

Inovativni materijali i tehnologije ovojnica zgrada

Bugarin, Mirna

Undergraduate thesis / Završni rad

2015

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:

University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:123:060128>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-24**



Repository / Repozitorij:

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



**SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

ZAVRŠNI RAD

Mirna Bugarin

Split, 2015

**SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

Inovativni materijali i tehnologije ovojnica zgrada

Završni rad

Split, 2015

Inovativni materijali i tehnologije ovojnice zgrada

Sažetak

U ovom je radu dan pregled modernih, inovativnih izolacijskih materijala koji već imaju efektivnu primjenu u građevinarstvu, kao i novi materijali i inovativne tehnologije u procesu istraživanja, koji će vrlo skoro zadovoljiti visoko postavljene kriterije energetske učinkovitosti zgrada.

Predstavljeni su "STATE-OF-THE-ART" materijali, poput Vakuum Izolacijskih Panela (VIP), Fazno promjenjivih materijala (PCM), Aerogela i Plinom ispunjenih ploča, koji su već u primjeni.

Nadalje, predstavljeni su *napredni izolacijski materijali* (advanced insulation material-AIM), poput Vakuum Izolacijskih Materijala (VIM), Plin Izolacijskih Materijala (GIM), Nano Izolacijskih Materijala (NIM) i Dinamičkih Izolacijskih Materijala (DIM). Dakle, nanotehnologija i mogućnosti toplinskog izoliranja zgrada materijalima sutrašnjice su istraženi ovim radom. Veći naglasak je stavljen na Vakuum Izolacijske Panele, Fazno promjenjive materijale, kao i Nano Izolacijske Materijale.

Analizirana je i ICF (Insulation Concrete Form) tehnologija izvedbe betonskih zidova i ploča sa stalnim izolacijskim oplatom, kojeg u konceptu energetski efikasnih obiteljskih kuća realizira tvrtka CEMGRA.d.o.o (CEMEX d.d, Kaštel Sućurac), s gledišta njihove energetske učinkovitosti. Predložene su i moguće konstrukcijske integracije novih izolacijskih materijala, konkretno Vakuum Izolacijskih Panela u taj sustav, koje svakako mogu biti teme novih projekata i istraživanja u ovoj oblasti. Također su dane ocjene mogućnosti primjene i drugih izolacijskih materijala kao PCM-a, integriranih u iste.

Napravljena je usporedba s tradicionalnim izolacijskim materijalima te istaknute prednosti, nedostaci i mogućnosti poboljšanja novih materijala.

Pojašnjena je i fizika i mogući načini prijenosa topline, kako bi se lakše razumio koncept djelovanja novih izolacijskih materijala.

Ključne riječi: Izolacijski materijali, VIP paneli, PCM materijali, ovojnice zgrada, ICF tehnologija

Innovative materials and technologies of building envelopes

Abstract:

This paper gives an overview of modern, innovative insulation materials that already have effective application in the construction industry, as well as new materials and innovative technologies in the research, which will soon meet the high set criteria of energy efficiency of buildings.

Featured are " STATE-OF-THE-ART" materials such as Vacuum insulation panels (VIP), Phase Changing Materials (PCM), Aerogel and Gas Filled Panels, which are already in use.

Furthermore, presented an *Advanced Insulation Materials* (Advanced Insulation Material-AIM), such as Vacuum Insulation Materials (VIM), Gas Insulation Materials (GIM), Nano Insulation Materials (NIM) and Dynamic Insulation Materials (DIM). Thus, nanotechnology and possibilities of thermal insulation of building with materials of the future are explored in this paper. Greater emphasis is placed on the Vacuum Insulation Panels, Phase Changing Materials, and Nano Insulation Materials.

ICF (Insulation Concrete Form) technology performance of concrete walls and slabs with constant insulation formwork was analyzed, which in the concept of energy-efficient single-family houses realizes CEMGRA.doo company (CEMEX Inc., Kastel Sucurac), from the their viewpoint of energy efficiency. Possible structural integration of new insulating material in the system are presented, in particular Vacuum Insulation Panels, which can certainly be a topic of new projects and research in this field. The assessment of application possibilities of other insulating materials, such as PCM, integrated in the same, are also presented.

A comparison with traditional insulation materials are featured, as well as the advantages, disadvantages and the possibilities of improving new materials.

The physics and ways of heat transfer are clarified, in order to understand the concept of action of new insulation materials.

Keywords: Insulating materials, VIP panels, PCM materials, building envelope, ICF technology

SADRŽAJ

1.	Uvod.....	1
2.	Energija i fizika zgrade.....	3
2.1	Svojstva vlažnog zraka.....	3
2.1.1	Izvori vlage i kontrola vlažnosti zraka u prostorijama.....	4
2.1.2	Kondenzacija vodene pare na zidovima.....	5
2.1.3	Difuzija vlage.....	5
2.1.4	Kapilarno kretanje vlage.....	7
2.2	Osnovne mjerne jedinice prijenosa topline.....	8
2.3.	Temperatura i toplina.....	8
2.3.1	Mehanizmi prijenosa topline.....	8
2.3.1.1	Kondukcija ili provođenje.....	9
2.3.1.2	Konvekcija ili komešanje.....	11
2.3.1.3	Zračenje ili radijacija.....	12
2.4.	Toplinska provodnost, koeficijent prolaska topline, toplinski otpor.....	13
2.4.1	Korekcija koeficijenta prolaska topline.....	16
3.	Tradicionalni izolacijski materijali.....	16
3.1.	Ekspandirani polistiren (EPS).....	17
3.2.	Ekstrudirani polistiren (XPS).....	17
3.3.	Mineralna vuna.....	18
3.4.	Poliuretanske pjene (PUR i PIR).....	19
4.	Moderni izolacijski materijali visokih performansi ("THE-STATE-OF-THE-ART" materijali).....	20
4.1.	Aerogel.....	20

