

Vođenje topline u građevinskim objektima

Banko, Mihael

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:190997>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-12**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET RIJEKA

Mihael Banko

Vođenje topline u građevinskim objektima

ZAVRŠNI RAD

Rijeka, 09.2024

SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET RIJEKA
Prijediplomski sveučilišni studij
Fizika

Mihael Banko
JMBAG: 0114037519

Vođenje topline u građevinskim objektima

ZAVRŠNI RAD

Rijeka, 09.2024.

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI RADA

Završni/Diplomski rad izradio/izradila sam samostalno, u suradnji s mentorom/mentoricom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.



Mihael Banko

U Rijeci, 14.9.2024.

SAŽETAK

Ovaj rad istražuje vođenje topline u građevinskim objektima, s naglaskom na termodinamičke principe, materijale i metode koje se koriste za poboljšanje energetske učinkovitosti. U prvom dijelu rada objašnjeni su osnovni pojmovi poput Fourierovog zakona vođenja topline, koeficijenta toplinske vodljivosti te toplinske otpornosti i difuzivnosti. Nakon toga, analizirani su različiti građevinski materijali poput betona, opeke, drva i čelika te njihov utjecaj na toplinsku vodljivost, kao i utjecaj vlage na te materijale. Rad se također bavi značajem toplinske izolacije u zgradama, proračunom toplinskih gubitaka, te analizom toplinskih mostova. U praktičnom dijelu rada, prikazani su primjeri energetski učinkovitih zgrada kao što su pasivne kuće, zeleni krovovi i fasade, te primjena naprednih izolacijskih materijala. Rad zaključuje važnost integracije znanja o vođenju topline u projektiranje građevinskih objekata i preporučuje daljnja istraživanja u području toplinske zaštite zgrada.

Ključne riječi: vođenje topline, toplinska izolacija, energetska učinkovitost, građevinski materijali, pasivne kuće, zeleni krovovi.

ABSTRACT

This thesis explores heat conduction in building structures, focusing on thermodynamic principles, materials, and methods used to enhance energy efficiency. The first part of the thesis explains fundamental concepts such as Fourier's law of heat conduction, thermal conductivity coefficient, and thermal resistance and diffusivity. Following this, various building materials such as concrete, brick, wood, and steel are analyzed, along with their impact on thermal conductivity and the influence of moisture on these materials. The thesis also addresses the importance of thermal insulation in buildings, heat loss calculations, and the analysis of thermal bridges. The practical section presents examples of energy-efficient buildings, such as passive houses, green roofs and facades, and the application of advanced insulation materials. The thesis concludes by emphasizing the importance of integrating knowledge of heat conduction in building design and recommends further research in the field of thermal protection of buildings.

Keywords: heat conduction, thermal insulation, energy efficiency, building materials, passive houses, green roofs

Sadržaj

1.	Uvod	1
1.1.	Definicija vođenja topline	1
1.2.	Značaj vođenja topline u građevinarstvu	1
1.3.	Cilj i struktura rada	2
2.	Osnovni pojmovi i zakoni vođenja topline	3
2.1.	Fourierov zakon vođenja topline	3
2.2.	Koeficijent toplinske vodljivosti (λ)	5
2.3.	Toplinska otpornost (R) i toplinska propusnost (U)	7
2.4.	Toplinska difuzivnost (a)	9
3.	Vođenje topline u građevinskim materijalima	11
3.1.	Toplinska svojstva građevinskih materijala	11
3.1.1.	Beton	12
3.1.2.	Opeka	13
3.1.3.	Drvo	14
3.1.4.	Čelik	15
3.1.5.	Izolacijski materijali	16
3.2.	Utjecaj vlage na toplinsku vodljivost materijala	18
4.	Utjecaj vođenja topline na energetske učinkovitost zgrada	20
4.1.	Važnost toplinske izolacije	20
4.2.	Gubici topline kroz građevinske elemente	22
4.2.1.	Zidovi	23
4.2.2.	Krovovi	24
4.2.3.	Prozori i vrata	24
4.2.4.	Podovi	26
4.3.	Analiza toplinskih mostova i njihovo uklanjanje	27
5.	Projektiranje građevinskih objekata s obzirom na vođenje topline	30
5.1.	Proračun toplinskih gubitaka	30
5.2.	Optimalan izbor materijala	32
5.3.	Standardi i propisi toplinske zaštite zgrada	34
6.	Praktični primjeri izgradnje energetski učinkovitih zgrada	36
6.1.	Pasivne kuće	36
6.2.	Zeleni krovovi i fasade	38
6.3.	Primjena naprednih izolacijskih materijala	42
7.	Zaključak	46

7.1.	Sažetak ključnih nalaza	46
7.2.	Važnost integracije znanja o vođenju topline u građevinske projekte	46
7.3.	Preporuke za buduće istraživanje i razvoj u području toplinske zaštite	46
8.	Literatura.....	47

POPIS SLIKA

<i>Slika 1: Termografski prikaz toplinskih gubitaka zgrade [27]</i>	2
Slika 2: Matematički prikaz Furierovog zakona [28]	4
Slika 3: Grafički prikaz toplinske otpornosti zida [28]	8
Slika 4: Slojevi tipskog zida sa ETICS sustavom fasade [31]	11
Slika 5: Mineralna vuna [32].....	16
Slika 6: Različite vrste ekspaniranog polistirena za izolaciju [33]	17
Slika 7: Izolacija poliuretanskom pjenom [34]	18
Slika 8: Prikaz utjecaja vlage na toplinsku provodljivost izolacijskih materijala [29]	19
Slika 9: Organski izolacijski materijali [36]	21
Slika 10: Važnost toplinske izolacije [35]	22
Slika 11: Prikaz gubitaka topline kroz zid bez toplinske izolacije (lijevo) i sa toplinskom izolacijom (desno) [30].....	23
Slika 12: Moderni troslojni prozor s komorama u profilima [37]	25
Slika 13: Termografska slika toplinskog mosta [19].....	27
Slika 14: Grafički prikaz toplinskog mosta zbog nepravilne izvedbe toplinske izolacije [38]	29
Slika 15: Model projektirane pasivne kuće [40].....	36
Slika 16: Temeljni zahtjevi pasivne kuće [39]	37
Slika 17: Zeleni krov [25].....	39
Slika 18: Zeleni krov na garaži [25]	40
Slika 19: Zelena fasada [25]	41
Slika 20: VIP panel za termoizolaciju [25].....	43
Slika 21: Ventilirana fasada s PCM panelima [17]	44

1. UVOD

1.1. Definicija vođenja topline

Vođenje topline, poznato i kao kondukcija, jedan je od tri osnovna načina prijenosa topline između fizikalnih tijela. Proces se odvija kada topline prelazi s toplijeg na hladnije tijelo, pri čemu je brzina prijenosa topline veća ako je razlika u temperaturi između dvaju tijela veća. Vođenje topline se odvija u svim materijalima, no njegova učinkovitost ovisi o svojstvima materijala. Metali, na primjer, imaju visoku sposobnost vođenja topline zbog gibanja slobodnih elektrona, dok su šupljikave tvari, poput pluta i kamene vune, tekućine i zrak loši vodiči topline zbog prisutnosti zračnih šupljina ili inherentnih svojstava materijala [3].

Različiti materijali pokazuju različite stupnjeve vodljivosti. Metali poput srebra, bakra i aluminijski su odlični vodiči topline, dok su materijali poput drva, azbesta i polistirena poznati kao toplinski izolatori zbog njihove niske toplinske vodljivosti. Ovi materijali se koriste u građevinarstvu kako bi se smanjili gubici topline i poboljšala energetska učinkovitost zgrada. Na primjer, dvostruki prozori koriste zrak kao izolator za smanjenje prijenosa topline, čime se postiže bolja toplinska izolacija [4] [2].

1.2. Značaj vođenja topline u građevinarstvu

Vođenje topline u građevinarstvu ima ulogu u kontekstu energetske učinkovitosti zgrada, udobnosti korisnika i održivosti građevinskih objekata. U modernom građevinarstvu, jedan od ključnih ciljeva je minimizirati gubitke topline kroz omotač zgrade, čime se smanjuje potreba za grijanjem zimi i hlađenjem ljeti. Time se postižu niži troškovi energije, što je u skladu s globalnim ciljevima za smanjenje emisije stakleničkih plinova i borbu protiv klimatskih promjena [1].



Slika 1: Termografski prikaz toplinskih gubitaka zgrade [27]

Vođenje topline, dakle, nije samo fizikalni proces, već bitan faktor u projektiranju i izgradnji suvremenih stambenih zgrada. Kvalitetno upravljanje prijenosom topline doprinosi boljoj energetskej učinkovitosti, većoj udobnosti korisnika te održivijem korištenju prirodnih resursa, što su sve prioriteti u današnjem građevinarstvu [1].

1.3. Cilj i struktura rada

Cilj ovog rada je istražiti i analizirati vođenje topline u građevinskim objektima te ukazati na važnost razumijevanja ovog procesa u kontekstu energetske učinkovitosti i projektiranja zgrada. Vođenje topline izravno utječe na udobnost korisnika, potrošnju energije te ukupne troškove održavanja objekata. Rad se fokusira na detaljno objašnjenje osnovnih zakona i pojmova vođenja topline, analizu toplinskih svojstava različitih građevinskih materijala, te istraživanje utjecaja vođenja topline na energetske učinkovitost zgrada.

Struktura rada podijeljena je u nekoliko poglavlja. U prvom dijelu objašnjeni su osnovni pojmovi i zakoni vođenja topline, kao što su Fourierov zakon, koeficijent toplinske vodljivosti, toplinska otpornost, toplinska propusnost i toplinska

difuzivnost. Drugi dio rada bavi se vođenjem topline u građevinskim materijalima, s posebnim naglaskom na beton, opeku, drvo, čelik i izolacijske materijale, te utjecajem vlage na toplinsku vodljivost materijala.

Treći dio rada analizira kako vođenje topline utječe na energetska učinkovitost zgrada, uključujući važnost toplinske izolacije i analizu gubitaka topline kroz različite građevinske elemente, kao što su zidovi, krovovi, prozori, vrata i podovi. Također, posebna pažnja posvećena je toplinskim mostovima i njihovom uklanjanju.

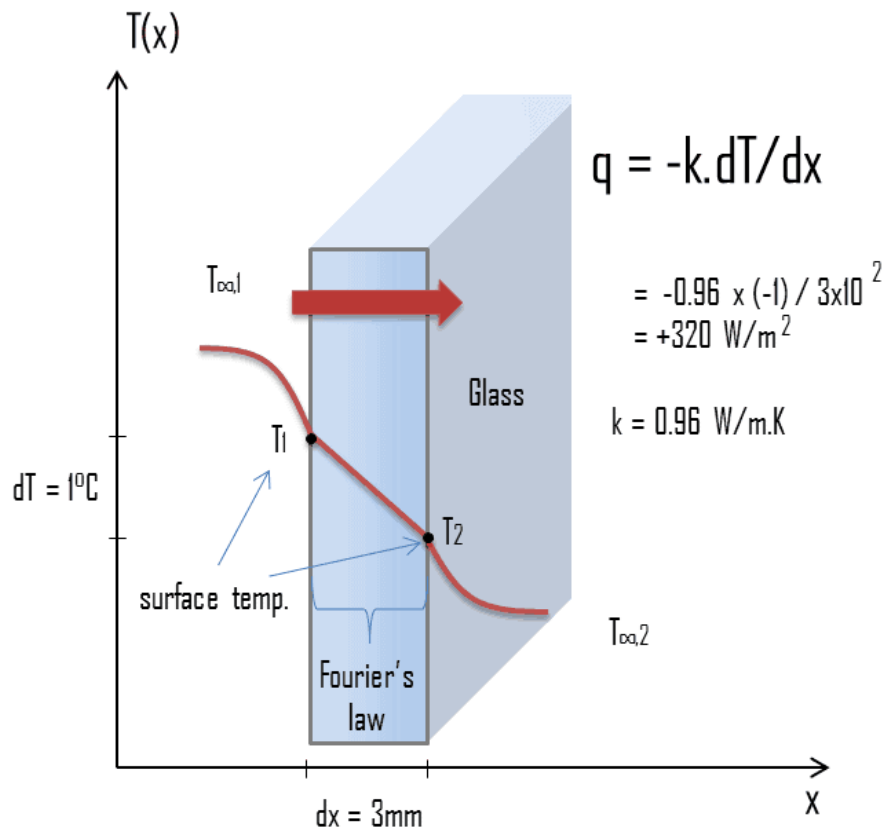
Četvrti dio posvećen je projektiranju građevinskih objekata s obzirom na vođenje topline, s naglaskom na proračun toplinskih gubitaka, optimalan izbor materijala te standarde i propise toplinske zaštite zgrada. U petom dijelu rada prikazani su praktični primjeri izgradnje energetski učinkovitih zgrada, uključujući pasivne kuće, zelene krovove i fasade, te primjenu naprednih izolacijskih materijala.

Zaključno poglavlje donosi sažetak ključnih nalaza, ističe važnost integracije znanja o vođenju topline u građevinske projekte te pruža preporuke za buduće istraživanje i razvoj u području toplinske zaštite zgrada.

2. OSNOVNI POJMOVI I ZAKONI VOĐENJA TOPLINE

2.1. Fourierov zakon vođenja topline

Fourierov zakon vođenja topline, također poznat kao zakon toplinske kondukcije, predstavlja temeljni princip u termodinamici koji opisuje prijenos topline unutar materijala. Prema ovom zakonu, brzina prijenosa topline kroz materijal proporcionalna je negativnom gradijentu temperature i površini kroz koju toplina prolazi. Jednostavno rečeno, toplina se prenosi iz područja više temperature u područje niže temperature, a brzina tog prijenosa ovisi o temperaturnoj razlici i svojstvima materijala [3].



