ustaljeno stanje 254
utjelovljena energija 49
uzdignuti pod 395

V

vakuum 315
vakuumski izolacijski panel 148
valna duljina 70, 71
vanjska temperatura 345
vatra 111
ventilacija 307
ventilacija 473
ventilacija uslijed efekta dimnjaka 476
ventilator 488, 504
ventilokonvektori 506
veziva 85
vidljivi spektar zračenja 71
visina /duljina) hrapavosti 320
višeslojni izolacijski proizvod 88
vlaga 183
vlaknasti porozni materijal 86
vlažni zrak 184
vlažnost 183
vodne snage 29
vođenje topline 64
vraćena toplota 431
vraćeni toplinski gubitak sustava 431
vrela 60
vremenska konstanta 266
vremenska konstanta 359
vremenska proračunska granica zgrade 347
vremenski pomak 272
vrijeme pohrane 20

W

Wienov zakon 76

Z

zapaljivost 111
zaporni ventil 506
zaustavni tlak 318
zbijena struktura 85
zgrada kod koje onečišćenje nije malo 295
zgrada s gotovo (skoro) nultom
potrošnjom energije 46
zgrada s malim onečišćenjem 294
zgrada s vrlo malim onečišćenjem 294
zgrada, tijelo zgrade 81
znanost o toplini 53
zona boravka 296
zračeći panel 449
zračenje topline 70
zračna šupljina 171
zračni prostor 170
zračni sustav 498
zračno-vodni sustav 501
zrnasti porozni materijal 86
zvuko-izolacijski materijal 86

Ž

žarno gorenje 111

Literatura

- [1] Jakobović, Z., Leksikon mjernih jedinica, Školska knjiga, Zagreb, 1981.
- [2] Zakon o mjeriteljstvu, NN br. 74/14.
- [3] Pravilnik o mjernim jedinicama, NN br. 88/15.
- [4] négaWat, <http://fr.wikipedia.org/wiki/N%C3%A9gaWatt>, 21.08.2013.
- [5] Labudović, B., Obnovljivi izvori energije, Energetika marketing, Zagreb, 2002.
- [6] Udovičić, B., Energetika, Školska knjiga, Zagreb, 1993.
- [7] Mesarović, M., Pestel, E., Čovječanstvo na raskršću, Drugi izvještaj Rimskog kluba, Stvarnost, Zagreb, 1974.
- [8] Meadows, H., D., Meadows, L., D., Randers, J., Behrens III, W., W., Granice rasta, Izvještaj istraživačke skupine..., Stvarnost, Zagreb, 1972.
- [9] Višković, A., Energija i međunarodni transfer tehnologije, Energetika marketing, Zagreb, 2002.
- [10] Ressources et consommation énergétiques mondiales, http://fr.wikipedia.org/wiki/Ressources_et_consommation_%C3%A9nerg%C3%A9tiques_mondiales, 09.03.2014.
- [11] Commission European, Energy 2020, Strategy for competitive, sustainable and Secure energy, eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=URISERV:en0024, 27.03.2014.
- [12] Commission European, Energy efficiency plan 2011, eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=URISERV:en0029, 27.03.2014.
- [13] Consommation d'énergie, http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Consumption_of_energy/fr, 09.03.2014.
- [14] La consommation d'énergie en baisse de 8% entre 2006 et 2012 dans l'UE28, ec.europa.eu/eurostat/documents/2995521/5173946/8-17022014-AP-FR.PDF/6289406a-bde7-4598-befc-412308c23912?version=1, 16.04.2014.
- [15] Godišnji energetske pregled, Energija u Hrvatskoj 2012, Ministarstvo gospodarstva, [www.mingo.hr/userdocsimages/energetika/Energija2012_web\(1\).pdf](http://www.mingo.hr/userdocsimages/energetika/Energija2012_web(1).pdf), 12.04.2014.
- [16] Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast), Official Journal of the European Union L 153/13-35.
- [17] Brezinščak, M., Mjerenje i računanje u tehnici i znanosti, Tehnička knjiga, Zagreb, 1971.
- [18] Buss, H., Das Tabellenhandbuch zum Wärme- und Feuchteschutz, Formeln, Tabellen und Erläuterungen unter Berücksichtigung der neuen EnEv, WEKA Baufachverlage, Kissing, 2002.
- [19] Rougeron, C., L'isolation acoustique et thermique dans le bâtiment, éditions Eyrolles, Paris, 1975.
- [20] Šimetin, V., Toplinski mostovi u zgradarstvu – proračun konačnim elementima, Magistarski rad, Zagreb, 1979.
- [21] Kessel, M., H., Bauphysik, TU Braunschweig, www.ibholtz.tu-bs.de/dat/Lehre/Bauphysik_SS2015.pdf, 14.07.2015.