4.1.1. Aerogel stakla.....	22
4.2. Plinom ispunjene ploče (Gas Filled Panels-GFP).....	23
4.3. Fazno promjenjivi materijali (Phase Change Material-PCM).....	25
4.3.1. Latentna i senzibilna toplina.....	25
4.3.2. Kako PCM funkcionira.....	26
4.3.3. PCM u zgradama.....	27
4.3.3.1. Organski PCM.....	29
4.3.3.2. Anorganski PCM.....	29
4.3.3.3 BioPCM.....	29
4.3.4. Fizikalne karakteristike PCM-a.....	30
4.3.5. Način ugradbe PCM-a u zgrade.....	30
4.4. Vakuum izolacijski panel (Vacuum Insolation Panel-VIP).....	31
4.4.1. Osnovna konstrukcija VIP-a.....	32
4.4.2. Jezgri materijal.....	33
4.4.2.1. Pjena u jezgri VIP-a.....	34
4.4.2.2. Prah u jezgri VIP-a.....	35
4.4.2.3. Staklena vlakna u jezgri VIP-a.....	35
4.4.3. Materijali za ovojnice VIP-a.....	35
4.4.3.1. Zaštitni sloj.....	36
4.4.3.2. Barijerni sloj.....	37
4.4.3.3. Brtveni sloj.....	37
4.4.4. Apsorpcijski materijali: geteri, isušivači i tvari za zamučivanje.....	37
4.4.5. Nedostaci VIP-a.....	38
4.4.5.1. Životni vijek VIP-a i definicija vijeka trajanja.....	38

4.4.6. Veličina panela.....	41
4.4.7. Toplinske značajke VIP-a -toplinski mostovi.....	41
4.4.8. Vacuum ostakljenje.....	44
5. Integracija modernih izolacijskih materijala u modularne zidove – ICF (insulated concrete form) tehnologija korištenja betona sa stalnim izolacijskim oplatama.....	45
5.1. Usporedna analiza Quad-Lock "Regular" sustava sa i bez Vakuum izolacijskih ploča.....	49
6. Zahtjevi toplinske izolacije sutrašnjice.....	51
7. Napredni izolacijski materijali sutrašnjice.....	52
7.1. Vakuum Izolacijski Materijali (VIM).....	52
7.2. Plin Izolacijski Materijali (GIM).....	53
7.3. Dinamički Izolacijski Materijali (DIM).....	53
7.4. Nano Izolacijski Materijali (NIM).....	53
7.4.1. Knudsenov učinak-nano pore NIM-a.....	56
7.4.2. Ukupna toplinska provodnost kod NIM-a.....	56
7.4.3. Aktivni nano premazi na “pametnom” staklu (smart glass).....	56
7.5 Potencijal sadašnji i budućih "STATE-OF-THE-ART" materijala.....	57
8. Zaključak.....	57
9. Popis literature.....	58

1. UVOD

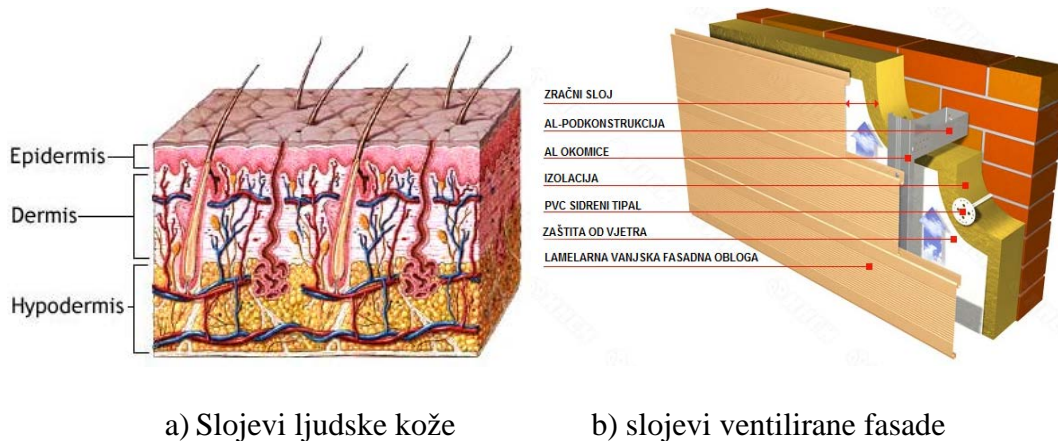
Svakodnevno smo svjedoci neočekivanih i neželjenih efekata klimatskih promjena koje je nekontroliranim odnosom prema prirodi, tj. prekomjernim emisijama stakleničkih plinova, prouzročio čovjek. Zgradarstvo troši više energije nego bilo koji drugi sektor, točnije oko 40% ukupne proizvedene energije u EU. Većina energije koja se troši, proizvodi se izgaranjem fosilnih goriva, što sektor zgradarstva čini i najvećim emiterom stakleničkih plinova (CO₂).