Slika 2: Matematički prikaz Furierovog zakona [28]

Matematički, Fourierov zakon se izražava prema (1) sa izvora [3]:

$$\frac{\partial t}{\partial Q} = -k \int_S \nabla T \cdot dS \quad (1)$$

gdje su:

- Q -količina prenesene topline,
- t -proteklo vrijeme,
- k -vodljivost materijala,
- S -ploština kroz koju toplina protječe,
- ∇T gradijent temperature.

U ovoj jednadžbi, k predstavlja toplinsku vodljivost materijala, što je svojstvo koje opisuje sposobnost materijala da provodi toplinu. Ovaj faktor može varirati s temperaturom, ali za mnoge materijale te promjene su zanemarive u širokom rasponu

temperatura. ∇T označava gradijent temperature, odnosno promjenu temperature u prostoru, dok dS predstavlja beskonačno malu površinu kroz koju toplina prolazi [4].

Za jednostavne linearne situacije, gdje je temperatura ravnomjerno raspodijeljena duž jednolikih površina s izoliranim stranama, Fourierov zakon se može integrirati kako bi se dobila jednadžba za brzinu toka topline (2):

$$\frac{\Delta t}{\Delta Q} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2)$$

gdje su:

- A -površina presječenog područja,
- ΔT -temperaturna razlika između krajeva materijala,
- Δx -udaljenost između krajeva materijala.

Ova jednadžba pokazuje da je toplinski tok $\Delta Q/\Delta t$ proporcionalan površini presječenog područja A , temperaturnoj razlici ΔT i obrnuto proporcionalan udaljenosti Δx između točaka gdje se temperatura mjeri. U građevinskoj praksi, ovaj zakon je ključan za proračun toplinskih gubitaka kroz građevinske elemente, kao što su zidovi, krovovi i podovi [1].

2.2. Koeficijent toplinske vodljivosti (λ)

Koeficijent toplinske vodljivosti (oznaka: λ) je fizikalna veličina koja opisuje sposobnost materijala da provodi toplinu. Ova veličina izražava količinu topline koja se prenosi kroz materijal određenom površinom i duljinom u jedinici vremena, uz smanjenje temperature za jedan kelvin (1 K) na jedinici duljine u smjeru prijenosa topline [4].

Matematički, koeficijent toplinske vodljivosti izražava se kao:

$$\lambda = \frac{Q \cdot l}{S \cdot t \cdot \Delta T} \quad (3)$$

gdje su:

- Q - količina topline,
- l - duljina vodiča,
- S - ploština presjeka toplinskog vodiča okomita na smjer širenja topline,
- t - vrijeme vođenja topline,
- ΔT - razlika temperatura na krajevima toplinskog vodiča.

Koeficijent toplinske vodljivosti ovisi o nekoliko faktora, uključujući vrstu materijala, njegovu strukturu, gustoću, vlažnost i temperaturu. Materijali s visokim koeficijentom toplinske vodljivosti, kao što su metali (npr. bakar, aluminij), omogućuju brz prijenos topline i stoga se nazivaju toplinskim vodičima. S druge strane, materijali s niskim koeficijentom toplinske vodljivosti, poput staklene vune, polistirena ili zraka, nazivaju se toplinskim izolatorima jer otežavaju prijenos topline [4].

Jedinica za koeficijent toplinske vodljivosti je vat po metru i kelvinu (W/mK). To znači da je toplinska vodljivost definirana kao količina topline (izražena u vatima) koja prolazi kroz materijal debljine jednog metra kada postoji temperaturna razlika od jednog kelvina između suprotnih strana materijala [4].

Primjena koeficijenta toplinske vodljivosti koristi se u građevinarstvu kod projektiranja energetski učinkovitih zgrada. Inženjeri koriste ovu vrijednost kako bi odabrali odgovarajuće materijale za izolaciju zgrada, s ciljem minimiziranja gubitaka topline [1].

Koeficijent toplinske vodljivosti se također koristi u proračunu toplinskih gubitaka i dobitaka kroz različite građevinske elemente. Razumijevanje i pravilna primjena ovog koeficijenta omogućuje inženjerima da dizajniraju objekte koji su ne samo ugodni za boravak, već i ekonomski i ekološki održivi [1].

2.3. Toplinska otpornost (R) i toplinska propusnost (U)

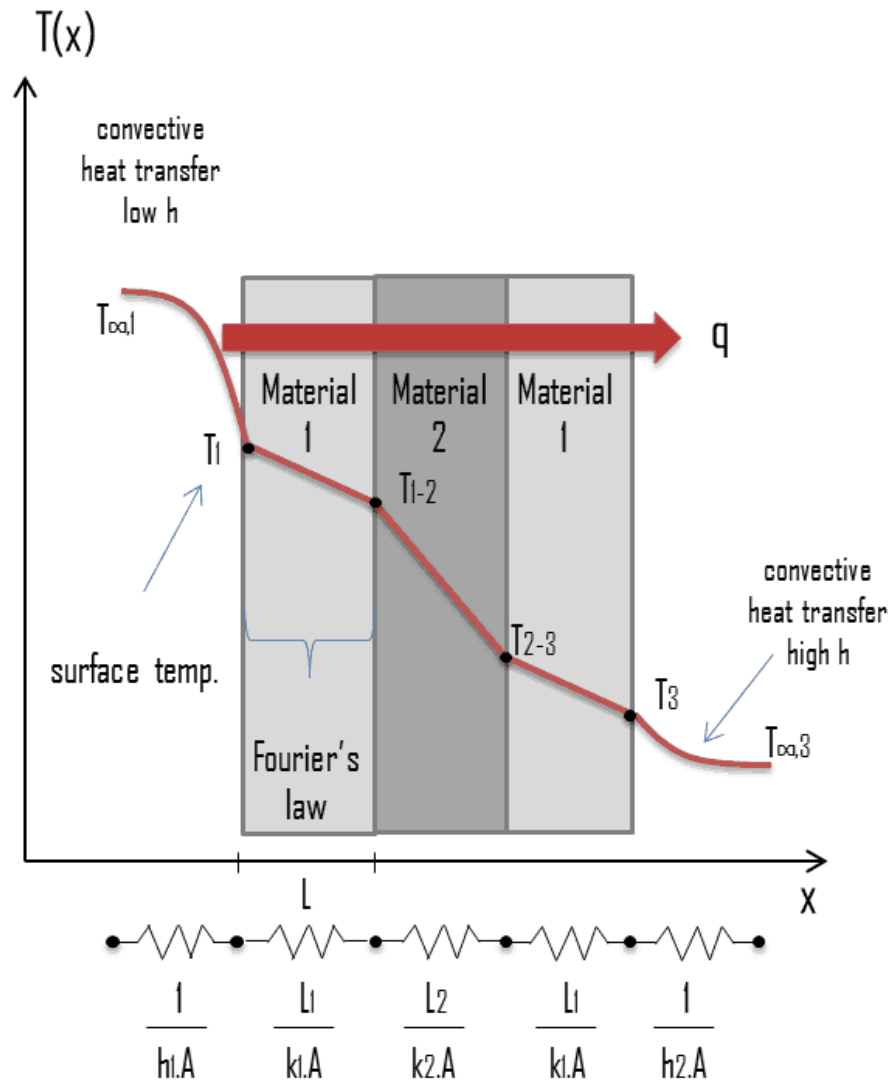
Toplinska otpornost (R) i toplinska propusnost (U) dva su koncepta u fizici građevinskih konstrukcija koji se odnose na sposobnost materijala da se odupru ili dopuste prijenos topline.

Toplinska otpornost (oznaka: R) izražava otpor materijala prolasku topline i mjeri se u m²K/W. Toplinska otpornost ovisi o svojstvima materijala, kao što su vrsta, struktura, gustoća, vlažnost i temperatura. Što je veća toplinska otpornost, to je bolja izolacijska sposobnost materijala. U građevinskim konstrukcijama, R-vrijednost svakog sloja materijala zbraja se kako bi se dobila ukupna toplinska otpornost zidova, krovova, podova i drugih elemenata zgrade [5].

Matematički, toplinska otpornost izražava se kao recipročna vrijednost koeficijenta prolaska topline (U):

$$R = \frac{1}{U} \quad (4)$$

Povećanjem R-vrijednosti zgrade povećava se njezina sposobnost zadržavanja topline unutar prostora. Na primjer, dodavanje vanjske izolacije na zidove može značajno povećati toplinsku otpornost, smanjujući tako gubitke topline i troškove energije [5].



Slika 3: Grafički prikaz toplinske otpornosti zida [28]

Primjena toplinske izolacije može dovesti do značajnih ušteda u energiji, posebno u zgradama projektiranim prema standardima niskoenergetskih i pasivnih kuća, gdje su uštede energije od 80-90% uobičajene u usporedbi s neizoliranim objektima. Takvi objekti mogu postići gotovo nultu potrošnju energije, oslanjajući se na obnovljive izvore energije, čime se dodatno povećava njihova održivost [6].

Toplinska propusnost (oznaka: U) odnosi se na količinu topline koju građevni element gubi kroz površinu od 1 m^2 u jednoj sekundi, pri razlici temperature od 1 K . Mjerna jedinica za koeficijent prolaska topline je $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$. Što je manja vrijednost U , to je bolja toplinska zaštita zgrade, jer manja količina topline prolazi kroz građevni element [7].

Koeficijent prolaska topline U izračunava se prema formuli:

$$\Phi = A \cdot U \cdot (T1 - T2) \quad (5)$$

gdje su:

- Φ - količina prenesene topline (W),
- A - površina kroz koju toplina protječe (m²),
- U - koeficijent prolaska topline (W/m²K),
- T1 - viša temperatura s jedne strane strukture (K),
- T2 - niža temperatura s druge strane strukture (K).

Građevinski elementi s niskim U-vrijednostima, poput dobro izoliranih zidova, krovova i prozora, doprinose manjoj potrošnji energije za grijanje i hlađenje. Ove vrijednosti se često proračunavaju prema međunarodnim standardima, poput ISO 6946 za zidove i krovove, ili se mjere pokusom prema ISO 9869 [7].

2.4. Toplinska difuzivnost (a)

Toplinska difuzivnost (oznaka: a) je važna fizikalna veličina koja opisuje brzinu promjene temperature unutar materijala ili tijekom širenja topline kroz materijal. Ona predstavlja omjer toplinske provodnosti materijala (λ) i produkta gustoće (ρ) i specifičnog toplinskog kapaciteta (c_p). Matematički, toplinska difuzivnost izražava se jednadžbom:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (6)$$

Toplinska difuzivnost određuje koliko brzo materijal reagira na promjene temperature. Materijali s visokom toplinskom difuzivnošću brzo se zagrijavaju i hlade, dok materijali s niskom toplinskom difuzivnošću zadržavaju toplinu duže, što ih čini pogodnim za specifične građevinske primjene [8].

Toplinska difuzivnost izravno utječe na dinamiku temperature unutar građevinskih elemenata, čime se regulira toplinska udobnost unutar prostora [9].

U jednom istraživanju, ispitivana su fizikalna svojstva novorazvijenog materijala, poliuretanske žbuke, nerazornim metodama kako bi se utvrdile njezine karakteristike, uključujući toplinsku provodnost i specifični toplinski kapacitet. Ti podaci služe za izračun toplinske difuzivnosti i za razumijevanje kako se materijal ponaša u uvjetima nestacionarnog prijenosa topline. U usporedbi s klasičnim uređajima, nova metoda ispitivanja i uređaji korišteni u ovom istraživanju omogućili su precizno mjerenje toplinskih koeficijenata u cijelom volumenu ispitivanog uzorka [9].

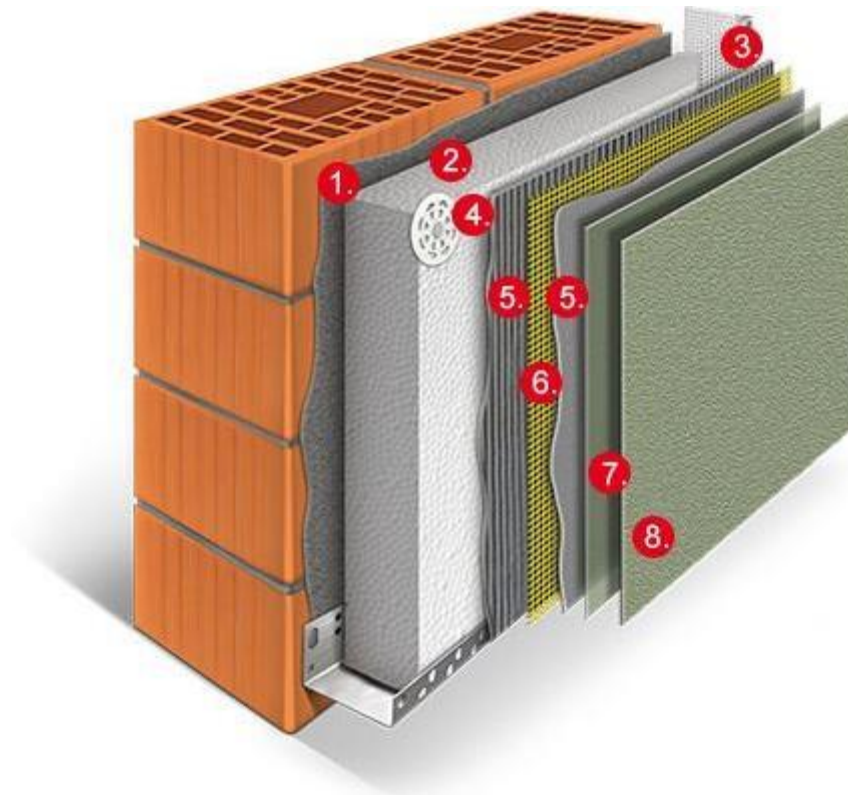
Materijali s niskom toplinskom difuzivnošću koriste se za vanjske obloge zgrada kako bi se spriječili brzi toplinski gubici ili dobitci, čime se smanjuje potreba za grijanjem i hlađenjem unutar prostora. S druge strane, materijali s visokom toplinskom difuzivnošću mogu se koristiti u situacijama gdje je potrebno brzo prilagođavanje promjenama temperature[8].