- [22] Šimetin, V., Građevinska fizika, Fakultet građevinskih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 1983.
- [23] Stein, J., A., Physik für Bauingenieure: Grundlagen und Anwendungen, Band 2. Wärme und Feuchte, AVH Verlag Hamburg, 1997.
- [24] E., Gratia, LAUCE 1901 (Physique appliquée au bâtiment I: thermique..., <http://www-energie2.arch.ucl.ac.be/right.htm>
- [25] Lutz, P., Jenisch, R., Klopfer H., Freymuth, H., Krampf, L., Lehrbuch der Bauphysik, B.G. Teubner, Stuttgart, 1985.
- [26] P., Kulišić, Mehanika i toplina – udžbenik fizike, Školska knjiga, Zagreb, 2005.
- [27] Regulation (EU) No 305/ of the European Parliament and of the Council of 9 March 2011 laying down harmonised conditions for the marketing of construction products and repealing Council Direktive 89/106/EEC, OJ L 88/5-43.
- [28] Arndt, H., Wärme- und Feuchteschutz in der Praxis, Verlag für Bauwesen, Berlin, 1996.
- [29] Reyer, E., Schild, K., Völkner, S., B2 Wärmedämmstoffe und –systeme, Bauphysik Kalender 2003, Ernst&Sohn, Berlin, str. 161-241.
- [30] Mötzl, H., Zelger, T., Ökologie der Dämmstoffe, Springer Wien New York, 2000.
- [31] HRN EN 13162:2015 Toplinsko-izolacijski proizvodi za zgrade – Tvornički izrađeni proizvodi od mineralne vune (MW) – Specifikacija (EN 13162:2012).
- [32] HRN EN 13163:2015 Toplinsko-izolacijski proizvodi za zgrade – Tvornički izrađeni proizvodi od ekspaniranog polistirena (EPS) – Specifikacija (EN 13163:2012).
- [33] HRN EN 13164:2015 Toplinsko-izolacijski proizvodi za zgrade – Tvornički izrađeni proizvodi od ekstrudirane polistirenske pjene (XPS) – Specifikacija (EN 13164:2012).
- [34] HRN EN 13165:2015 Toplinsko-izolacijski proizvodi za zgrade – Tvornički izrađeni proizvodi od tvrde poliuretanske pjene (PUR) – Specifikacija (EN 13165:2012).
- [35] HRN EN 13166:2015 Toplinsko-izolacijski proizvodi za zgrade – Tvornički izrađeni proizvodi od fenolne pjene (PF) – Specifikacija (EN 13166:2012).
- [36] HRN EN 13167:2015 Toplinsko-izolacijski proizvodi za zgrade – Tvornički izrađeni proizvodi od čelijastog (pjenastog) stakla (CG) – Specifikacija (EN 13167:2012).
- [37] HRN EN 13168:2015 Toplinsko-izolacijski proizvodi za zgrade – Tvornički izrađeni proizvodi od drvene vune (WW) – Specifikacija (EN 13168:2012).
- [38] HRN EN 13169:2015 Toplinsko-izolacijski proizvodi za zgrade – Tvornički izrađeni proizvodi od ekspaniranog perlita (EPB) – Specifikacija (EN 13169:2012).
- [39] HRN EN 13170:2015 Toplinsko-izolacijski proizvodi za zgrade – Tvornički izrađeni proizvodi od ekspaniranog pluta (ICB) – Specifikacija (EN 13170:2012).
- [40] HRN EN 13171:2015 Toplinsko-izolacijski proizvodi za zgrade – Tvornički izrađeni proizvodi od drvenih vlakana (WF) – Specifikacija (EN 13171:2012).
- [41] Council Directive 89/106/EEC of the 21 December 1988 on the approximation of laws, regulations and administrative provisions of the Member States relating to construction products, OJ L 40/12-26.
- [42] Enterprise europe network, Le marquage CE des produits de construction, Règlement 305/2011/VE, www.lyon.cci.fr/upload/docs/application/pdf/2015-05/guide.marquage_ce_produits_de_construction.pdf, 12.06.2015.
- [43] EN ISO HRN 13943:2010 Zaštita od požara – Terminološki rječnik (ISO 13943:2008, EN ISO 13943:2010).