U kontekstu politike kontrole globalnih klimatskih promjena, poboljšanje energetske učinkovitosti budućih, ali i postojećih objekata, predstavlja veliki izazov i potencijal za uštedu energije. S toga se kroz razne projekte na nivou Europe, kao i cijeloga svijeta, potiče razvoj ekološki održive gradnje. Direktive EU komisije neprestano postrožuju norme i kriterije za projektiranje i izvedbu zgrada s gledišta uštede energije potrebne za grijanje i hlađenje, te u tom smislu već sada uvjetuje da od 2018.g. moraju biti projektirane, odnosno 2020.g. izvedene ili renovirane u rangu približno nul energetske efikasne zgrade, s godišnjom potrošnjom energije ne većom od 15-20 kWh/m²a'. U tom smislu se prilagođavaju i odgovarajući HR Normativi. Među njima posebno treba istaknuti novi Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti zgrada (NN 97/2014)

Sve to zahtjeva planiranje i izvođenje objekata održivim građenjem i materijalima, čime se smanjuje buka, smetnje i otpad u urbanim sredinama, smanjuje potrošnja energije, a time i utjecaj na okoliš (lokalno i globalno). Održive zgrade su ekonomski učinkovite, ekološki prihvatljive i štite prirodne resurse.

S gledišta toplinske izolacije, održiva gradnja znači omogućavanje udobnog životnog okoliša s minimalnim troškovima za grijanje i hlađenje. Smanjenje troškova grijanja i hlađenja izravno je povezano s potrebom za energijom. Drugi važan faktor za održivu gradnju u smislu toplinske izolacije je ekonomska isplativost. Smanjena potrošnja energije u stambenim zgradama može uštedjeti dodatni novac koji se može koristiti za podizanje kvalitete života. U tom smislu, veliku ulogu u uštedi energije čine upravo *ovojnice zgrada*, jer predstavljaju sučelje između okoliša i unutrašnjeg prostora. Neželjeni se transferi topline kroz ovojnice nastoje svesti na minimum što dovodi do razvoja novih tehničkih sustava ovojnica zgrada koje zbog njihovog inovativnog i sofisticiranog karaktera ponekad zovu i "pametnim ovojnicama zgrada".

Pametna ovojnica zgrade postaje njezina „koža“ koja prima toplinu sunca, ventilira se, sprječava gubitak njezine unutarnje topline, a sve češće postaje i sam „proizvođač“ energije.



a) Slojevi ljudske kože

b) slojevi ventilirane fasade

Slika 1. Analogija struktura slojeva ljudske kože i ventilirane fasade, [5]

Sve nove zgrade moraju biti približno nulte potrošnje energije, pa se stoga pred ovojnicu zgrada stavlja i nezaobilazna obveza da iste budu konstrukcijski sustavi za uštedu, pohranu i generiranje energije. Sofisticirana se rješenja inovativnih tehničkih koncepata ovojnice zgrada kreću od uporabe novih suvremenih nanomaterijala do interaktivnih dinamičkih struktura fasada kojima se udovoljava tim zahtjevima.

U ovom radu je dan pregled nekih od suvremenih trendova upotrebe materijala za pametne fasade kao ovojnice zgrada, način njihova funkcioniranja, karakteristike tehničke izvedbe te ekonomske prednosti u konačnici.

2. ENERGIJA I FIZIKA ZGRADE

2.1. Svojstva vlažnog zraka

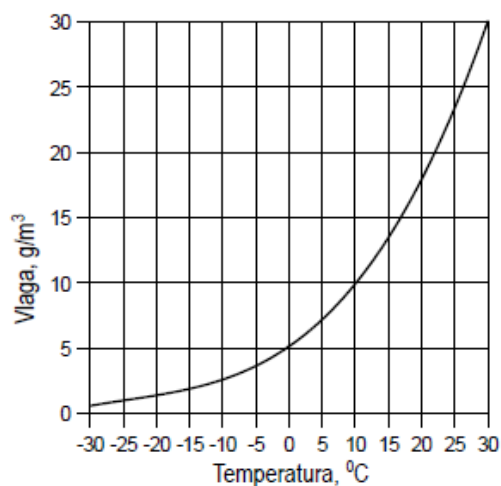
Vlažni zrak je smjesa suhog zraka i vlage. Vlaga se u zraku može pojaviti u tri agregatna stanja: kao para, kapljevina ili led. Ako se u vlažnom zraku vlaga pojavljuje samo u obliku pregrijane pare, takav zrak se naziva nezasićenim vlažnim zrakom. Ako se uz paru pojavljuje i vlaga u obliku kapljevine i/ili leda, radi se o zasićenom vlažnom zraku. Za opisivanje stanja vlažnog zraka koristi se *sadržaj vlage* koji predstavlja omjer između mase vlage sadržane u vlažnom zraku i mase suhog zraka, [1]:

$$x = \frac{m_w}{m_{sz}} \quad (1)$$

m_w - masa vlage sadržana u vlažnom zraku (kg_w), [1].

m_{sz} - masa suhog zraka (kg_{sz}), [1].