Izbor materijala temeljen na toplinskoj difuzivnosti također utječe na trajnost i otpornost zgrada na temperaturne promjene, što je posebno važno u područjima s ekstremnim klimatskim uvjetima [9].

3. VOĐENJE TOPLINE U GRAĐEVINSKIM MATERIJALIMA

3.1. Toplinska svojstva građevinskih materijala

Toplinska svojstva građevinskih materijala izravno utječu na toplinske gubitke i dobitke kroz različite građevinske elemente, kao što su zidovi, krovovi, podovi i prozori. Pravilan odabir materijala i njihova ugradnja mogu značajno smanjiti potrebu za grijanjem zimi i hlađenjem ljeti, čime se poboljšava udobnost stanovanja i smanjuju troškovi energije [1].



Slika 4: Slojevi tipskog zida sa ETICS sustavom fasade. [31]

3.1.1. Beton

Beton je jedan od najčešće korištenih građevinskih materijala zbog svoje čvrstoće, trajnosti i otpornosti na vatru. Koristi se u konstrukciji temelja, zidova, nosivih stupova, podova i stropova, čime osigurava stabilnost i dugovječnost zgrada. Međutim, kada je riječ o toplinskim svojstvima, beton ima određene nedostatke koje je važno uzeti u obzir prilikom projektiranja zgrada [1].

Beton je relativno loš toplinski izolator, što znači da lako provodi toplinu. Toplinska vodljivost betona (λ) kreće se u rasponu od približno 1.0 do 2.6 W/m·K, ovisno o njegovom sastavu i gustoći. Što je beton gušći, to je njegova toplinska vodljivost veća. Visoka toplinska vodljivost znači da beton lako propušta toplinsku energiju, što ga čini manje pogodnim za primjene u kojima je potrebna dobra toplinska izolacija [12].

Zbog visoke toplinske vodljivosti, toplinska otpornost betona je relativno niska. Toplinska otpornost (R) je suprotno proporcionalna toplinskoj vodljivosti, što znači da beton, unatoč svojim strukturnim prednostima, ne pruža značajan otpor prolasku topline. To rezultira visokim koeficijentom toplinske propusnosti (U), što znači da beton nije učinkovit u sprečavanju gubitka topline kroz građevinske elemente. Stoga, kada se beton koristi kao glavni građevinski materijal, često je potrebno dodatno koristiti izolacijske materijale kako bi se smanjili toplinski gubici [12].

Toplinska difuzivnost betona, koja opisuje brzinu promjene temperature unutar materijala, također je relativno visoka zbog njegove visoke gustoće i toplinske vodljivosti. Visoka toplinska difuzivnost znači da beton brzo reagira na promjene temperature, što može dovesti do brzih promjena temperature unutar zgrade ako nije adekvatno izoliran. To može utjecati na unutarnju udobnost prostora, posebno u klimatskim uvjetima s velikim temperaturnim oscilacijama.

Iako je beton izuzetno važan građevinski materijal zbog svoje čvrstoće i otpornosti, njegova toplinska svojstva često zahtijevaju primjenu dodatne izolacije kako bi se postigla željena razina energetske učinkovitosti i toplinske udobnosti unutar zgrade.

3.1.2. Opeka

Opeka je jedan od najstarijih i najčešće korištenih građevinskih materijala, cijenjena zbog svoje čvrstoće, trajnosti i estetskih svojstava. Kada je riječ o toplinskim svojstvima, opeka pruža određenu razinu toplinske izolacije, ali njezine karakteristike uvelike ovise o vrsti opeke, njenoj gustoći i strukturi.

Toplinska vodljivost opeke, koja se izražava koeficijentom toplinske vodljivosti (λ), varira ovisno o vrsti i strukturi opeke. Na primjer, obična crvena opeka ima koeficijent toplinske vodljivosti između 0,45 i 0,75 W/m·K, dok porozna opeka može imati koeficijent niži od 0,22 W/m·K. To znači da porozna opeka bolje zadržava toplinu unutar prostora, čineći je poželjnim izborom za energetski učinkovitiju gradnju [12].

Toplinska otpornost (R) opeke izravno je povezana s njenom toplinskom vodljivošću. Opeka s višom toplinskom otpornosti bolje se odupire prolasku topline, što doprinosi boljoj izolaciji zgrade. Međutim, zbog svoje relativno visoke gustoće, opeka ima manju toplinsku otpornost u usporedbi s laganijim izolacijskim materijalima. Koeficijent toplinske propusnosti (U) opeke također varira ovisno o njenoj vrsti, ali općenito je niži za porozne i šuplje opeke, što ih čini pogodnijima za vanjske zidove u stambenim zgradama [12].

Opeka ima umjerenu toplinsku difuzivnost, što znači da se temperatura unutar opeke mijenja relativno sporo u usporedbi s nekim drugim građevinskim materijalima. Ova karakteristika čini opeku pogodnom za konstrukcije koje zahtijevaju stabilnost temperature, ali ujedno može predstavljati izazov u smislu osiguravanja toplinske udobnosti u zgradama koje nisu adekvatno izolirane [12].

Iako opeka nudi dobru čvrstoću i trajnost, njezina toplinska svojstva često zahtijevaju dodatnu izolaciju.

3.1.3. *Drvo*

Drvo je prirodni materijal poznat po svojoj svestranosti, čvrstoći i estetskim svojstvima. Zbog svojih jedinstvenih karakteristika, drvo se široko koristi u građevinarstvu, naročito u konstrukcijama gdje su potrebni materijali koji pružaju dobru toplinsku izolaciju. Toplinska svojstva drva uvelike su određena njegovom strukturom, uključujući poroznost, anizotropnost i prirodni sastav.

Drvo je relativno slab vodič topline, što znači da dobro zadržava toplinu unutar prostora. Toplinska vodljivost drva (λ) ovisi o njegovoj vrsti, gustoći i vlažnosti. Općenito, drvo ima toplinsku vodljivost u rasponu od 0,12 do 0,16 W/m·K, što ga čini učinkovitim izolatorom, osobito kada se uspoređuje s drugim građevinskim materijalima poput betona ili opeke [14].

Zbog niske toplinske vodljivosti, drvo ima visoku toplinsku otpornost (R), što ga čini iznimno pogodnim za korištenje u građevinskim elementima gdje je potrebna dobra izolacija. Koeficijent toplinske propusnosti (U) drva, koji je obrnuto proporcionalan toplinskoj otpornosti, također je nizak, što znači da drvo učinkovito sprječava prolazak topline kroz građevinske elemente.

Toplinska difuzivnost drva je relativno niska. To znači da se drvo polako zagrijava i hladi, što pridonosi stabilnoj unutarnjoj temperaturi prostora izgrađenih od drva. Ova karakteristika posebno je korisna u građevinskim konstrukcijama gdje je važno održati ugodnu i konstantnu temperaturu unutar zgrade [14].

Drvo je materijal s izvrsnim toplinskim svojstvima koja ga čine izuzetno pogodnim za upotrebu u građevinskim projektima gdje je potrebna učinkovita toplinska izolacija.

3.1.4. Čelik

Čelik je slitina željeza s ugljikom, koja se koristi u širokom spektru primjena zbog svojih izvanrednih mehaničkih i fizikalnih svojstava. Njegova čvrstoća i tvrdoća čine ga jednim od najvažnijih konstrukcijskih materijala u gotovo svim područjima tehnike. Iako je čelik poznat po svojoj mehaničkoj robusnosti, njegova toplinska svojstva određuju njegovu prikladnost za specifične primjene.

Čelik je relativno dobar vodič topline, što znači da učinkovito prenosi toplinsku energiju. Toplinska vodljivost čelika (λ) obično se kreće između 40 i 60 W/m·K, ovisno o vrsti čelika i uvjetima legiranja. Ova visoka toplinska vodljivost čini čelik pogodnim za primjene u kojima je potrebno brzo odvođenje topline, kao što su izmjenjivači topline, alati za obradu metala i komponente koje su izložene visokim temperaturama [15].

Zbog visoke toplinske vodljivosti, čelik ima relativno nisku toplinsku otpornost (R), što znači da ne pruža značajan otpor prolasku topline. Koeficijent toplinske propusnosti (U) čelika također je visok, što znači da se toplina lako prenosi kroz čelične konstrukcije. To je jedan od razloga zašto se čelik ne koristi kao izolacijski materijal nego se u građevinarstvu često kombinira s drugim materijalima koji imaju bolja izolacijska svojstva [15].

Čelik ima relativno visoku toplinsku difuzivnost zbog svoje visoke toplinske vodljivosti i relativno visoke gustoće. Ova karakteristika čini čelik pogodnim za primjene u kojima je potrebno brzo izjednačavanje temperature unutar materijala, ali također znači da čelik može brzo prenijeti toplinu prema hladnijim dijelovima konstrukcije, što može dovesti do toplinskih gubitaka ako nije adekvatno izoliran [15].

3.1.5. Izolacijski materijali

Izolacijski materijali se u graditeljstvu koriste za smanjenje toplinskih gubitaka i poboljšanje energetske učinkovitosti zgrada. Glavna funkcija ovih materijala je sprječavanje prolaska topline kroz građevinske elemente, čime se održava stabilna unutarnja temperatura. Toplinska svojstva izolacijskih materijala određena su njihovom toplinskom vodljivošću, toplinskom otpornošću i toplinskom difuzivnošću.

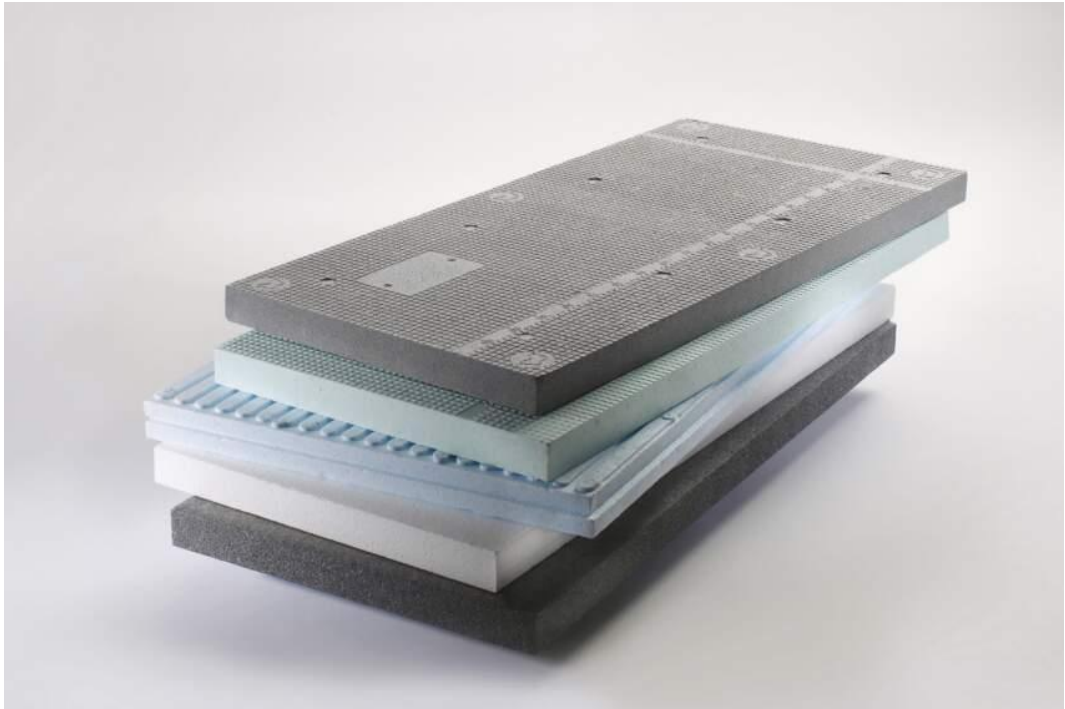
Toplinska vodljivost (λ) izolacijskih materijala mjeri sposobnost materijala da provodi toplinu. Što je niža vrijednost toplinske vodljivosti, to materijal bolje izolira. Većina uobičajenih izolacijskih materijala ima toplinsku vodljivost u rasponu od 0,030 do 0,045 W/m·K, što ih čini vrlo učinkovitim u sprječavanju toplinskih gubitaka [11].

Mineralna vuna, koja se često koristi u građevinarstvu, ima toplinsku vodljivost između 0,035 i 0,045 W/m·K. Ovaj materijal je otporan na požar i paropropustan, što ga čini idealnim za vanjske zidove i krovove. Zbog svoje relativno niske toplinske vodljivosti, mineralna vuna ima visoku toplinsku otpornost, čime smanjuje toplinske gubitke u zgradama [11].