- [44] HRN EN 13501-1:2010 Razredba građevnih proizvoda i građevnih elemenata prema ponašanju u požaru – 1. dio: Razredba prema rezultatima ispitivanja reakcije na požar (EN 13501-1:2007 + A1:2009).
- [45] Commission Decision 96/603/EC of 4 October 1996 establishing the list of products belonging to Classes A „No contribution to fire“ provided for in Decision 94/611/EC implementing Article 20 of Council Directive 81/106/EEC on construction products, OJ L 267/p.23 (Amended by Commission Decision 2000/605/EC of 26 September 2000, L 256 and Commission Decision 2003/424/EC of 6 June 2003, L 144).
- [46] HRN EN ISO 11925-2:2011 Ispitivanje reakcije na požar – Zapaljivost proizvoda izloženih izravnom djelovanju plamena – 2. dio: Ispitivanje pojedinačnim izvorom plamena (ISO 11925-2:2010+Cor 1:2011; EN ISO 11925-2:2010+AC:2011).
- [47] HRN EN 13823:2010 Ispitivanje reakcije na požar građevnih proizvoda – Građevni proizvodi, osim podnih obloga, izloženi termičkom opterećenju pojedinačno gorućeg elementa (SBI) (EN 13823:2010).
- [48] HRN EN ISO 1182:2010 Ispitivanje reakcije na požar proizvoda – Ispitivanje negorivosti (ISO 1182:2010; EN ISO 1182:2010).
- [49] HRN EN ISO 1716:2011 Ispitivanje reakcije na požar proizvoda – Određivanje bruto toplinskog potencijala (kalorična vrijednost) (ISO 1716:2010; EN ISO 1716:2010).
- [50] ISO 9705:1993 Fire tests – Full-scale room test for surface products.
- [51] Hognon B., Situation des revêtements en bois massifs dans le système des Euroclasses de réaction au feu, Cahiers du CSTB, Cahier n° 3372, Livraison 423, Octobre 2001.
- [52] HRN ISO 8302:1998 Toplinska izolacija – Mjerenje toplinskog otpora i srodnih veličina u ustaljenom stanju – Pločasti uređaj sa zaštićenom vrućom pločom (ISO 8302:1991).
- [53] HRN ISO 8301:1998 Toplinska izolacija – Mjerenje toplinskog otpora i srodnih veličina u ustaljenom stanju – Tokomjerni uređaj (ISO 8301:1991).
- [54] HRN EN ISO 8990:1998 Toplinska izolacija – Ispitivanje toplinskih svojstava koja opisuju prijenos topline u ustaljenom stanju – Umjerena i zaštićena vruća komora (ISO 8990: 1994, EN ISO 8990:1996).
- [55] HRN EN 12667:2002 Toplinske značajke građevnih materijala i proizvoda – Određivanje toplinskog otpora metodom sa zaštićenom vrućom pločom i tokomjernom metodom – Proizvodi s visokim i srednjim toplinskim otporom (EN12667:2001).
- [56] HRN EN 12939:2002 Toplinske značajke građevnih materijala i proizvoda – Određivanje toplinskog otpora metodom sa zaštićenom vrućom pločom i tokomjernom metodom – Proizvodi veće debljine s visokim i srednjim toplinskim otporom (EN12939:2001).
- [57] HRN EN ISO 10456:2008 Građevni materijali i proizvodi – Svojstva s obzirom na toplinu i vlagu – Tablične projektne vrijednosti i postupci određivanja nazivnih i projektnih toplinskih vrijednosti (ISO 10456:2007, EN ISO 10456:2007).
- [58] Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (Narodne novine broj 97/14, 130/14).
- [59] Kleinhempel, A., K., Innovative Dämmstoffe im Bauwesen, Bremer Energie Institut, Bremen, 2005.
- [60] Achtziger, J., Zehendner, H., B1 Wärmedämmstoffe, Bauphysik Kalender 2001, Ernst&Sohn, Berlin, str. 187-222.
- [61] Reyer, E., Schild, K., Völkner, S., Kompendium der Dämmstoffe, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2002.