Količina vlage koja je u zraku sadržana u obliku vodene pare, pri određenoj temperaturi, ne može biti veća od maksimalne. Ta je maksimalna količina određena ukupnim tlakom vlažnog zraka i njegovom temperaturom. Porastom temperature zraka raste maksimalna količina vlage koja može biti sadržana u vlažnom zraku. Sadržaj vlage u nezasićenom vlažnom zraku može se naznačiti i u g/m^3 (gramima vodene pare po kubičnom metru vlažnog zraka), što predstavlja *apsolutnu vlažnost*, [1].



Slika 2. Dijagram ovisnosti maksimalne vodene pare u zraku o njegovoj temperaturi ($p=1\text{bar}$), [1].

Relativna vlažnost predstavlja omjer stvarne apsolutne vlažnosti zraka i maksimalno moguće apsolutne vlažnosti (zasićen zrak). Može se iskazati i kao omjer parcijalnog tlaka vodene pare sadržane u zraku p_a i tlaka zasićenja pare p'_s pri istoj temperaturi ϑ . Izražava se u postocima (%), od 0% (potpuno suhi zrak) do 100% (potpuno zasićeni zrak), [1].

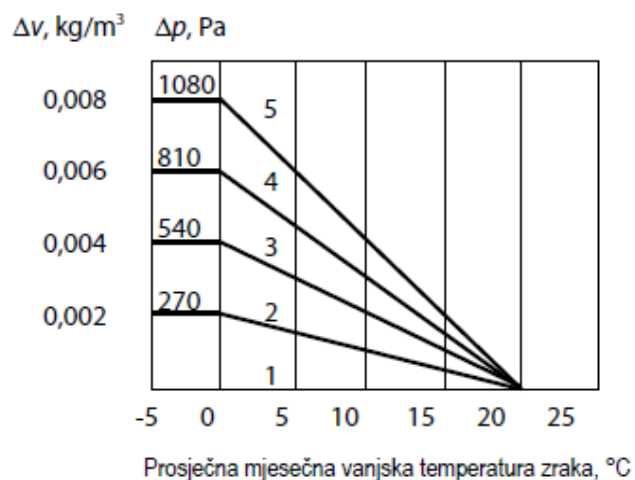
$$\varphi = \frac{p_a(\vartheta)}{p'_s(\vartheta)} \quad (2)$$

2.1.1. Izvori vlage i kontrola vlažnosti zraka u prostorijama

Smanjena vlažnost zraka, pogotovo u grijanim prostorima u zimskom razdoblju, ima negativne učinke na zdravlje ljudi, čime se smanjuje i osjećaj udobnosti boravka ljudi u tom prostoru. S druge strane prekomjerna vlaga u zraku, na hladnim površinama vanjskih zidova prostorije, može dovesti do kondenzacije i nastanka plijesni, gljivica i neugodnih mirisa. Preporučuje se da, pri normalnim sobnim temperaturama, relativna vlažnost bude u rasponu od 35% do 60%, [1].

Izvori su vlage različiti, od samih ljudi kao velikih izvora vlage u zraku, do difuzije vlage kroz materijal zidova prostorija, pri čemu smjer transporta vlage ovisi o stanjima zraka s unutarne i vanjske strane zida.

Prema tome, definira se pet razreda vlažnosti unutarnjih prostora kojima se propisuje maksimalan sadržaj vlage u prostorima različite namjene, u ovisnosti o vanjskoj temperaturi zraka.



Slika 3. Dijagram ovisnosti razreda unutarnje vlažnosti o vanjskoj temperaturi zraka, [1].

2.1.2. Kondenzacija vodene pare na zidovima

Dva osnovna problema koja se javljaju kod građevinskih konstrukcija su kondenzacija vodene pare iz zraka na unutarnjim površinama vanjskih zidova i kondenzacija vodene pare u unutarnjim slojevima građevinskih elemenata, [1].

Do kondenzacije vodene pare na unutarnjim površinama vanjskih zidova građevina dolazi zbog neodgovarajuće izolacije vanjskih zidova, kao i pojava *toplinskih mostova*, [1].

Toplinski most predstavlja ograničeno područje u vanjskom pojasu kod kojeg, uslijed promjene materijala, debljine ili geometrije građevnog dijela, za razliku od neprekinutih dijelova, dolazi do povećanog toplinskog toka kroz omotač. Razlikujemo *konstrukcijske, geometrijske, konvektivne i toplinske mostove uvjetovane okolinom*, [1]

Kada je otpor prolasku topline vanjskih zidova mali, vanjska i unutarnja temperatura zraka teže izjednačenju. Ako temperatura unutarnje površine vanjskog zida padne ispod temperature rosišta, vlaga iz zraka će kondenzirati na površini zida, [1].

Kondenzacija vodene pare smanjuje kvalitetu građevine. Uzrokuje brojne negativne posljedice na stjenkama unutarnjih zidova, kao što je povećanje toplinske provodnosti materijala, degradacija mehaničkih svojstava i propadanje strukture materijala, moguća pojava korozije itd, [1].