Slika 5: Mineralna vuna [32]

Eksandirani polistiren, poznat i kao stiropor, ima toplinsku vodljivost između 0,035 i 0,040 W/m·K. Zbog svojih dobrih izolacijskih svojstava i niske cijene, često se koristi u fasadnim sustavima i podovima.



Slika 6: Različite vrste ekspandiranog polistirena za izolaciju [33]

Poliuretanska pjena, koja ima toplinsku vodljivost između 0,020 i 0,035 W/m·K, jedan je od najučinkovitijih izolacijskih materijala. Koristi se u sanacijama krovova i zidova zbog svojih iznimnih izolacijskih svojstava. Ovaj materijal ima izuzetno visoku toplinsku otpornost, što ga čini jednim od najučinkovitijih izolacijskih materijala u sprječavanju toplinskih gubitaka [17].

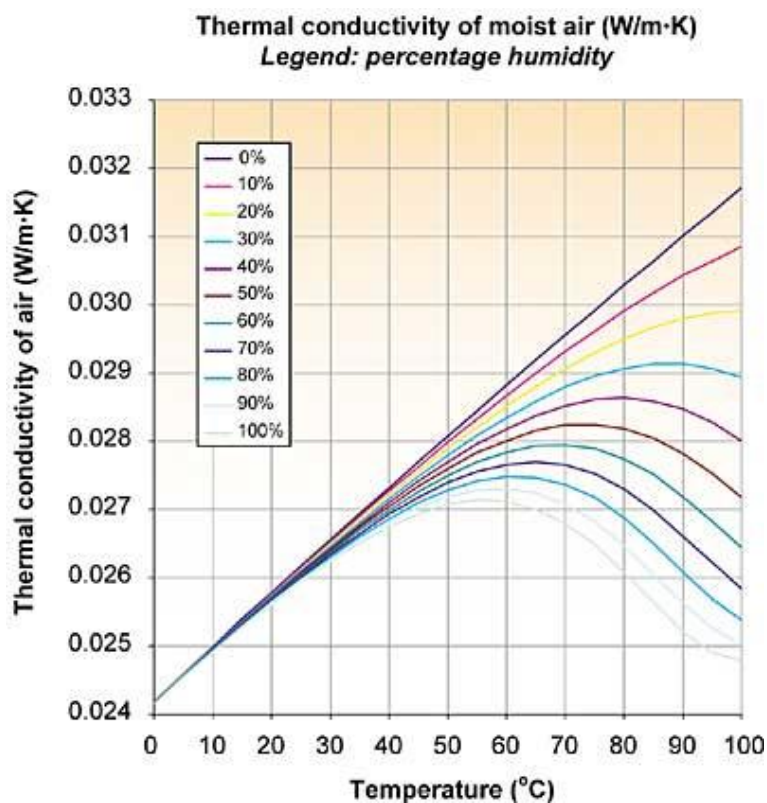


Slika 7: Izolacija poliuretanskom pjenom [34]

Izbor izolacijskog materijala ovisi o specifičnim zahtjevima projekta, bitna je pravilna primjena izolacijskih materijala kako bi se iskoristio njihov maksimum i produžila trajnost.

3.2. Utjecaj vlage na toplinsku vodljivost materijala

Vlaga ima značajan utjecaj na toplinsku vodljivost građevinskih materijala, posebno onih koji se koriste za toplinsku izolaciju. Porožna struktura izolacijskih materijala omogućava upijanje vlage, što izravno utječe na njihova toplinska svojstva [17].



Slika 8: Prikaz utjecaja vlage na toplinsku provodljivost izolacijskih materijala [29]

Svi termoizolacijski materijali imaju određeni stupanj poroznosti, što znači da unutar njih postoje prazni prostori ispunjeni zrakom. Zrak, kao dobar toplinski izolator, značajno doprinosi niskoj toplinskoj vodljivosti tih materijala. Međutim, kada materijal upije vlagu, voda zauzima dio tih pora, zamjenjujući zrak. Budući da voda ima toplinsku vodljivost više od 20 puta veću od zraka na sobnoj temperaturi, njezina prisutnost unutar materijala drastično povećava efektivnu toplinsku vodljivost materijala. Prema istraživanjima, ako sadržaj vlage u izolacijskom materijalu prijeđe određenu razinu (obično između 5% i 10%), dolazi do značajnog povećanja njegove toplinske vodljivosti [18].

Apsorpcija vode odnosi se na sposobnost materijala da apsorbira vodu kad je izravno uronjen u vodu, dok se higroskopnost odnosi na apsorpciju vodene pare iz okolnog zraka. Materijali sa zatvorenom strukturom pora obično imaju manju apsorpciju vode i vlage u usporedbi s onima s otvorenom strukturom pora. Kada materijal upije vlagu, toplinska konvekcija molekula vode u porama postaje dominantan mehanizam prijenosa topline, što dodatno povećava toplinsku vodljivost materijala [17].

4. UTJECAJ VOĐENJA TOPLINE NA ENERGETSKU UČINKOVITOST ZGRADA

4.1. Važnost toplinske izolacije

Smanjenjem toplinskih gubitaka zimi i sprječavanjem pregrijavanja prostora ljeti, toplinska izolacija doprinosi produljenju životnog vijeka zgrade i zaštiti okoliša. Izbor odgovarajućih materijala i pravilna izvedba izolacijskih sustava je vrlo bitna za postizanje optimalnih rezultata [1].

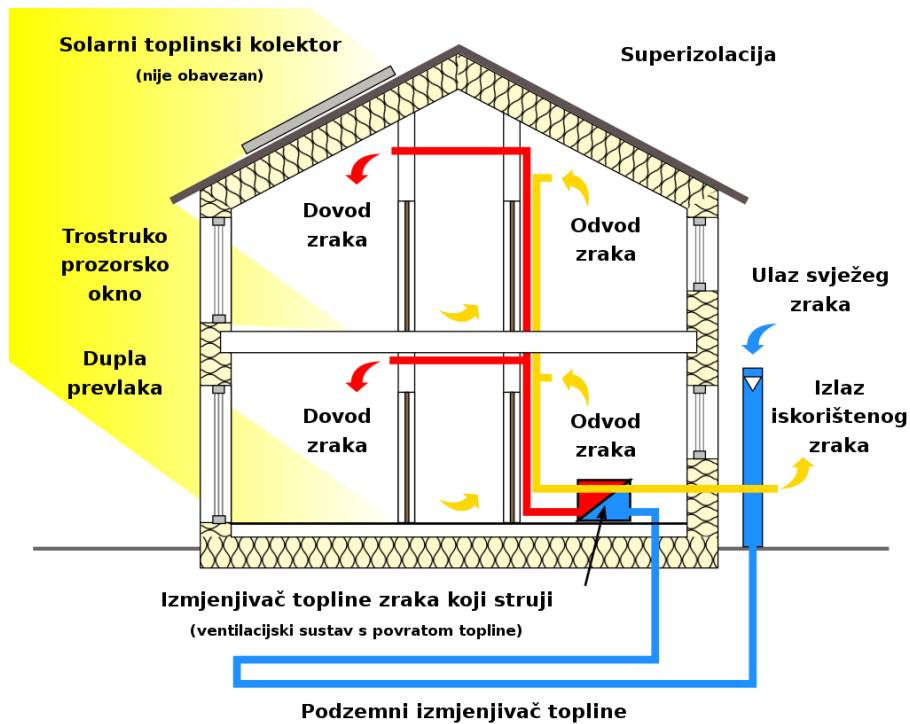
Osim smanjenja energetske gubitaka, toplinska izolacija također štiti nosivu konstrukciju zgrade od vanjskih uvjeta, uključujući jake temperaturne promjene, vlagu i mraz. Na taj način izolacija sprječava oštećenja konstrukcije, produžuje njen životni vijek i smanjuje potrebu za skupim popravcima. Smanjenje potrošnje energije ima izravan pozitivan utjecaj na okoliš, jer se smanjuje emisija stakleničkih plinova i potrošnja neobnovljivih izvora energije [1].

Ponuda toplinsko-izolacijskih materijala na tržištu je vrlo raznolika, s dostupnim anorganskim i organskim materijalima. Najčešće korišteni anorganski materijali uključuju kamenu i staklenu vunu, ekspanzirani polistiren i poliuretansku pjenu dok su među organskim materijalima popularni drvena vuna i celuloza. Noviji razvoj u tehnologijama toplinske izolacije uključuje prozirnu i vakuumsku izolaciju, koje omogućuju visoku razinu izolacije uz manju debljinu materijala [11].



Slika 9: Organski izolacijski materijali [36]

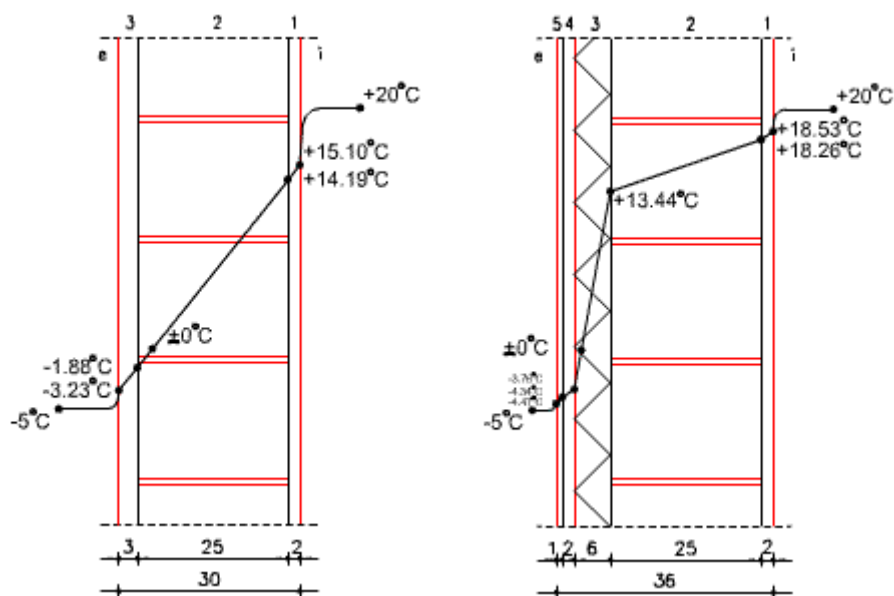
Toplinska izolacija je presudan faktor za postizanje visokih energetske standarda u gradnji, kao što su niskoenergetske i pasivne kuće. Niskoenergetska kuća troši maksimalno 30 kWh/m² godišnje energije za grijanje, dok pasivna kuća troši samo do 15 kWh/m² godišnje. Ovi standardi zahtijevaju vrlo dobru toplinsku izolaciju cijelog oplošja kuće, korištenje prozora s troslojnim staklom i sustave ventilacije s rekuperacijom topline [25].



Slika 10: Važnost toplinske izolacije [35]

4.2. Gubici topline kroz građevinske elemente

Toplinska izolacija zgrada smanjuje gubitke energije koje bi inače nastali kroz zidove, podove i krovove. Korištenjem izolacijskih materijala s niskim koeficijentom toplinske vodljivosti (λ), poput kamene vune, staklene vune ili ekspaniranog polistirena, moguće je znatno smanjiti količinu potrošene energije. Time se ne samo smanjuju troškovi za energiju, već se i povećava udobnost boravka u prostorima jer se temperatura lakše održava na željenoj razini [11].



Slika 11: Prikaz gubitaka topline kroz zid bez toplinske izolacije (lijevo) i sa toplinskom izolacijom (desno) [30]

4.2.1. Zidovi

Zidovi čine najveći dio vanjske ovojnice zgrade i imaju važnu ulogu u očuvanju toplinske energije unutar objekta. Ako nisu adekvatno toplinski izolirani, zidovi mogu biti glavni izvor toplinskih gubitaka [19].

Toplinska izolacija vanjskih zidova najčešće se postiže postavljanjem dodatnog izolacijskog sloja s vanjske strane. Ovo rješenje smanjuje toplinske gubitke i poboljšava ukupnu energetska efikasnost zgrade. Ipak, u nekim slučajevima, posebno kod zaštićenih povijesnih objekata, toplinska izolacija može se postaviti s unutarnje strane zida. Iako je ova metoda manje efikasna i skuplja, ona je često jedina opcija kako bi se sačuvala estetska i povijesna vrijednost zgrade [11].

Gubitci topline kroz zidove se smanjuju upotrebom kvalitetnih građevinskih materijala kao što su porozna termopeka i porobeton. Ovi materijali pružaju bolju toplinsku izolaciju u usporedbi s klasičnim građevinskim materijalima. Na primjer, termo opeka Porotherm debljine 38 cm ima koeficijent prolaska topline $U = 0,29$ W/m^2K , dok klasična šuplja opeka ima znatno lošija svojstva [12].

Važno je napomenuti da kontinuitet toplinske izolacije duž cijele ovojnice zgrade, uključujući zidove, podove i krovove, smanjuje utjecaj toplinskih mostova. Toplinski mostovi mogu drastično povećati gubitke topline, stoga se moraju spriječiti.

4.2.2. *Krovovi*

Krov, iako obuhvaća samo 10-20% ukupne površine zgrade važan je za zadržavanje topline unutar objekta. Ako krov nije adekvatno toplinski izoliran, kroz njega može proći i do 30% topline, što značajno povećava energetske troškove i smanjuje udobnost boravka u prostoru [10].

U slučaju kosih krovova, koji su najčešći oblik krova na obiteljskim i manjim stambenim zgradama, nedovoljna izolacija može dovesti do toplinskih gubitaka zimi, ali i do problema s pregrijavanjem prostora ispod krova ljeti. Toplinska izolacija kosih krovova često se provodi postavljanjem izolacijskih materijala, poput kamene vune, između i ispod rogova, kako bi se spriječili toplinski mostovi. Preporučena debljina izolacije kreće se između 16 i 20 cm, a izolacija se obično zatvara gipsanim pločama ili drvetom.