- [62] Aérogel, <http://fr.wikipedia.org/wiki/Aérogel>, 29.07.2014.
- [63] TU Dortmund, Vakuumdämmung, <http://www.vakuumdaemmung.de/>, 11.09.2014.
- [64] Transparente Wärmmedämmung, Informationsmappe 2, www.umwelt-wand.de/twd/service/infos/info2.pdf, 12.06.2014.
- [65] Isolants minces réfléchissants: L'avis du G20 du CSTB, www.maisonbrico.com/magazine-bricolage/maison-citoyenne/isolants-minces-reflechissants-l-avis-g20-cstb.1924.html, 27.08.2014.
- [66] HRN EN ISO 6946:2008 Građevni dijelovi i građevni dijelovi zgrade – Toplinski otpor i koeficijent prolaska topline – Metoda proračuna (ISO 6946:2007; EN ISO 6946:2007).
- [67] HRN EN ISO 13788:2013 Značajke građevnih dijelova i građevnih dijelova zgrade s obzirom na toplinu i vlagu – Temperatura unutarnje površine kojom se izbjegava kritična vlažnost površine i unutarnja kondenzacija – Metode proračuna (ISO 13788:2012; EN ISO 13788:2012)
- [68] ISO 7730:2005 Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.
- [69] Kreč, K., Das Leitwert-Konzept, Büro für Bauphysik, Schönberg am Kamp, 2007., help.antherm.at/Theory/2007_Das_Leitwert_Konzept.pdf, 10.09. 2015.
- [70] HRN EN ISO 10211:2008 Toplinski mostovi u zgradarstvu – Toplinski tokovi i površinske temperature – Detaljni proračuni (ISO 10211:2007; EN ISO 10211:2007).
- [71] HRN EN ISO 14683:2008 Toplinski mostovi u zgradarstvu – Linearni koeficijent prolaska topline – Pojednostavnjene metode i zadane utvrđene vrijednosti (ISO 14683:2007; EN ISO 14683:2007).
- [72] HRN EN ISO 10077-1:2008 Toplinska svojstva prozora, vrata i zaslona – Proračun koeficijenta prolaska topline – 1. dio: Općenito (ISO 10077-1:2006; EN ISO 10077-1:2006).
- [73] HRN EN ISO 10077-2:2012 Toplinska svojstva prozora, vrata i zaslona – Proračun koeficijenta prolaska topline – 2. dio: Numerička metoda za okvire (ISO 10077-2:2012; EN ISO 10077-2:2012).
- [74] HRN EN ISO 12567-1:2011 Toplinske značajke prozora, vrata i zaslona – Određivanje koeficijenta prolaska topline metodom vruće komore – 1. dio: Prozori i vrata u cjelini (EN 12567-1:2010; EN ISO 12567-1:2010).
- [75] HRN EN ISO 12567-2:2008 Toplinske značajke prozora, vrata i zaslona – Određivanje koeficijenta prolaska topline metodom vruće komore – 2. dio: Krovni prozori i drugi istureni prozori (EN 12567-2:2005; EN ISO 12567-1:2005).
- [76] HRN EN 12412-2:2004 Toplinske značajke prozora, vrata i zaslona – Određivanje koeficijenta prolaska topline metodom vruće komore – 2. dio: Okviri (EN 12412-2:2003).
- [77] HRN EN 673:2011 Staklo u graditeljstvu – Određivanje koeficijenta prolaska topline (U-vrijednost) – Proračunska metoda (EN 673:2011).
- [78] HRN EN 674:2012 Staklo u graditeljstvu – Određivanje koeficijenta prolaska topline (U-vrijednost) – Metoda sa zaštićenom vrućom pločom (EN 674:2011).
- [79] Bruyère, A., L'inertie thermique dans le bâtiment, archi.climatic.free.fr/inertie.html, 03.05.2015.
- [80] HRN EN ISO 13786:2008 Toplinske značajke građevnih dijelova zgrade – Dinamičke toplinske značajke – Metode proračuna (EN 13786:2007; EN ISO 13786:2007).

- [81] Kreč, K., Zur Definition der wirksamen Wärmespeicherkapazität, Büro für Bauphysik, Schönberg am Kamp, 2007.,
help.antherm.at/antherm/Help/Content_DE/Theory/2007_Zur_Definition_der_wirksam
en_Waermespeicherkapazitaet.pdf, 10.09.2015.
- [82] Kreč, K., Die wirksame Wärmespeicherkapazität, Büro für Bauphysik, Schönberg am
Kamp, 2007.,
help.antherm.at/antherm/Help/Content_DE/Theory/2007_Die_wirksame_Waermespei
cherkapazitaet.pdf, 10.09.2015.
- [83] Kreč, K., Wärmeleitung und Wärmespeicherung in plattenförmigen Bauteilen, Büro für
Bauphysik, Schönberg am Kamp, 2007.,
help.antherm.at/Theory/2007_Waermeleitung_und_Waermespeicherung_in_plattenfo
ermigen_Bauteilen, 10.09.2015.
- [84] HRN CR 1752:2004 Ventilacija u zgradama – Projektni kriteriji za unutrašnjost (CR
1752:1998).
- [85] Vlada RH, Uredba (br. 2467) o graničnim vrijednostima onečišćujućih tvari u zraku,
NN br. 133/05.
- [86] HRN EN 15251:2008 Ulazni mikroklimatski parametri za projektiranje i ocjenjivanje
energijskih značajka zgrada koji se odnose na kvalitetu zraka, toplinsku lagodnost,
osvjetljenje i akustiku (EN 15251:2007).
- [87] HRN EN 13779:2008 Ventilacija u nestambenim zgradama – Zahtjevi za sustave
ventilacije i klimatizacije (EN 13779:2007).
- [88] HRN EN 15242:2008 Ventilacija u zgradama – Metode proračuna za određivanje
protoka zraka u zgradama uključujući infiltraciju (EN 15242:2007).
- [89] Boivin, H., La ventilation naturelle, Faculté d'aménagement, architecture et arts
visuels Université Laval, Québec, 2007.
- [90] HRN EN 12831:2004 Sustavi grijanja u građevinama – Postupak proračuna
normiranog toplinskog opterećenja (EN 12831:2003).
- [91] EN 14239:2004 Ventilation for buildings – Ductwork – Measuremet of ductwork
surface area.
- [92] HRN EN 12237:2004 Ventilacija u zgradama – Kanali – Čvrstoća i propuštanje
okruglih limenih kanala (EN 12237:2003).
- [93] HRN EN 1507:2008 Ventilacija u zgradama – Metalni kanali i spojni dijelovi
pravokutnog presjeka za razdiobu zraka – Zahtjevi za čvrstoću i propusnost (EN
1507:2006).
- [94] HRN EN 1886:2008 Ventilacija u zgradama – Centralne jedinice za pripremu zraka –
Tehničke značajke (EN 1886:2007).
- [95] Delmotte, C., Calcul des différences de pression d'air sur les bâtiments appliqué aux
domaines de la ventilation et de l'infiltration d'air, Centre scientifique et technique de
la construction, 9 juillet 2015.
- [96] HRN EN 13829:2002 Toplinske značajke zgrada – Određivanje propusnosti zraka kod
zgrada – Metoda razlike tlakova (ISO 9972:1996 preinačena; EN 13829:2000).
- [97] Trouillet, P., L' étanchéité à l' air dans le bâtiment, Ecole Nationale Supérieure
d'Architecture de Lyon, 2008.
- [98] HRN EN 13465:2004 Ventilacija u zgradama – Postupci proračuna za određivanje
provjetravanja u stambenim zgradama (EN 13465886:2004).