Da bi se kondenzacija spriječila, uz pravilan odabir debljine i strukture građevnih dijelova, najznačajnija je odgovarajuća toplinska izolacija unutarnjeg i vanjskog prostora. Svakako, pažnju treba posvetiti i pravilnoj izvedbi toplinskih mostova, [1].

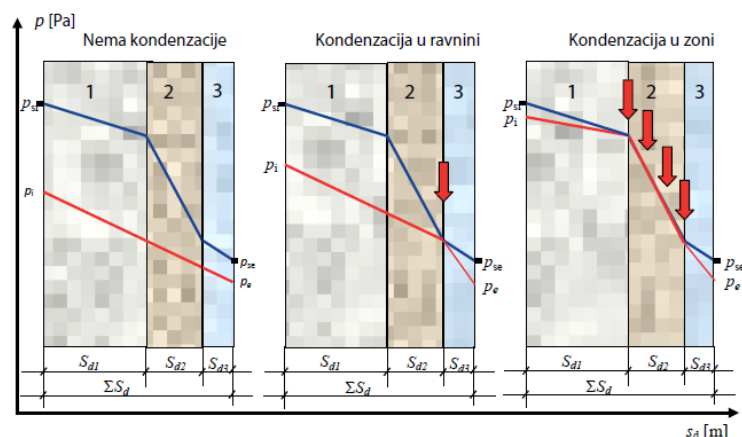
2.1.3. Difuzija vlage

Difuzija vlage je proces, kojim se vlaga, tj. molekule vode, kreću s mjesta više koncentracije prema mjestu niže koncentracije. Koncentracija vodene pare u zraku proporcionalna je njezinom parcijalnom tlaku u zraku, pa se difuzija može računati i preko ove veličine. Do difuzije dolazi uslijed razlike u parcijalnim tlakovima vodene pare s dvije strane elementa, a proces se odvija u smjeru nižeg parcijalnog tlaka. Intenzitet difuzije ovisi i o strukturi građevnog materijala elementa. Svaki materijal karakterizira koeficijent difuzijske vodljivosti vodene pare δ . Različiti materijali imaju različite otpore difuziji vodene pare, te u većini slučajeva materijali koji su dobri toplinski izolatori, su ujedno loši difuzni izolatori i obrnuto, [1].

Difuzija vodene pare kroz elemente, sama po sebi nije štetna. Tek kondenzacijom vodene pare u slojevima elementa, dolazi do negativnih utjecaja. Stoga je potrebno utvrditi dolazi li i na kojim mjestima unutar slojeva do kondenzacije. To se utvrđuje određivanjem raspodjele parcijalnih tlakova vodene pare kao i raspodjele tlakova zasićenja po presjeku elementa. Na mjestima za koje se utvrdi da bi parcijalni tlakovi vodene pare bili viši od tlakova zasićenja za odgovarajuće temperature, očekuje se pojava kondenzacije vlage unutar građevnog elementa. Naime, pojava se kondenzacije procjenjuje tako da se za promatrani element najprije provede proračun transporta topline, uvažavajući rubne uvjete, toplinske i geometrijske značajke pojedinih slojeva. Rezultat je temperaturna raspodjela unutar elementa. Temeljem dobivene temperaturne raspodjele i krivulje napetosti za vodu (p, ϑ dijagram), svakoj temperaturi se pridružuje odgovarajuća vrijednost tlaka zasićenja, čime se dobije raspodjela tlakova zasićenja kroz profil. Tlakovi zasićenja se ne mijenjaju linearno, zbog čega je potrebno očitati nekoliko tabličnih vrijednosti unutar pojedinih slojeva elementa, unutar kojeg se temperaturni profil mijenja linearno, [1].

Krivulja raspodjele parcijalnih tlakova vodene pare određuje se na način da se izjednači odnos pada parcijalnog tlaka za pojedini sloj prema ukupnom padu tlaka s obje strane građevinskog elementa i odnos otpora difuzijskoj propusnosti vodene pare promatranog sloja prema ukupnom otporu difuzijskoj propustljivosti elementa. Tako određena raspodjela se ucrtava preko prethodno određene raspodjele tlakova zasićenja, [1].

Ako krivulja parcijalnih tlakova vodene pare ni na jednom mjestu unutar elementa ne presijeca krivulju tlakova zasićenja, tada za dane uvjete unutar građevinskog elementa ne dolazi do kondenzacije difundirane vodene pare (slika-lijevo). Ako se krivulje presijecaju, doći će do kondenzacije vodene pare i to na cijelom području presijecanja, [1].



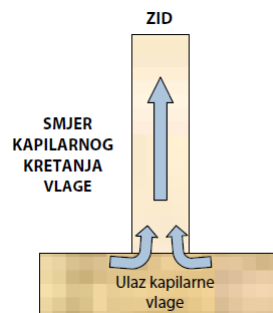
Slika 4. Različiti slučajevi stanja vlage u presjecima građevinskih elemenata, [1].