Ravni krovovi, zbog svoje izloženosti atmosferskim utjecajima, zahtijevaju posebno kvalitetnu toplinsku i hidroizolaciju. Ovisno o vrsti ravnog krova, bili oni prohodni, neprohodni ili zeleni krovovi, izvodi se odgovarajuća završna obrada koja osigurava odvodnju oborinskih voda i dodatnu zaštitu od toplinskih gubitaka.

Toplinska izolacija krova, bilo kosog ili ravnog, smanjuje gubitke energije, povećava udobnost stanovanja i produžuje vijek trajanja zgrade, čineći ovu investiciju ekonomski vrlo isplativom [10].

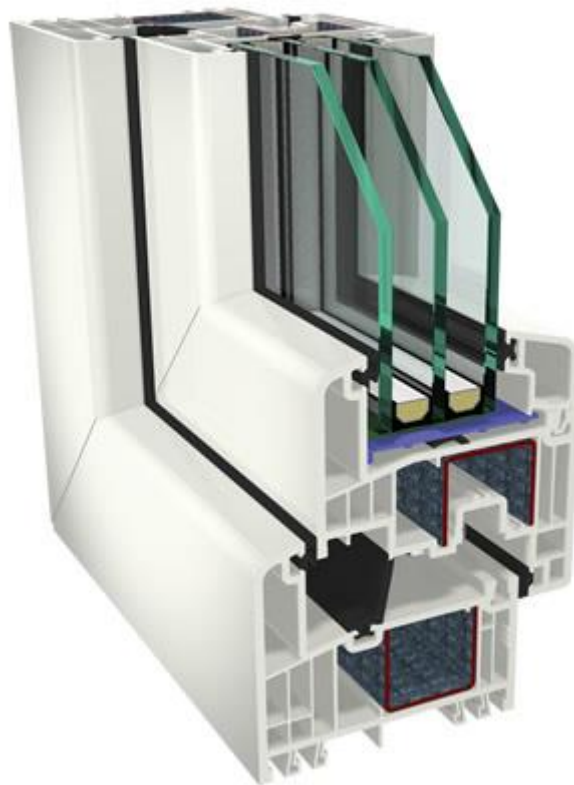
4.2.3. *Prozori i vrata*

Prozori i vanjska vrata predstavljaju najznačajnija mjesta gubitka topline u zgradama. Zbog svoje prirode i funkcije, oni su najdinamičniji dijelovi vanjske ovojnice zgrade, omogućujući dnevnu rasvjetu, prozračivanje, te propuštanje sunčeve energije u

unutarnje prostore. Međutim, upravo zbog tih funkcija prozori i vrata često postaju mjesta toplinskih gubitaka.

Gubici topline kroz prozore dijele se na kondukcijske gubitke, koji nastaju zbog prijenosa topline kroz staklo i okvire, te na gubitke ventilacijom, koji se javljaju prilikom prozračivanja prostora. Ukupni toplinski gubici kroz prozore mogu činiti više od 50% svih toplinskih gubitaka zgrade, što naglašava važnost energetske učinkovitosti prozora [16].

Stariji prozori, s koeficijentom prolaska topline U od 3,00 do 3,50 W/m^2K , mogu uzrokovati znatne gubitke energije. Nasuprot tome, moderni prozori u niskoenergetskim i pasivnim kućama imaju znatno niže U vrijednosti, od 0,80 do 1,40 W/m^2K , što značajno smanjuje gubitke topline. Stakla u takvim prozorima često su dvoslojna ili troslojna, ispunjena plinovima ili premazima koji dodatno poboljšavaju njihove izolacijske karakteristike [16].



Slika 12: Moderni troslojni prozor s komorama u profilima [37]

Osim stakla, i prozorski profili imaju značaj u toplinskoj izolaciji. Kvalitetni profili moraju osigurati dobro brtvljenje, prekinuti toplinske mostove i imati nizak koeficijent prolaska topline. Time se smanjuje ukupan toplinski gubitak kroz prozore i vrata.

4.2.4. Podovi

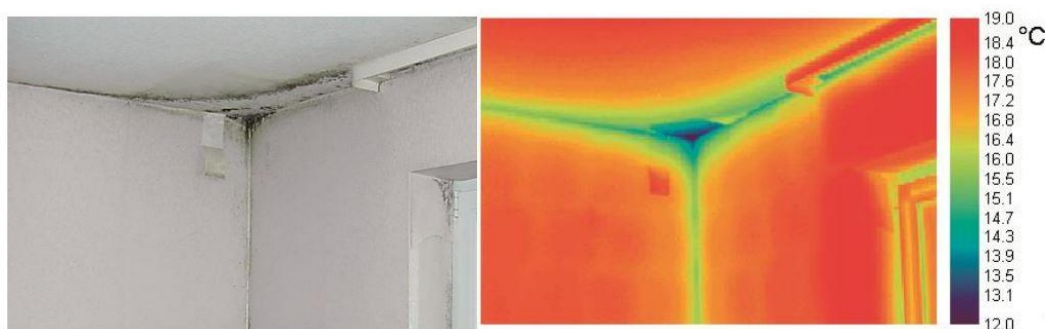
Toplinski gubici kroz podove, iako često zanemareni, mogu predstavljati do 10% ukupnih toplinskih gubitaka zgrade. Ovaj postotak je vrlo velik, posebno u područjima s hladnim klimama. Konstrukcije poda na tlu razlikuju se od onih prema negrijanom prostoru, prvenstveno po nosivoj betonskoj podlozi i hidroizolaciji, što čini pravilnu toplinsku izolaciju još važnijom [19].

Kod novogradnji, preporučuje se postavljanje deblje toplinske izolacije na podovima u kontaktu s tlom. Time se smanjuju toplinski gubici prema terenu, što rezultira nižim troškovima grijanja. S druge strane, kod postojećih zgrada, dodavanje toplinske izolacije na podovima često zahtijeva veće građevinske zahvate, što može biti ekonomski neisplativo. Međutim, ekonomski isplative mjere uključuju toplinsku izolaciju stropne konstrukcije prema negrijanom tavanu, te podne konstrukcije prema negrijanom podrumu, čime se također može postići ušteda energije.

Važno je napomenuti da kod postavljanja toplinske izolacije treba osigurati kontinuitet izolacijskog sloja preko cijele vanjske ovojnice zgrade. Time se minimiziraju toplinski mostovi, koji su često odgovorni za nepredviđene gubitke topline i nižu učinkovitost izolacije. Na taj način, cjelokupna toplinska zaštita objekta postaje učinkovita i dugotrajna, čime se dodatno povećava udobnost i smanjuju operativni troškovi zgrade [19].

4.3. Analiza toplinskih mostova i njihovo uklanjanje

Toplinski mostovi predstavljaju veliki izazov u graditeljstvu jer su to mjesta u konstrukciji zgrada kroz koja toplina lakše prolazi zbog promjena u materijalu, debljini ili geometriji građevnog dijela. Ovi mostovi negativno utječu na zadržavanje energije u zgradi, povećavajući gubitke topline, smanjujući unutarnju temperaturu zidova te stvarajući uvjete za kondenzaciju, plijesan i gljivice. Analiza toplinskih mostova i njihovo uklanjanje vrlo su bitni u postizanju visoke energetske učinkovitosti i zdravog unutarnjeg okoliša [19].



Slika 13: Termografska slika toplinskog mosta [19]

Toplinski mostovi mogu se javiti u različitim dijelovima zgrade, ovisno o uzrocima njihove pojave. Konstruktivni toplinski mostovi često nastaju kada se u zgradi koriste različiti materijali s različitim toplinskim svojstvima. Primjer toga su betonski stupovi ili serklaži u zidovima od opeke ili drva. Beton, kao dobar vodič topline, može povećati gubitak topline u odnosu na okolne izolacijske materijale. Geometrijski toplinski mostovi pojavljuju se zbog promjene oblika konstrukcije, primjerice na uglovima zgrade, gdje je vanjska površina veća od unutarnje, što dovodi do povećane toplinske propusnosti. Ovakvi mostovi često se javljaju na mjestima gdje se zidovi spajaju s krovom ili na vanjskim uglovima zgrada [19] [12].

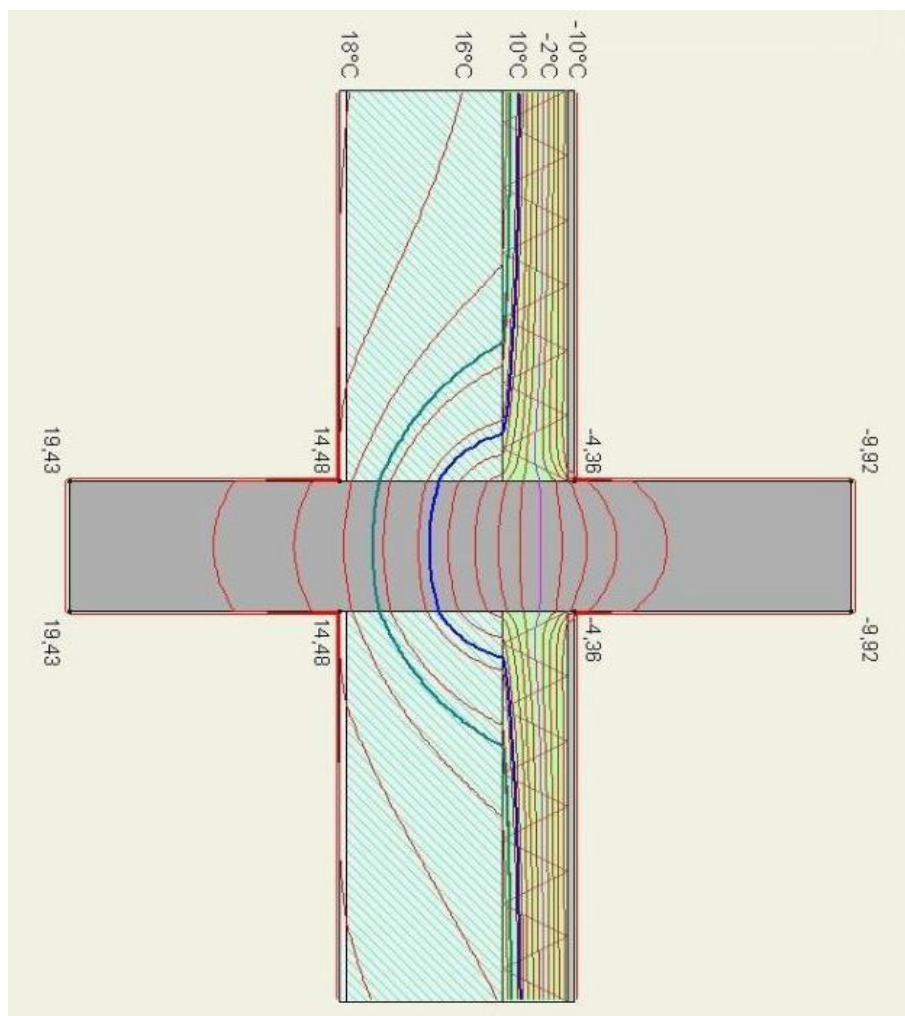
Uz navedene vrste, toplinski mostovi mogu nastati i zbog propusnosti zraka kroz pukotine ili loše brtvljenje konstrukcijskih elemenata, što se naziva konvektivnim toplinskim mostovima. Takvi mostovi nastaju kada zrak struji kroz pukotine ili neizolirane spojeve, čime se povećava gubitak topline. Također, toplinski mostovi

uzrokovani okolišnim uvjetima nastaju zbog razlike u temperaturnim uvjetima na različitim dijelovima konstrukcije. Na primjer, dijelovi zgrade izloženi izravnom suncu mogu imati drugačije toplinske karakteristike od onih u sjeni, što može uzrokovati toplinske mostove [19].

Rješavanje problema toplinskih mostova zahtijeva pažljivo planiranje i provedbu odgovarajućih mjera. Najčešće korištena metoda je postavljanje toplinske izolacije na vanjsku stranu ovojnice zgrade. Ova metoda omogućuje kontinuiranu izolaciju koja pokriva sve dijelove konstrukcije, uključujući potencijalne toplinske mostove. Postavljanje izolacijskih ploča, kao što su one u ETICS sustavu (External Thermal Insulation Composite System), vrlo je učinkovito. Osim toga, ventilirane fasade također se često koriste za smanjenje rizika od kondenzacije i poboljšanje toplinske učinkovitosti. Ventilirana fasada omogućuje stvaranje zračnog sloja između izolacije i vanjske obloge, čime se dodatno smanjuje prijenos topline [19].

U slučajevima kada je vanjska izolacija nepraktična ili nemoguća, toplinske mostove moguće je izolirati s unutarnje strane. Ovaj postupak uključuje postavljanje toplinske izolacije na unutarnje zidove, čime se smanjuje gubitak topline kroz mostove. Međutim, unutarnja izolacija može izazvati probleme s kondenzacijom ako nije pravilno izvedena, zbog čega se često koristi u kombinaciji s parnim branama [10].

Posebna pažnja posvećuje se spojevima, kao što su spojevi između prozora i zidova, između krova i zida te na mjestima gdje se konstrukcije spajaju. Pravilna izolacija ovih spojeva može smanjiti toplinske mostove. Na primjer, kod spojeva između balkona i unutarnjih prostorija, učinkovito rješenje je upotreba toplinskih prekidača, koji smanjuju prijenos topline između unutarnjih i vanjskih dijelova zgrade [19].