- [99] TAREB, Ventilation Naturelle, <https://www.habiter-autrement.org/12.energies/contributions-12/Ventilation-naturelle-analyse-solutions.pdf>
- [100] HRN EN ISO 13790:2008 Energijska svojstva zgrada – Proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora (ISO 13790:2008; EN ISO 13790:2008).
- [101] HRN EN ISO 13789:2008 Toplinske značajke zgrada – Koeficijenti prijelaza topline transmisijom i ventilacijom – Metoda proračuna (ISO 13789:2007; EN ISO 13789:2007).
- [102] DIN V 18599-1:Februar 2007 Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Trinkwasser und Beleuchtung – Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger.
- [103] HRN EN ISO 13370:2008 Toplinske značajke zgrada – Prijenos topline preko tla – Metode proračuna (ISO 13370:2007; EN ISO:2007).
- [104] Dahlem, K., H., Wärmeübertragung erdreichberührter Bauteile, Bauphysik Kalender 2003, Ernst&Sohn, Berlin, str. 275-315.
- [105] HRN EN 410:2011 Staklo u graditeljstvu – Određivanje svjetlosnih i sunčanih značajka ostakljenja (EN 410:2011).
- [106] HRN EN 13363-2:2008 Naprave za zaštitu od sunca u kombinaciji s ostakljenjem – Proračun ukupnog propuštanja sunčeve energije i propuštanja svjetlosti – 2. dio: Detaljna metoda proračuna (EN 13363-2:2005+AC:2006).
- [107] Algoritam za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 13790, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, ožujak 2014, www.mgipu.hr/doc/EnergetskaUcinkovitost//Algoritam-HRN-EN-ISO_13790.pdf, 10.04.2016.
- [108] DIN V 18599-2:Februar 2007 Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Trinkwasser und Beleuchtung – Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen.
- [109] Labudović, B., Priručnik za grijanje, Energetika marketing, Zagreb, 2005.
- [110] Krauss, G., Bâtiment et Énergie: Chauffage, INSA Lyon, 2007-2008.
- [111] Budin, R., Mihelić-Bogdanić, A., Osnove tehničke termodinamike, Školska knjiga, Zagreb, 2012.
- [112] HRN EN 15316-1:2008 Sustavi grijanja u zgradama – Metoda proračuna energijskih zahtjeva i učinkovitosti sustava, 1. dio: Općenito (EN 15316-1:2007).
- [113] HRN EN 15316-2-1:2008 Sustavi grijanja u zgradama – Metoda proračuna energijskih zahtjeva i učinkovitosti sustava, dio 2-1: Sustavi za grijanje prostora zračenjem topline (EN 15316-2-1:2007).
- [114] HRN EN 15316-2-3:2008 Sustavi grijanja u zgradama – Metoda proračuna energijskih zahtjeva i učinkovitosti sustava, dio 2-3: Razvodi sustavi grijanja prostora (EN 15316-2-3:2007).
- [115] HRN EN 15316-3-1:2008 Sustavi grijanja u zgradama – Metoda proračuna energijskih zahtjeva i učinkovitosti sustava, dio 3-1: Sustavi za pripremu potrošne tople vode, pokazatelji potreba prema izljevnom mjestu (EN 15316-3-1:2007).
- [116] HRN EN 15316-3-2:2008 Sustavi grijanja u zgradama – Metoda proračuna energijskih zahtjeva i učinkovitosti sustava, dio 3-2: Sustavi za pripremu potrošne tople vode, razvod (EN 15316-3-2:2007).