2.1.4. Kapilarno kretanje vlage

Vlaga se u građevinskim dijelovima može kretati i kapilarno. Količina kapilarne vlage ovisit će o poroznosti građevnog materijala i vlažnosti okolnog tla. Dakle, materijali velike poroznosti, u kojima je veliki udio pora zraka, će najviše upijati. U strukturi takvih poroznih materijala je velik broj finih cjevčica kroz koje se zemna vlaga kapilarno transportira kroz strukturu. Kapilarni transport uzrokuje razlika polariteta zidova (pozitivan) i vlažnog tla (negativan) uslijed kojeg dolazi do pojave privlačenja molekula iz tla i materijala, a upravo velika površinska napetost molekula vode iz zemne vlage, omogućuje transport molekula vode kroz kapilarni sustav u strukturi materijala i pojavu povećane vlage u zidovima, [1].

Ovakvo kretanje vlage nastoji se spriječiti u fazi izgradnje objekta odgovarajućim izolacijskim rješenjima (horizontalnom izolacijom), [1].

Tehnike koje se danas koriste radi eliminacije posljedica koje stvara kapilarna vlaga, dijele se na one koje presijecaju penjanje vlage kroz konstrukciju i one koje ne sprječavaju njezinu prisutnost unutar zidova, ali sprječavaju njeno štetno djelovanje na površini zida, [1].



Slika 5. Kapilarno dizanje vlage u zidovima, [1].

2.2. Osnovne mjerne jedinice prijenosa topline

Za transport topline i vlage značajne su fizikalne veličine prikazane u tablici 1.

Tablica 1. Osnovne mjerne jedinice prijenosa topline, [1].

Veličina	Oznaka fizikalne veličine	Mjerna jedinica
Temperatura	T, ϑ	K, °C
Tlak	p	Pa
Volumen	V	m ³
Gustoća	ρ	kg/m ³
Debljina sloja	d	m
Maseni protok	q_m	kg/s
Volumenski protok	q_v	m ³ /s
Površina	A	m ²
Toplina	Q	J
Toplinski tok	Φ	W = J/s
Gustoća toplinskog toka	q	W/m ²
Toplinska provodnost	λ	W/(m · K)
Specifični toplinski kapacitet	c	J/(kg · K)
Kinematička žilavost	μ	Pa · s
Temperaturna provodnost	a	m ² /s
Koeficijent prijelaza topline	h	W/(m ² · K)
Koeficijent prolaska topline	U	W/(m ² · K)
Projektna vrijednost toplinskog otpora	R	(m ² · K)/W

2.3. Temperatura i toplina

-*Temperatura*: Dva tijela će biti u međusobnoj toplinskoj ravnoteži onda i samo onda ako imaju iste temperature.

Prema molekularnoj teoriji, temperatura je u izravnoj vezi s prosječnom brzinom gibanja molekula i kako ta brzina raste, raste i temperatura i obratno.

-*Toplina ili toplinska energija* je ona energija koja se izmjenjuje između dva tijela ili unutar samog tijela uslijed temperaturnih razlika.

Mjerna jedinica za toplinu je J (Joul), a oznaka je Q

Toplina izmijenjena u jedinici vremena naziva se *toplinski tok* Φ , mjerna jedinica je J/s=W (Watt)

2.3.1. Mehanizmi prijenosa topline

Postojanje temperaturnih razlika unutar tijela ili između više tijela osnovni je uvjet za prijenos topline. Prijenos topline općenito je praćen promjenom temperature.

Razlikuju se tri načina transporta topline:

1.kondukcija ili provođenje

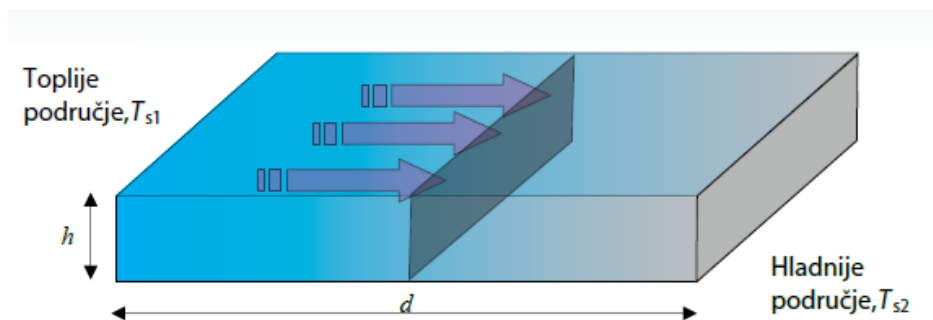
2.konvekcija ili komešanje

3.radijacija ili zračenje

2.3.1.1 Kondukcija ili provođenje

To je način izmjene topline na razini atoma i molekula njihovim direktnim dodirrom. Molekule više temperature imaju veću energiju titranja te će u dodiru s molekulama niže temperature predati dio svoje energije, što će uzrokovati njihovo usporenje

Kondukcija se uglavnom događa u krutim tijelima, no može se pojaviti i kod tekućina (kapljevine ili plinova), kada se one nalaze u vrlo malom prostoru, što se naziva kondukcija plina.