Slika 14: Grafički prikaz toplinskog mosta zbog nepravilne izvedbe toplinske izolacije [38]

Izgradnja zgrade bez toplinskih mostova gotovo je nemoguća, ali pravilnim projektiranjem i izvedbom radova utjecaj toplinskih mostova može se svesti na minimum. Važno je uzeti u obzir sve detalje tijekom gradnje, uključujući poziciju prozora, debljinu izolacije i vrstu korištenih materijala. Nakon završetka gradnje, kvalitetu izvedbe i učinkovitost toplinske izolacije moguće je provjeriti termografskim snimanjem, što omogućuje vizualizaciju toplinskih gubitaka i identificiranje potencijalnih toplinskih mostova.

Primjeri rješavanja toplinskih mostova uključuju izolaciju balkona, gdje toplinski prekidači sprječavaju prijenos topline između unutarnjih i vanjskih dijelova zgrade, te izolaciju prozora, gdje pravilno postavljanje prozora u ravninu s vanjskom izolacijom zida i korištenje toplinski učinkovitih prozorskih profila može značajno smanjiti toplinske mostove.

5. PROJEKTIRANJE GRAĐEVINSKIH OBJEKATA S OBZIROM NA VOĐENJE TOPLINE

5.1. Proračun toplinskih gubitaka

Proračun toplinskih gubitaka predstavlja temeljni korak u dizajnu i optimizaciji sustava grijanja unutar zgrada. Ovaj proračun omogućuje određivanje količine toplinske energije potrebne za održavanje zadovoljavajućih unutarnjih uvjeta tijekom hladnih razdoblja. Metodologija proračuna oslanja se na razumijevanje toplinskih karakteristika građevinskih materijala te na precizno izračunavanje gubitaka topline koji nastaju kroz različite elemente zgrade, kao što su zidovi, stropovi, podovi, prozori i vrata [22].

Prema normi HRN EN 12 831:2004, proračun toplinskih gubitaka sastoji se od analize transmisivskih i ventilacijskih gubitaka topline. Transmisivski gubici topline definiraju se kao gubici koji nastaju prijenosom topline kroz ovojnicu zgrade. To uključuje prolazak topline kroz zidove, krovove, podove i prozore, pri čemu se koristi formula (8) sa izvora [21]:

$$Q_{T,pr} = \sum(f_i \cdot A_i \cdot U_i \cdot (t_{zr,proj} - t_{ok})) \quad (8)$$

Gdje su:

- $Q_{T,pr}$ -transmisivski gubici topline,
- f_i -temperaturni korekcijski faktor za određeni građevinski element,
- A_i -površina građevinskog elementa,
- U_i -koeficijent prolaza topline za građevinski element,
- $t_{zr,proj}$ -projektna unutarnja temperatura zraka,
- t_{ok} -vanjska temperatura.

Ventilacijski gubici topline odnose se na gubitke topline uslijed ventilacije, odnosno izmjene zraka između unutarnjeg i vanjskog prostora. Proračun ventilacijskih gubitaka topline izvodi se pomoću sljedeće formule (9):

$$QV,pr = \rho_{zr} \cdot c_{p,zr} \cdot Vzr,min \cdot (tzr,proj - tok) \quad (9)$$

Gdje su:

- QV,pr -ventilacijski gubici topline,
- ρ_{zr} -gustoća zraka pri projektnoj temperaturi,
- $c_{p,zr}$ -specifični toplinski kapacitet zraka,
- Vzr,min -najmanji potreban protok zraka zbog higijenskih razloga.

Ukupni toplinski gubitci za određeni prostor zbroj su transmisijskih i ventilacijskih gubitaka, prema izrazu (10):

$$Q_{uk,pr} = Q_{T,pr} + Q_{V,pr} \quad (10)$$

Ovaj proračun služi kao temelj za određivanje veličine generatora topline i drugih komponenti sustava grijanja, omogućujući optimizaciju energetske potrebe zgrade [21].

Proračun toplinskih gubitaka također uzima u obzir specifične uvjete, poput toplinskih mostova, koji mogu povećati gubitke topline. U slučajevima gdje toplinski mostovi utječu na koeficijent prolaza topline, koristi se korekcijski faktor:

$$U_{kc} = U_k + \Delta U_{tb} \quad (11)$$

Gdje su:

- U_{kc} -korigirani koeficijent prolaza topline,
- U_k -osnovni koeficijent prolaza topline za građevni element,
- ΔU_{tb} -dodatak uslijed prisutnosti toplinskog mosta.

Uz ove faktore, proračun također može uključivati dodatne prilagodbe za prostore s visinom većom od 5 metara, gdje se ne može pretpostaviti uniformna raspodjela temperature zraka. U takvim slučajevima koristi se korekcijski faktor koji uzima u obzir utjecaj visine prostora:

$$Q_{opt,pr} = Q_{T,pr} + Q_{V,pr} \cdot f_{h,i} \quad (12)$$

Gdje je $f_{h,i}$ korekcijski faktor za utjecaj visine.

Proračun toplinskih gubitaka prema HRN EN 12 831 koristi se ne samo za određivanje potrebnog kapaciteta sustava grijanja, već i za optimizaciju energetske učinkovitosti zgrade. Pomoću ovog proračuna moguće je identificirati kritične točke u građevinskoj konstrukciji, kao što su toplinski mostovi, te poduzeti mjere za njihovo uklanjanje ili smanjenje njihovog utjecaja [19][21].

Na primjer, proračun toplinskih gubitaka može pomoći u odabiru odgovarajuće debljine i vrste izolacije za zidove, krovove i podove, čime se smanjuju ukupni gubici topline. Osim toga, proračun ventilacijskih gubitaka omogućuje optimizaciju sustava ventilacije, što dodatno smanjuje energetske troškove.

5.2. Optimalan izbor materijala

Pri izboru toplinsko-izolacijskih materijala potrebno je uzeti u obzir različite faktore, uključujući toplinsku provodljivost, cijenu, trajnost, otpornost na vlagu, te ekološki aspekt proizvodnje i upotrebe materijala [17].

Toplinska provodljivost materijala, izražena u W/mK, osnovni je parametar koji određuje koliko dobro materijal izolira toplinu. Materijali s nižom toplinskom provodljivošću, poput kamene vune i poliuretanskih pjena, efikasniji su u smanjenju toplinskih gubitaka [11].

Debljina izolacije također je bitna u ukupnoj toplinskoj učinkovitosti zgrade. Što je izolacija deblja, to je manji koeficijent prolaska topline (U) kroz građevinski element, čime se povećava toplinska zaštita zgrade. U praksi, optimalan odabir materijala i njegove debljine ovisi o specifičnim zahtjevima projekta, uključujući klimatske uvjete i regulativne zahtjeve [10].

Kamena i staklena vuna su među najčešće korištenim materijalima za toplinsku izolaciju. Ovi materijali imaju toplinsku provodljivost u rasponu od 0,03 do 0,045 W/mK, što ih čini jednim od najučinkovitijih izolatora. Zbog svoje otpornosti na

visoke temperature, često se koriste u aplikacijama gdje je požarna otpornost ključna, poput izolacije krovova i vanjskih zidova.

Eksandirani i ekstrudirani polistiren su pjenasti materijali s nešto većom toplinskom provodljivošću (oko 0,035-0,04 W/mK za eksandirani polistiren), ali su zbog svoje cijene i jednostavnosti ugradnje često preferirani u aplikacijama poput izolacije temelja, podova i ravnih krovova. Ekstrudirani polistiren je posebno koristan u uvjetima visoke vlažnosti zbog svoje male upojnosti vode [10].

Poliuretanske pjene su još jedan primjer visokoučinkovitih toplinskoizolacijskih materijala, s toplinskom provodljivošću između 0,02 i 0,035 W/mK. Ovaj materijal je otporan na vlagu i ultraljubičasto zračenje, što ga čini idealnim za specijalizirane primjene, poput industrijskih objekata i izolacija krovova. Međutim, zbog složenosti ugradnje i viših troškova, njegova primjena je obično ograničena na specifične projekte.

Ekološka održivost postaje sve važniji kriterij pri izboru materijala. Celuloza, pluto, i konoplja su primjeri alternativnih materijala koji, iako često imaju nešto slabiju toplinsku provodljivost u usporedbi s konvencionalnim materijalima, nude prednosti u pogledu ekološke prihvatljivosti. Na primjer, celulozna izolacija, koja se dobiva recikliranjem papira, ima relativno nisku cijenu i dobru toplinsku izolaciju, ali zahtijeva dodatnu zaštitu od vlage i požara [17].

Pluto i konoplja su također ekološki prihvatljivi materijali, ali zbog svoje cijene i specifičnih svojstava, koriste se u specijaliziranim projektima, često u kombinaciji s drugim materijalima kako bi se poboljšale njihove mehaničke i izolacijske karakteristike.

Optimalan izbor toplinsko-izolacijskog materijala zahtijeva balansiranje više faktora, uključujući toplinsku provodljivost, cijenu, trajnost i utjecaj na okoliš. Svaki projekt ima specifične zahtjeve koji određuju koji će materijal biti najprikladniji. Na primjer, za stambene zgrade u područjima s umjerenom klimom, kamena vuna ili eksandirani polistiren mogu biti idealni izbori, dok za industrijske objekte ili specijalizirane projekte s visokim zahtjevima za izolaciju i trajnost, poliuretanske pjene ili kombinacije alternativnih materijala mogu ponuditi najbolje rezultate [17].

5.3. Standardi i propisi toplinske zaštite zgrada

Standardi i propisi koji uređuju toplinsku zaštitu zgrada u Hrvatskoj definirani su nizom zakona, pravilnika i tehničkih propisa. Dokument koji regulira ovo područje je "Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama", kojeg je donijelo Ministarstvo zaštite okoliša, prostornog uređenja i graditeljstva. Ovaj propis utvrđuje tehničke zahtjeve koje je potrebno zadovoljiti prilikom projektiranja i građenja novih zgrada, kao i pri rekonstrukciji postojećih zgrada, s ciljem osiguranja učinkovitog korištenja energije i adekvatne toplinske zaštite [24].

Propis se primjenjuje na sve zgrade koje se griju na unutarnju temperaturu višu od 12°C, uključujući nove zgrade, kao i one koje se rekonstruiraju. On obuhvaća niz aspekata kao što su:

1. Racionalna uporaba energije i toplinska zaštita:

Propis zahtijeva da nove zgrade i rekonstrukcije budu projektirane i izgrađene na način koji osigurava minimalnu potrošnju energije za grijanje i hlađenje. To uključuje odredbe o maksimalno dopuštenoj godišnjoj potrebnoj toplinskoj energiji za grijanje, ograničenjima koeficijenta transmisivnog toplinskog gubitka, te preventivne mjere protiv pregrijavanja zgrada ljeti [24].

2. Tehnički zahtjevi za materijale i konstrukcijske elemente:

Propis specificira tehničke karakteristike građevnih proizvoda, uključujući toplinsko-izolacijske materijale, te zahtjeve za njihovim ugradnjom. Propisuju se najveće dopuštene vrijednosti koeficijenata prolaska topline za različite građevne dijelove, kao što su zidovi, krovovi, prozori i vrata [24].

3. Proračuni energetske svojstava:

Propis zahtijeva provođenje detaljnih proračuna energetske svojstava zgrade u pogledu toplinske zaštite i potrošnje energije. Ovi proračuni obuhvaćaju izračune potrebne toplinske energije za grijanje i hlađenje, uzimajući u obzir

geometrijske karakteristike zgrade, upotrebu obnovljivih izvora energije, te klimatske uvjete na lokaciji zgrade [21].

4. Održavanje zgrade:

Vlasnici zgrada su dužni održavati zgrade na način da se osigura trajno ispunjavanje tehničkih zahtjeva definiranih propisom. To uključuje redovne preglede i izvođenje radova održavanja kako bi se zgrada zadržala u stanju koje omogućuje racionalnu uporabu energije i osigurava optimalnu toplinsku zaštitu [24].

5. Iskaznica potrebne toplinske energije:

Propis uvodi obvezu izrade iskaznice potrebne toplinske energije za grijanje i hlađenje zgrade, koja je sastavni dio glavnog projekta. Ova iskaznica služi kao dokaz o ispunjavanju svih propisanih zahtjeva za toplinsku zaštitu zgrade [24].

Ovim propisom implementirane su i odredbe dvije europske direktive: Direktive 2002/91/EC o energetske svojstvima zgrada i Direktive 89/108/EEC o građevnim proizvodima, čime se osigurava usklađenost nacionalnih standarda s europskim zakonodavstvom.

Cilj ovih regulativa je poboljšanje energetske učinkovitosti zgrada, smanjenje emisija stakleničkih plinova, te povećanje korištenja obnovljivih izvora energije u zgradarstvu. U konačnici, ove mjere doprinose smanjenju troškova grijanja i hlađenja za korisnike zgrada, te poboljšanju opće kvalitete života.

6. PRAKTIČNI PRIMJERI IZGRADNJE ENERGETSKI UČINKOVITIH ZGRADA

6.1. Pasivne kuće

Pasivne kuće predstavljaju napredak u arhitekturi i građevinarstvu koji naglašava energetska učinkovitost i održivost. Naime, kao što smo ranije raspravljali o važnosti održive gradnje i energetska učinkovitih sustava, pasivne kuće nude konkretan primjer kako se ti principi mogu implementirati u praksi. Ovaj standard gradnje ne samo da smanjuje energetske potrebe zgrada već i unapređuje kvalitetu života kroz povećanu udobnost i zdravlje stanara [13] [25].