- [117] HRN EN 15316-3-3:2008 Sustavi grijanja u zgradama – Metoda proračuna energijskih zahtjeva i učinkovitosti sustava, dio 3-3: Sustavi za pripremu potrošne tople vode, zagrijavanje (EN 15316-3-3:2007).
- [118] HRN EN 15316-4-1:2008 Sustavi grijanja u zgradama – Metoda proračuna energijskih zahtjeva i učinkovitosti sustava, dio 4-1: Sustavi za proizvodnju topline izgaranjem (kotlovi) (EN 15316-4-1:2008).
- [119] HRN EN 15316-4-2:2008 Sustavi grijanja u zgradama – Metoda proračuna energijskih zahtjeva i učinkovitosti sustava, dio 4-2: Sustavi za proizvodnju topline, sustavi dizalica topline (EN 15316-4-2:2008).
- [120] HRN EN 15316-4-3:2008 Sustavi grijanja u zgradama – Metoda proračuna energijskih zahtjeva i učinkovitosti sustava, dio 4-3: Sustavi za proizvodnju topline, toplinski sustavi sunčevog zračenja (EN 15316-4-3:2008).
- [121] HRN EN 15316-4-4:2008 Sustavi grijanja u zgradama – Metoda proračuna energijskih zahtjeva i učinkovitosti sustava, dio 4-4: Sustavi za proizvodnju topline, sustavi kogeneracije uklopljeni u zgradu (EN 15316-4-4:2007).
- [122] HRN EN 15316-4-5:2008 Sustavi grijanja u zgradama – Metoda proračuna energijskih zahtjeva i učinkovitosti sustava, dio 4-5: Sustavi za proizvodnju topline za grijanje prostora, pokazatelji i kvaliteta daljinskog grijanja i sustava velikih volumena (EN 15316-4-5:2007).
- [123] HRN EN 15316-4-6:2008 Sustavi grijanja u zgradama – Metoda proračuna energijskih zahtjeva i učinkovitosti sustava, dio 4-6: Sustavi za proizvodnju topline, fotonaponski sustavi (EN 15316-4-6:2007).
- [124] HRN EN 15316-4-7:2009 Sustavi grijanja u zgradama – Metoda proračuna energijskih zahtjeva i učinkovitosti sustava, dio 4-7: Sustavi za proizvodnju topline izgaranjem biomase (EN 15316-4-7:2008).
- [125] HRN EN 15316-4-8:2012 Sustavi grijanja u zgradama – Metoda proračuna energijskih zahtjeva i učinkovitosti sustava, dio 4-7: Sustavi za proizvodnju topline, sustavi toplozračnog grijanja i sustavi grijanja zračenjem odozgo (EN 15316-4-8:2011).
- [126] Simon, F., Gauglustaine, J-M., La ventilatin et l'énergie – Guide pratique pour les architectes; energie-wallonie.be/servlet/Repository/ventilation_acro4.pdf?ID=3501, 24.11.2014.
- [127] HRN EN 15243:2008 Ventilacija u zgradama – Proračun temperatura, opterećenja i energije u prostorijama zgrada sa sustavima klimatizacije prostora (EN 15243:2007).
- [128] HRN EN 15241:2008 Ventilacija u zgradama – Metode proračuna energijskih gubitaka zbog ventilacije i infiltracije u poslovnim zgradama (EN 15241:2007).
- [129] Labudović, B., Priručnik za ventilaciju i klimatizaciju, 2. izdanje, Energetika marketing, Zagreb, 2003.
- [130] Pavković, B., Zanki, V., Priručnik za energetske certificiranje zgrada, UNDP, Zagreb, 2010.
- [131] HRN EN 15193:2008 Energijska svojstva zgrade – Energijski zahtjevi za rasvjetu (EN 15193:2007).
- [132] HRN EN 12464-1:2012, Svjetlo i rasvjeta – Rasvjeta radnih mjesta – 1.dio: Unutrašnji radni prostori (EN 12464-1:2011).
- [133] HRN EN 12193:2008, Svjetlo i rasvjeta – Rasvjeta sportskih objekata (EN 12193:2007).