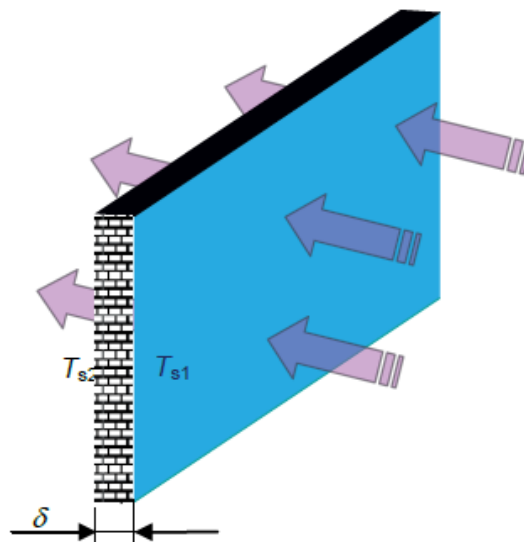
Slika 6. Provođenje topline, [1].

Fourierov zakon

Za stacionarno (vremenski nepromjenjivo) provođenje topline kroz ravni homogeni sloj, bez postojanja toplinskih izvora, te uz pretpostavku da je toplinska provodnost materijala konstantna, toplinski tok izmijenjen provođenjem računa se prema, [1]:

$$\Phi = \frac{(T_{s1} - T_{s2})}{\frac{d}{\lambda}} \cdot A \quad (3)$$

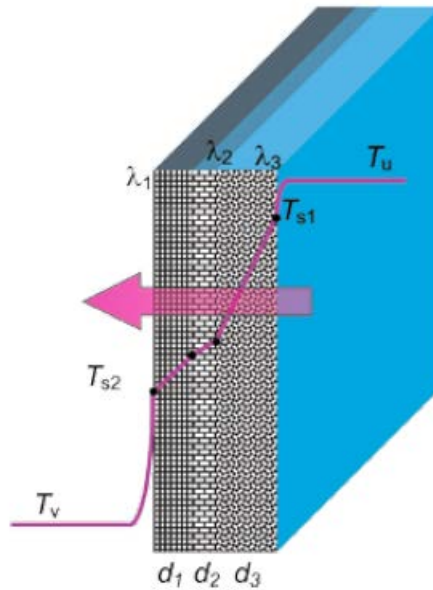
- Φ -toplinski tok (W)
- $T_{s1} - T_{s2}$ -razlika temperatura rubnih ploha (K)
- A -površina okomita na smjer izmjene topline (m^2)
- d - debljina sloja (m)
- λ - toplinska provodnost materijala (W/mK)
- $\frac{d}{\lambda}$ - specifični toplinski otpor (m^2K/W)



Slika 7. Jednodimenzijsko provođenje topline kroz homogeni sloj: toplinski tok okomito na površinu sloja, [1].

Za element sastavljen od više homogenih slojeva vrijedi, [1]:

$$\Phi = \frac{(T_{s1} - T_{s2})}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3}} \cdot A \quad (4)$$



Slika 8. Jednodimenzijnsko provođenje topline kroz više homogenih slojeva, [1].

2.3.1.2. Konvekcija ili komešanje

To je prijenos topline između krutog tijela i tekućine u gibanju. U zgradama, najčešći medij je vlažan zrak. Gibanje tekućine može biti uzrokovano *prirodnom* ili *prisilnom* konvekcijom, [1].

Intenzitet izmjene topline je određen brojem međusobnih dodira različito temperiranih čestica. Toplije se čestice kreću od površine zida prema jezgri struje, hlade se miješajući se s hladnijim česticama, a hladnije čestice se kreću prema toplijem zidu, zagrijevaju se i vraćaju u jezgru struje. Na prijelaz topline konvekcijom prevladavajući utjecaj ima način strujanja tekućine uz površinu zida, [1].

Toplinski tok izmijenjen konvekcijom opisuje se Newtonovim zakonom hlađenja, [1]:

$$\Phi = h \cdot (\vartheta_s - \vartheta_\infty) \cdot A \quad (5)$$

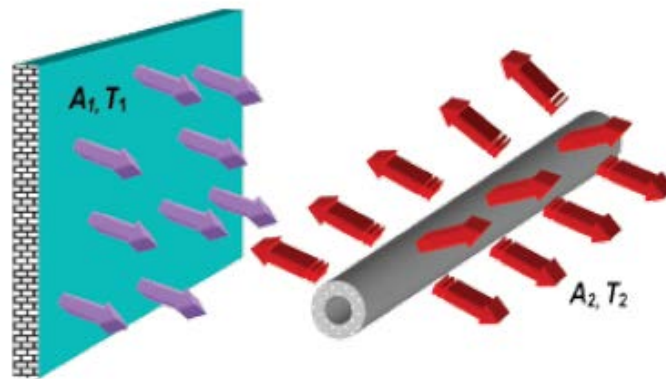
pri čemu je:

Φ	-toplinski tok,[W]
h	-koeficijent konvektivnog prijelaza topline, [W/m ² K]
ϑ_s	-temperatura površine zida, [°C]
ϑ	-temperatura tekućine podalje od zida, [°C]
A	-površina okomita na smjer izmjene topline, [m ²]

Vrijednost koeficijenta prijelaza topline konvekcijom ovisi o veličini i obliku građevinskog elementa, načinu strujanja (smjer toplinskog toka), o brzini strujanja, o temperaturi stjenke i temperaturi tekućine, te o svojstvima tekućine koja struji uz površinu, [1].