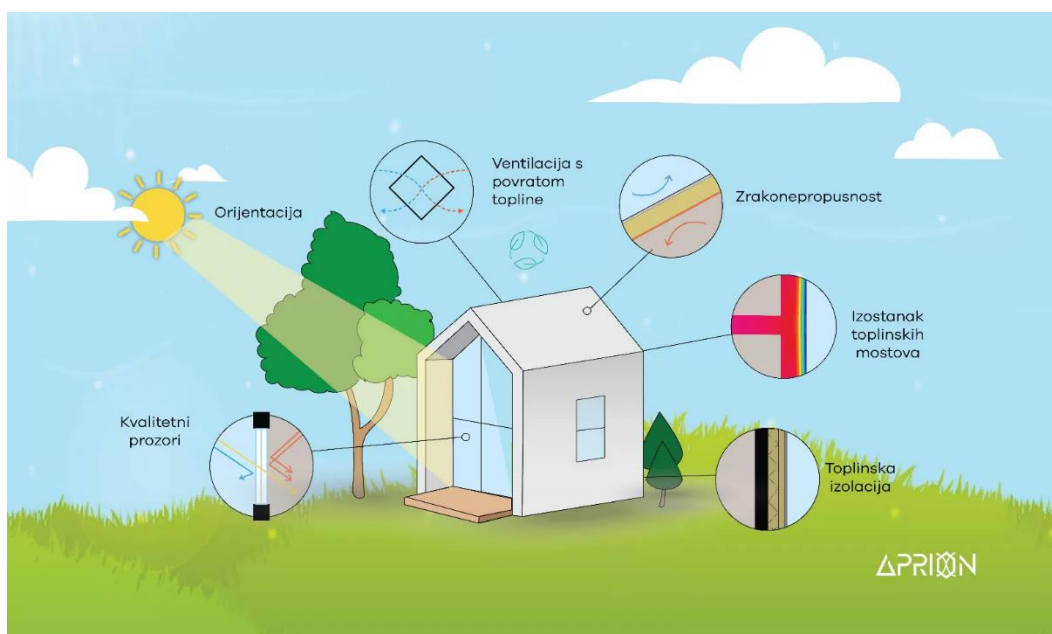
Slika 15: Model projektirane pasivne kuće [40]

Pasivna kuća, prema *Passive House Standardu*, predstavlja vrstu niskoenergetske zgrade koja se ističe izuzetno niskom potrošnjom energije za grijanje i hlađenje te visokim standardima udobnosti. Pasivne kuće koriste prirodne i tehnološke resurse kako bi održavale optimalne unutarnje klimatske uvjete bez potrebe za dodatnim

sustavima grijanja ili hlađenja. Ovaj standard gradnje potječe iz Njemačke, gdje je prvotno definiran pod nazivom *PassivHaus* [13] [25].

Za razliku od tradicionalnih zgrada, pasivne kuće se temelje na konceptu iskorištavanja pasivnih izvora energije, poput solarnih dobitaka, koji ulaze u zgradu kroz prozore i doprinose grijanju prostora. Ventilacijski sustavi s povratom topline također imaju veliki utjecaj, omogućujući značajnu uštedu energije tako što podgrijavaju ili pothlađuju svježi zrak koji ulazi u prostor koristeći energiju zraka koji se izbacuje iz zgrade. Na taj način, pasivne kuće ne samo da smanjuju energetske potrebe nego i poboljšavaju kvalitetu unutarnjeg zraka, što je izravno povezano s temama zdravlja i ugodne klime unutar objekta.

Pasivne kuće zahtijevaju minimalnu količinu dodatne energije za održavanje ugodnih unutarnjih uvjeta. Temeljni principi koji omogućuju ovakvu učinkovitost su kvalitetna i dobro izvedena toplinska izolacija, kvalitetni prozori, zrakonepropusnost, mehanička ventilacija s povratom topline i izostanak toplinskih mostova [25].



Slika 16: Temeljni zahtjevi pasivne kuće [39]

Toplinska izolacija mora osiguravati stabilne unutarnje temperature bez velikih gubitaka energije, smanjujući pritom i vanjsku buku. Ova karakteristika pasivnih kuća značajno doprinosi energetske učinkovitosti, čime se ostvaruju uštede koje smo već razmatrali u kontekstu održive gradnje [25].

Prozori u pasivnoj kući moraju biti kvalitetni jer imaju dvostruku ulogu: omogućuju ulazak solarne energije u prostor, a istovremeno sprječavaju gubitak topline.

Zrakonepropusnost podrazumijeva minimiziranje nekontroliranog gubitka grijanog ili ohlađenog zraka kroz pukotine i spojeve.

Mehanička ventilacija s povratom topline osigurava konstantan dotok svježeg zraka u prostor bez velikih energetskih gubitaka. Ova tehnologija doprinosi očuvanju kvalitete zraka u zatvorenom prostoru, smanjujući potrebu za dodatnim sustavima grijanja i hlađenja.

Pasivne kuće su praktična implementacija teorijskih principa održive gradnje. Korištenjem prirodnih izvora energije, smanjenjem potrošnje fosilnih goriva i optimizacijom dizajna zgrade, pasivne kuće smanjuju ugljični otisak i promiču održiv način života. U kontekstu šireg urbanističkog planiranja, implementacija pasivnih kuća može značajno doprinijeti smanjenju ukupnih energetskih potreba zajednice.

Integracijom naprednih tehnoloških rješenja i prirodnih izvora energije, pasivne kuće nude model za budućnost u kojoj zgrade neće biti samo funkcionalne i estetski ugodne, već i energetski neovisne i ekološki prihvatljive.

6.2. Zeleni krovovi i fasade

Zeleni krovovi i fasade predstavljaju inovativna rješenja u modernom građevinarstvu koja ne samo da doprinose estetskom izgledu zgrada, već imaju i velik utjecaj na okoliš i kvalitetu života u urbanim sredinama. Ugradnja prirodnih elemenata u građevine poboljšava klimu unutar i oko zgrade, pomaže očuvanju prirodnih staništa

i smanjuje pregrijavanje u gradovima. Zeleni krovovi su slojevite strukture koje se sastoje od hidroizolacije, drenažnih slojeva, filtra, supstrata i biljaka [25].



Slika 17: Zeleni krov [25]

Neke od njihovih prednosti su poboljšanje kvalitete zraka i smanjenje zagađenja. Biljke na zelenim krovovima apsorbiraju ugljični dioksid i druge štetne tvari iz zraka, čime direktno doprinose smanjenju zagađenja. Ovaj proces fotosinteze također pridonosi povećanju količine kisika u zraku, što je od posebne važnosti u gustim urbanim sredinama [26].

Zeleni krovovi smanjuju temperaturu u okruženju zgrade putem isparavanja vode iz biljaka. Istraživanja su pokazala da zeleni krovovi mogu smanjiti dnevne potrebe za hlađenjem zgrada za čak 75%, čime se smanjuje potrošnja energije potrebne za klimatizaciju [25].

Osim što smanjuju potrebe za hlađenjem, zeleni krovovi također pružaju dodatnu toplinsku izolaciju zgrade, što smanjuje gubitke topline tijekom hladnijih mjeseci.

Zeleni krovovi imaju sposobnost zadržavanja od 70 do 90% oborinskih voda, što smanjuje opterećenje na kanalizacijske sustave i omogućava recikliranje kišnice za potrebe navodnjavanja i drugih korisnih svrha.



Slika 18: Zeleni krov na garaži [25]

Osim ekoloških prednosti, zeleni krovovi uljepšavaju zgrade, čime povećavaju njihovu tržišnu vrijednost. Estetski privlačne zgrade s ugrađenim zelenim krovovima i fasadama privlače veći interes kupaca i stanara, što dovodi do povećanja visine zakupa i općenitog zadovoljstva korisnika [26].

Za uspješnu ugradnju zelenog krova potrebno je pažljivo planiranje koje uključuje procjenu nosivosti konstrukcije, izbor odgovarajuće hidroizolacije i slojeva te izbor biljaka koje će biti posađene. Nosivost krova mora biti dovoljna da izdrži težinu zelenog krova, koja može varirati od 60 do 150 kg/m², ovisno o vrsti vegetacije (ekstenzivni ili intenzivni zeleni krov). Osim toga, posebna pažnja treba biti posvećena hidroizolaciji kako bi se spriječilo prodiranje korijena biljaka i oštećenje konstrukcije [26].

Zeleni krovovi mogu biti ekstenzivni, poluintenzivni ili intenzivni, ovisno o vrsti biljaka i dubini supstrata. Ekstenzivni krovovi su lagani i zahtijevaju minimalno održavanje, dok intenzivni krovovi omogućuju sadnju većih biljaka, uključujući grmlje i drveće, te zahtijevaju sustave za navodnjavanje i redovito održavanje.

Zelene fasade su vertikalne strukture prekrivene biljkama koje doprinose izolaciji zgrade, smanjenju zagađenja zraka i poboljšanju estetskog izgleda. Mogu se primijeniti u vanjskim i unutarnjim prostorima, bilo kao samostojeće jedinice ili kao pokrov cijelih zidova. Osim što stvaraju ugodan vizualni dojam, zelene fasade smanjuju buku, povećavaju proizvodnju kisika i doprinose stvaranju zdravije unutarnje klime.



Slika 19: Zelena fasada [25]

Biljke koje se koriste za zelene fasade, poput puzavica, sade se u podnožju zgrade i rastu prema gore, penjući se po unaprijed postavljenoj konstrukciji. Zeleni zidovi

moгу se opremiti sustavima za navodnjavanje koji osiguravaju optimalne uvjete za rast biljaka, čak i u nepovoljnim klimatskim uvjetima.

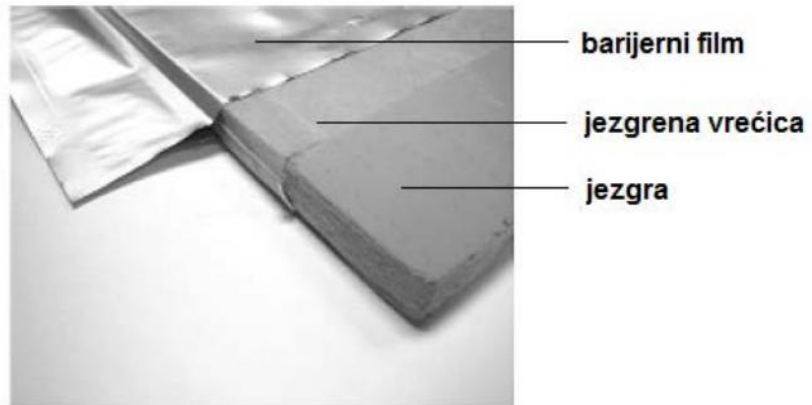
Zeleni krovovi i fasade predstavljaju napredna arhitektonska rješenja koja spajaju ekologiju i tehnologiju radi poboljšanja kvalitete života u urbanim sredinama. Kroz smanjenje zagađenja, regulaciju temperature, povećanje energetske učinkovitosti i estetske vrijednosti, zeleni krovovi i fasade značajno doprinose održivom razvoju i stvaranju zdravijih gradova. Kao što smo ranije u ovom radu analizirali važnost održivih praksi u građevinarstvu, ovi elementi predstavljaju konkretne korake prema ostvarivanju tih ciljeva [25] [26].

6.3. Primjena naprednih izolacijskih materijala

Napredni izolacijski materijali predstavljaju važnu komponentu u modernom građevinarstvu. S obzirom na sve strože zahtjeve za smanjenjem potrošnje energije i emisije stakleničkih plinova, razvoj i primjena novih izolacijskih tehnologija postaje sve bitnija [1].

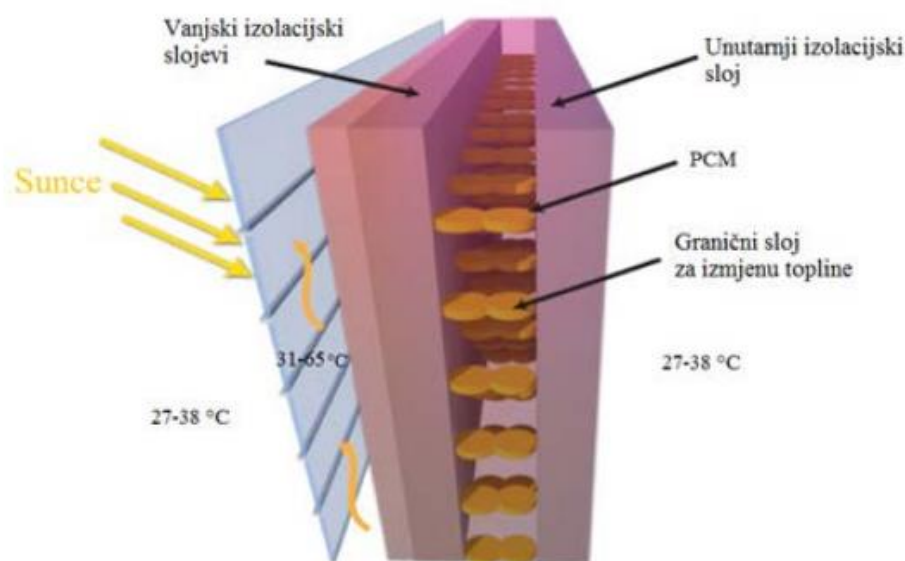
Vakuum izolacijski paneli (VIP) su jedan od najznačajnijih napredaka na području izolacijskih materijala. VIP-ovi nude superiornu toplinsku izolaciju s debljinama koje su značajno manje u usporedbi s konvencionalnim materijalima poput mineralne vune ili polistirena. Na primjer, zamjenom 40 cm tradicionalne izolacije s VIP-om debljine između 5 do 10 cm postiže se isti toplinski otpor [1].