- [134] HRN EN 15603:2008, Energy performance of buildings – Overall energy use and definition of energy ratings (EN 15603:2008).
- [135] HRN EN 15217:2008 Energijska svojstva zgrada – Metode za izražavanje energijskog svojstva zgrada i za certifikaciju zgrada s obzirom na energiju (EN 15217:2007).
- [136] HRN CEN/TR 15615:2009, Explanation of the general relationship between various European standards and the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) – Umbrella document (CEN/TR 15615:2008).
- [137] <http://www.greenbuildingadvisor.com/sites/default/files/images/cellulose-H160GI2EF7.jpg>, 01.11.2016.
- [138] <http://www.scgh.com/wp-content/uploads/Stack-of-cellulose-insulation-batt-panels-made-of-recycled-newspapers-used-as-building-thermal-insulation-copyright-Stocksnapper.jpg>, 01.11.2016.
- [139] http://www.coolearth.ca/wp-content/uploads/2016/02/126_WmeoxDAc.jpg, 01.11.2016.
- [140] http://img.archiexpo.com/images_ae/photo-g/103544-5270363.jpg, 01.11.2016.
- [141] <http://www.hapriinsulation.ae/images/pir-insulationpageimg.jpg>, 01.11.2016.
- [142] http://img.archiexpo.com/images_ae/photo-g/103544-5277167.jpg, 01.11.2016.
- [143] http://www.adream2012.eu/sites/default/files/styles/large/public/material/12_d1_0.jpg, 01.11.2016.
- [144] <http://www.jetsongreen.com/wp-content/uploads/2012/12/Agapan-THD-Wood-Fiber-Sheathing-TG.jpg>, 01.11.2016.
- [145] https://smallfarmfuture.files.wordpress.com/2013/05/img_2351.jpg, 01.11.2016.
- [146] https://stavbaweb.dumabyt.cz/files/files/2013_11/heraklith/Heraklith-C.jpg, 01.11.2016.
- [147] http://img.archiexpo.com/images_ae/photo-g/78130-10249251.jpg, 01.11.2016.
- [148] <http://www.krivajahomes.com/media/52668/sandwich.jpg>, 01.11.2016.
- [149] http://profilbaucentar.hr/wp-content/uploads/2016/01/kombi-izolacijske-ploce_thumbnail.png, 01.11.2016.
- [150] <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f5/Hydroton.jpg>, 01.11.2016.
- [151] http://img.archiexpo.com/images_ae/photo-g/82422-8152368.jpg, 01.11.2016.
- [152] https://cdn.stylepark.com/manufacturers/liapor/produkte/leichtbeton-haufwerksporig/_930x620_crop_center-center_90/leichtbeton-haufwerksporig-1.jpg, 01.11.2016.
- [153] <https://d12m281ylf13f0.cloudfront.net/images10/perlite.jpg>, 01.11.2016.
- [154] <http://dopcreator.com/wp-content/uploads/2016/03/dopcreator-expanded-perlite.jpg?40e762>, 01.11.2016.
- [155] <http://www.nbpco.ir/wp-content/uploads/2014/06/eps-beads.jpg>, 01.11.2016.
- [156] <http://previews.123rf.com/images/vlue/vlue1102/vlue110200013/8750397-A-closeup-macro-texture-of-white-extruded-polystyrene-foam-Stock-Photo.jpg>, 01.11.2016.
- [157] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6c/Sto_-_Insulation_boards_5.jpg, 01.11.2016.
- [158] https://c2.staticflickr.com/4/3924/14800339753_e6690093e3_b.jpg, 01.11.2016.

- [159] http://img.archiexpo.com/images_ae/photo-g/59573-7825447.jpg, 01.11.2016.
- [160] [http://www.archello.com/sites/default/files/imagecache/media_image/story/media/ONA145-\(9\).jpg](http://www.archello.com/sites/default/files/imagecache/media_image/story/media/ONA145-(9).jpg), 01.11.2016.
- [161] [http://www.archello.com/sites/default/files/story/media/ONA145-\(1\).jpg](http://www.archello.com/sites/default/files/story/media/ONA145-(1).jpg), 01.11.2016.
- [162] http://www.greenbuildingadvisor.com/sites/default/files/ICB_boards_MedRes.jpg, 01.11.2016.
- [163] http://img.archiexpo.com/images_ae/photo-g/103544-8329236.jpg, 01.11.2016.
- [164] <http://www.th.all.biz/img/th/catalog/36673.jpegv>, 01.11.2016.
- [165] http://www.decorativeinsulationboard.com/photo/pl8306048-indoor_outdoor_phenolic_foam_insulation_board_20mm_100mm_wall_insulating_panels.jpg, 01.11.2016.
- [166] http://web.tradekorea.com/upload_file2/product/954/P00287954/cbe9caa5_cdef5652_0aad_4976_ad3c_b1807aedc70b.jpg, 01.11.2016.
- [167] http://az668117.vo.msecnd.net/~media/images/promat/countries/see/repository-content/products/boards/promatecth_600_3.ashx?la=en&mw=580&rev=456abb8162bd46d38a1022e4087b4b00, 01.11.2016.
- [168] http://gjsexim.com/images/Product/gallery/coconut_fiber_slider/1.jpeg, 08.11.2016.
- [169] <http://coirplus.com/wp-content/uploads/2015/07/Coir-Fibre-Bales.jpg>, 08.11.2016.
- [170] https://media.licdn.com/mpr/mpr/shrinknp_800_800/AEEAAQAAAAAAAAAaDAAA JGM3YmQwOThhLTY1NmMtNDJiYy04ODNiLWZiMjE3YWM0NDE4OQ.jpg, 08.11.2016.
- [171] http://img.archiexpo.com/images_ae/photo-g/71883-7464779.jpg, 08.11.2016.
- [172] <http://www.pacepdh.com/blog/images/hempcrete.jpg>, 08.11.2016.
- [173] <https://www.eco-logisch.nl/images/vlas4.jpg>, 08.11.2016.
- [174] http://www.gamletrehus.no/UserFiles/Image/Isolering_i_gamle_hus//Linisolasjon_drev_rull.jpg, 08.11.2016.
- [175] http://www.woltz.de/images/projectplanning/rockwool/020804%20004_1.jpg, 08.11.2016.
- [176] www.knaufinsulation.rs, 08.11.2016.
- [177] <https://stormsreback.files.wordpress.com/2009/01/cotton.jpg>, 08.11.2016.
- [178] <http://24ayarmag.ir/wp-content/uploads/2016/04/%D8%B9%D8%A7%D9%8A%D9%82-%D9%87%D8%A7%D9%8A-%D9%81%D9%88%D9%85-%D8%B4%D9%8A%D8%B4%D9%874.jpg>, 08.11.2016.
- [179] <http://data.brightgreen.fi/files/Foamit.jpg>, 08.11.2016.
- [180] <https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/originals/1f/81/00/1f81002f798688410c5ca3dd6a8be1cd.jpg>, 08.11.2016.
- [181] <http://www.understanding-cement.com/images/aircretedetail.jpg>, 08.11.2016.
- [182] http://do8ae71anmf4y.cloudfront.net/89/29/i66595209._szw565h2600_.jpg, 08.11.2016.
- [183] http://www.thegreenage.co.uk/wp-content/uploads/2013/08/IMG_0464-780x350.jpg, 11.11.2016.
- [184] <http://www.greenspec.co.uk/images/web/resources/RH-Insulation-4.jpg>, 11.11.2016.