Osnovna struktura VIP-a uključuje poroznu jezgru iz koje je izvučen zrak, a sve je omotano višeslojnom barijernom ovojnicom. Ovoj strukturi se dodaju geteri i isušivači kako bi se kontrolirala razina vlage i plinova unutar panela, čime se produžuje životni vijek ovog materijala. Međutim, jedan od izazova u primjeni VIP-a je degradacija izolacijskih svojstava tijekom vremena, zbog čega je potrebna dodatna istraživanja usmjerena na poboljšanje izdržljivosti [17].



Slika 20: VIP panel za termoizolaciju [25]

Fazno promjenjivi materijali (PCM) su inovativni materijali koji imaju sposobnost skladištenja i ispuštanja topline pri promjeni faze. PCM-ovi se koriste za regulaciju temperature u zgradama, smanjujući potrebu za aktivnim sustavima grijanja i hlađenja. Ovi materijali su posebno korisni u sustavima ventiliranih fasada, gdje pomažu u održavanju optimalne unutarnje temperature, bez obzira na vanjske klimatske uvjete [1].



Slika 21: Ventilirana fasada s PCM panelima [17]

Nano izolacijski materijali (NIM) predstavljaju sljedeći korak u razvoju visokoučinkovitih izolacijskih rješenja. Ovi materijali koriste nanotehnologiju kako bi smanjili toplinsku vodljivost na minimum. Velika prednost NIM-a je mogućnost prilagodbe na gradilištu, bez gubitka izolacijskih svojstava, što ih čini izuzetno fleksibilnim i učinkovitim u različitim građevinskim kontekstima .

ICF (Insulated Concrete Form) tehnologija koristi se za integraciju modernih izolacijskih materijala unutar betonskih zidova i ploča. Ova tehnologija omogućava kombiniranje strukturalne čvrstoće betona s naprednim izolacijskim svojstvima modernih materijala, poput VIP-a i PCM-a, čime se postiže izuzetno visoka energetska učinkovitost zgrada. ICF sustavi također omogućavaju fleksibilnost u dizajnu i konstrukciji, što ih čini idealnim za upotrebu u energetski učinkovitim obiteljskim kućama i stambenim zgradama [1].

Primjena naprednih izolacijskih materijala, kao što su VIP, PCM, NIM, i njihova integracija u sustave poput ICF-a, važna je za postizanje visoke energetske učinkovitosti u modernom građevinarstvu. Ovi materijali ne samo da smanjuju

potrošnju energije, već također doprinose smanjenju emisije stakleničkih plinova, čime sudjeluju u borbi protiv klimatskih promjena [1].

7. ZAKLJUČAK

7.1. Sažetak ključnih nalaza

Ovaj rad istražuje vođenje topline u građevinskim objektima, s posebnim naglaskom na osnovne pojmove, zakone, te toplinska svojstva različitih građevinskih materijala. Analizirani su materijali kao što su beton, opeka, drvo, čelik i različiti izolacijski materijali. Kroz primjere izgradnje energetski učinkovitih zgrada, kao što su pasivne kuće i zeleni krovovi, istaknuta je važnost pažljivog odabira materijala i projektiranja građevinskih elemenata s ciljem minimiziranja toplinskih gubitaka i optimizacije toplinske izolacije.

7.2. Važnost integracije znanja o vođenju topline u građevinske projekte

Integracija znanja o toplinskoj vodljivosti, otpornosti i izolaciji u projektiranje građevinskih objekata omogućava izgradnju zgrada koje ne samo da troše manje energije, već pružaju i ugodnije životne uvjete. Ovaj rad naglašava kako je od izuzetne važnosti da inženjeri i arhitekti primjenjuju teoretska znanja u praksi kako bi se postigli optimalni rezultati u pogledu toplinske zaštite zgrada, što je vrlo bitno za smanjenje energetske potrošnje i dugoročnu održivost.

7.3. Preporuke za buduće istraživanje i razvoj u području toplinske zaštite

Buduća istraživanja trebala bi se fokusirati na razvoj novih, ekološki prihvatljivih izolacijskih materijala koji dodatno smanjuju toplinske gubitke, a istovremeno su ekonomski isplativi. Također, potrebna su daljnja istraživanja u području integracije prirodnih elemenata u građevinske strukture, kao što su zeleni krovovi i fasade, koji mogu dodatno poboljšati energetske učinkovitost zgrada. Nadalje, potrebno je poticati razvoj naprednih tehnologija i metoda projektiranja koje omogućuju preciznije proračune toplinskih gubitaka, čime bi se poboljšala učinkovitost toplinske izolacije u novim i postojećim objektima.

8. LITERATURA

- [1] Bugarin, M. (2015). *Napredni izolacijski materijali u građevinarstvu*. Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije. Preuzeto s <https://core.ac.uk/download/pdf/197794833.pdf>.
- [2] *Prijenos topline*. Wikipedija. Preuzeto s https://hr.wikipedia.org/wiki/Prijenos_topline, pristup 15. kolovoza 2024.
- [3] *Kondukcija topline*. Wikipedija. Preuzeto s https://hr.wikipedia.org/wiki/Kondukcija_topline, pristup 15. kolovoza 2024.
- [4] *Toplinska vodljivost*. Wikipedija. Preuzeto s https://hr.wikipedia.org/wiki/Toplinska_vodljivost, pristup 15. kolovoza 2024.
- [5] *Toplinski otpor*. Wikipedija. Preuzeto s https://hr.wikipedia.org/wiki/Toplinski_otpor, pristup 15. kolovoza 2024.
- [6] *Toplinska otpornost*. Hrvatska enciklopedija. Preuzeto s <https://www.enciklopedija.hr/clanak/toplinska-otpornost>, pristup 15. kolovoza 2024.
- [7] *Koeficijent prolaska topline*. Wikipedija. Preuzeto s https://hr.wikipedia.org/wiki/Koeficijent_prolaska_topline#, pristup 15. kolovoza 2024.
- [8] *Toplinska difuzivnost*. Struna. Preuzeto s <http://struna.ihjj.hr/naziv/toplinska-difuzivnost/7334/>, pristup 15. kolovoza 2024.
- [9] Galić, A. (2014). *Mjerenje fizikalnih svojstava poliuretanske žbuke*. Preuzeto s <https://www.hrcaak.srce.hr/clanak/191218>, pristup 16. kolovoza 2024.
- [10] Hidroprofil. *Toplinska izolacija*. Preuzeto s <https://hidroprofil.hr/toplinska-izolacija/>, pristup 16. kolovoza 2024.
- [11] Buildex. *Toplinska vodljivost izolacijskih materijala*. Preuzeto s <https://buildex.decorexpro.com/hr/utepljenje/teploprovodnost-uteplitelej.html>, pristup 16. kolovoza 2024.
- [12] Ibuilders. *Toplinska vodljivost i toplinski kapacitet opeke*. Preuzeto s <https://ibuilders-hr.techinfus.com/kirpich/teploprovodnost-i-teploemkost/>, pristup 16. kolovoza 2024.
- [13] Dizajn ETC. *Moć toplinske izolacije*. Preuzeto s <https://www.dizajnetc.com/moc-toplinske-izolacije/>, pristup 16. kolovoza 2024.

- [14] Struna. *Vodljivost topline drva*. Preuzeto s <http://struna.ihjj.hr/naziv/vodljivost-topline-drva/39177/>, pristup 16. kolovoza 2024.
- [15] Čelik. Enciklopedija. Preuzeto s <https://www.enciklopedija.hr/clanak/celik>, pristup 16. kolovoza 2024.
- [16] *Toplinska izolacija*. Wikipedija. Preuzeto s https://hr.wikipedia.org/wiki/Toplinska_izolacija, pristup 16. kolovoza 2024.
- [17] Beihuafactory. *What Will Affect the Thermal Conductivity of Insulation Materials?*. Preuzeto s <http://hr.beihuafactory.com/news/what-will-affect-the-thermal-conductivity-of-insulation-materials/>, pristup 17. kolovoza 2024.
- [18] Jucos Firebrick. *What Are the Internal Factors That Affect the Thermal Conductivity of Insulation Materials?*. Preuzeto s <https://hr.jucosfirebrick.com/info/what-are-the-internal-factors-that-affect-the-99057131.html>, pristup 17. kolovoza 2024.
- [19] Zgradonačelnik. *Toplinski mostovi - što su, zašto nastaju i koje su vrste?*. Preuzeto s <https://www.zgradonacelnik.hr/savjeti/toplinski-mostovi-sto-su-zasto-nastaju-i-koje-su-vrste/1414>, pristup 17. kolovoza 2024.
- [20] Nižetić, S. (2024). *Grijanje i klimatizacija*. Split: Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje.
- [21] *Proračun gubitaka topline prema HRN EN 12 831*. (2024). Preuzeto iz iki.webador.com, pristup 17. kolovoza 2024.
- [22] *Proračun gubitaka topline prema HRN EN 12 831:2004*. (2024). Preuzeto iz pdfcoffee.com, pristup 17. kolovoza 2024.
- [23] Vrančić, T. (2005). *Toplinskoizolacijski materijali u graditeljstvu*. Građevinar, 57(10), 829-835. Preuzeto s <http://www.casopis-gradjevinar.hr/assets/Uploads/JCE-57-2005-10-10.pdf>, pristup 17. kolovoza 2024.
- [24] Ministarstvo zaštite okoliša, prostornog uređenja i graditeljstva. (2008). *Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama*. Narodne novine. Pristup 17. kolovoza 2024., s https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2008_09_110_3240.html.
- [25] emajstor.hr. *Zeleni krov – prednosti, planiranje i održavanje*. Pristup 17. kolovoza 2024., s [https://www.emajstor.hr/clanak/256/zeleni_krov -
_prednosti_planiranje_i_odrzavanje](https://www.emajstor.hr/clanak/256/zeleni_krov_-_prednosti_planiranje_i_odrzavanje)

- [26] ekotehnologije.com. *Sistemi zelenih fasada, zidova i krovova*. Pristup 17. kolovoza 2024., s <https://ekotehnologije.com/view-more/sistemi-zelenih-fasada-zidova-i-krovova/90>
- [27] MAP-ing. (n.d.). *Termografija u zgradarstvu*. Preuzeto 12. rujna 2024., s <https://map-ing.hr/termografija-u-zgradarstvu/>
- [28] Thermal Engineering. (n.d.). *What is Fourier's law of thermal conduction – definition*. Preuzeto 12. rujna 2024., s <https://www.thermal-engineering.org/what-is-fouriers-law-of-thermal-conduction-definition/>
- [29] Electronics Cooling. (2003, studeni). *The thermal conductivity of moist air*. Preuzeto 12. rujna 2024., s <https://www.electronics-cooling.com/2003/11/the-thermal-conductivity-of-moist-air/>
- [30] Viking. (n.d.). *Prolaz topline – proračun energije*. Preuzeto 12. rujna 2024., s https://viking.hr/proracun-energije/prolaz_topline
- [31] Ikoma.hr. (n.d.). *Fasada 12 cm s EPS stiroporom – fasadni sustav Samoborka*. Preuzeto 12. rujna 2024., s <https://www.ikoma.hr/hr/fasade-143/fasadni-sustavi-144/fasada-12-cm-s-eps-stiroporom-fasadni-sustav-samoborka-11074/>
- [32] Potkrovlje.ba. (2022, lipanj). *Odgovaramo na vaša pitanja: Razlika između staklene i kamene vune*. Preuzeto 12. rujna 2024., s <https://potkrovlje.ba/2022/06/odgovaramo-na-vasa-pitanja-razlika-izmedu-staklene-i-kamene-vune/>
- [33] Podovi.org. (n.d.). *Ekspandirani polistiren – termoizolacija*. Preuzeto 12. rujna 2024., s <https://www.podovi.org/ekspandirani-polistiren-termoizolacija/>
- [34] House DecorexPro. (n.d.). *Poliuretanska montažna pjena*. Preuzeto 12. rujna 2024., s <https://house.decorexpro.com/hr/montazhnaya-pena/poliuretanovaya/>
- [35] Wikipedia. (n.d.). *Termoizolacija [Slika pasivne kuće]*. Preuzeto 12. rujna 2024., s https://sh.wikipedia.org/wiki/Termoizolacija#/media/Datoteka:Passive_House_sche_me_1_multilingual.svg
- [36] Terrabija. (n.d.). *Izolacija i zaštita – savjeti i vodič*. Preuzeto 12. rujna 2024., s <https://terrabija.com/1777/>
- [37] Aluisometric. (n.d.). *PVC stolarija – prozori*. Preuzeto 12. rujna 2024., s <http://aluisometric.hr/pvc-stolarija/prozori/>
- [38] Wikipedija. (n.d.). *Toplinski most*. U *Wikipedia*. Preuzeto 15. rujna 2024. s https://hr.wikipedia.org/wiki/Toplinski_most

- [39] eGradnja. (n.d.). *Što je pasivna kuća i koje su sve njene prednosti. eGradnja.* Preuzeto 15. rujna 2024. s <https://egradnja.hr/vijesti/sto-je-pasivna-kuca-i-koje-su-sve-njene-prednosti-316>
- [40] Mozaweb. (n.d.). *Pasivna kuća. Mozaweb.* Preuzeto 15. rujna 2024. s https://www.mozaweb.com/hr/Extra-3D_scene-Pasivna_kuca-209810