- [185] http://www.gradjevinarstvo.rs/tekstovi_slike/tekstovi/paille_enquete-paille_broustey-jumilhaclegrand-01.jpg, 11.11.2016.
- [186] http://terrdecor.hr/wp-content/uploads/2014/08/img_1286.jpg, 11.11.2016.
- [187] <https://cdn.niftyhomestead.com/wp-content/uploads/2016/02/straw-230902.jpg>, 11.11.2016.
- [188] http://img.archiexpo.com/images_ae/photo-g/105003-5443979.jpg, 11.11.2016.
- [189] http://www.hiss-reet.de/images/bauenmitreet/naturbau/praxis/reetplatte/aussendaemmung/bild5_big.jpg, 11.11.2016.
- [190] <http://cdn.zmescience.com/wp-content/uploads/2012/09/poylmer-aerogel-micrograph.jpg>, 11.11.2016.
- [191] <http://cnet2.cbsistatic.com/hub/i/r/2010/02/02/ec51ee01-f4d5-11e2-8c7c-d4ae52e62bcc/resize/570xauto/6274e47fc2fd22fe20c7384998efdfd0/Aerogel.JPG>, 11.11.2016.
- [192] <http://www.buyaerogel.com/wp-content/uploads/2013/08/spaceloft-bulk-curved.jpg>, 11.11.2016.
- [193] <http://www.starch.dk/private/energy/img/VIP.jpg>, 11.11.2016.
- [194] <http://www.constructionmanagemagazine.com/products-on-site/new-vacuum-isolated-panel-vip-be-unveiled-ecobuild/>, 11.11.2016.
- [195] http://www.capsulae.com/media/microencapsulation2__028781400_1519_10022014.jpg, 13.11.2016.
- [196] <http://www.construction21.org/luxembourg/data/sources/users/18/duPontz-energain.jpg>, 13.11.2016.

O autoru

Mr. sc. Vladimir Šimetin rođen je u Splitu 1940. godine. Osnovnu školu završio je u Kaštel Novom, a gimnaziju u Splitu. Na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu diplomirao je te magistrirao na temu „Toplinski mostovi u zgradarstvu, proračun konačnim elementima“. Na CSTB-u u Parizu položio je specijalistički ispit iz područja građevinske akustike, a na Znanstveno-istraživačkom institutu građevinske fizike u Moskvi usavršavao se za područje građevinske fizike.

Gotovo čitav radni vijek proveo je u Zavodu za zgradarstvo Instituta građevinarstva Hrvatske u Zagrebu, kao istraživač, savjetnik, koordinator na velikim projektima te, pri kraju radnog vijeka, kao direktor Zavoda. Bio je predavač i viši predavač predmeta „Građevinska fizika“ te voditelj i predavač tečaja „Toplinska i zvučna zaštita zgrada“ u okviru dopunske nastave i cijeloživotnog stručnog usavršavanja. Bio je dugogodišnji predavač na stručnim seminarima iz područja građevinske fizike u Društvu građevinskih inženjera Zagreb te nastavnik na programu izobrazbe za stručno osposobljavanje i obavezno usavršavanje osoba koje provode energetske preglede i/ili energetske certificiranje zgrada. Kao ovlašteni revident projekata za područja uštede energije i toplinske zaštite te zaštite od buke i vibracija, od 1993. do umirovljenja 2008. godine obavio je kontrolu niza projekata značajnih građevina. Bio je član više Tehničkih odbora Hrvatskog zavoda za norme i dugogodišnji predsjednik Tehničkog odbora 163 – toplinska izolacija. Autor je više znanstvenih i stručnih radova.



FRONTA IMPRESS

ISBN 978-953-480-520-6



9 789534 805206



SAVJETOVANJE