2.3.1.3 Radijacija ili zračenje

To je način izmjene topline putem elektromagnetskih valova između tijela različiti temperatura, između kojih je proziran (propustan) medij. Širenje se elektromagnetskih valova odvija bez materijalnog posrednika što je osnovna razlika između zračenja i konvekcije i kondukcije. Sve površine emitiraju i primaju zračenje. Iznos emitirane energije s površine tijela ovisi o temperaturi tijela, vrsti materijala i stanju površine. Debljina površinskog sloja odgovornog za emisiju i apsorpciju zračenja za metalne materijale iznosi nekoliko molekula, a za nemetalne materijale nekoliko mikrometara. Većina je materijala nepropusna za toplinsko zračenje. No, postoje materijali koji su propusni za upadna zračenja na pojedinim dijelovima elektromagnetskog spektra. Primjer je staklo, koje je vrlo propusno za svjetlosne zrake (valne duljine 0,4 do 0,7 μm), te potpuno nepropusno za infracrvene zrake (valne duljine od 0,7 do 400 μm), [1].



Slika 9. Opći slučaj izmjene topline zračenjem između dvaju tijela, [1].

Za slučaj izmjene topline zračenjem između dvaju tijela koja su proizvoljno smještena u prostoru, uz uvjet da se radi o dobrim emiterima zračenja ($\epsilon_1 \approx \epsilon_2 \approx 1$), vrijedi, [1]:

$$\Phi_{12} = \epsilon_{12} \cdot A_1 \cdot \epsilon_1 \cdot \epsilon_2 \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

$$\Phi_{21} = \epsilon_{21} \cdot A_2 \cdot \epsilon_1 \cdot \epsilon_2 \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

(6), (7)

pri čemu je:

Φ	-toplinski tok, [W]
e_{12}, e_{21}	-geometrijski ili vidni faktori
A_1, A_2	-površine tijela, [m ²]
ε_1	-emisijski faktor tijela [1]
ε_2	-emisijski faktor tijela [2]
σ	- $5,6706 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ Stefan-Boltzmannova konstanta
T_1	-temperatura tijela 1, [K]
T_2	-temperatura tijela 2, [K]

Geometrijski ili vidni faktor ovisi samo o geometriji graničnih ploha tijela i njihovom međusobnom položaju u prostoru, [1].

Emisijski faktor površine tijela u općem slučaju ovisi o vrsti materijala, stanju površine, temperaturi i valnoj duljini. Koeficijenti emisije većine građevinskih materijala (beton, žbuka i sl.) kreću se od 0,8 do 0,9, što znači da su dobri emiteri i apsorberi zračenja, [1].

2.4 Toplinska provodnost, koeficijent prolaska topline, toplinski otpor

Toplinska provodnost (λ) je fizikalna veličina definirana kao količina topline u jedinici vremena, tj. toplinski tok (Φ) koji prolazi okomito, kroz površinu neke tvari, zbog razlike temperature (ΔT), između dviju ploha na udaljenosti l , dakle, [5]:

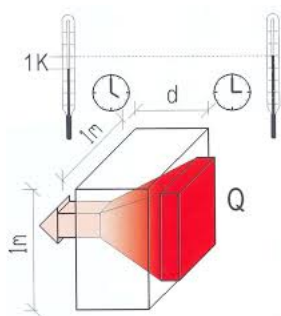
$$\lambda = \frac{\Phi \cdot d}{(A \cdot \Delta T)} \quad (8)$$

Φ -toplinski tok, (W)

d -debljina sloja (materijala) kroz koji prolazi toplina

A - površina kroz koju toplina protječe (m²),

T - temperatura (K).



Slika 10. Ilustracija toplinske provodnosti.

Mjerna jedinica toplinske provodnosti u SI sustavu je vat po metru i kelvinu, W/(mK), definirana kao toplinska provodnost homogene tvari u kojoj razlika temperature od jednog kelvina među dvjema paralelnim plohama, površine od jednog metra kvadratnog, razmaknutih jedan metar, uzrokuje toplinski tok od jednog vata, [5].

Toplinska provodnost materijala je fizikalno svojstvo materijala. Ovisi o prirodi tvari, njezinoj temperaturi, tlaku i vlažnosti. Određuje se mjerenjem. Materijali se s obzirom na toplinsku provodnost mogu podijeliti na izolatore i vodiče. Za izolacijske materijale poželjno je da imaju što niže vrijednosti toplinske provodnosti i iznose najčešće oko 0,004-0,010 W/(mK), [1].

Materijali veće gustoće imaju i veću vrijednost koeficijenta toplinske provodnosti. Praškasti i porozni materijali pokazuju posebnu ovisnost toplinske provodnosti o gustoći.

To se objašnjava time što je toplinska provodnost materijala koji se nalazi unutar pora (najčešće zrak) puno manja od koeficijenta toplinske provodnosti same krutine, [1].

Toplinska provodnost građevinskog materijala općenito raste s porastom temperature. Za toplinske proračune u građevinarstvu koriste se vrijednosti toplinske provodnosti pri srednjoj vrijednosti temperature od 10°C, [1].

Toplinski otpor (R)-je odnos debljine i toplinske provodnosti materijala. Izražava se kao m² K/W, [1].

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (9)$$

pri čemu je:

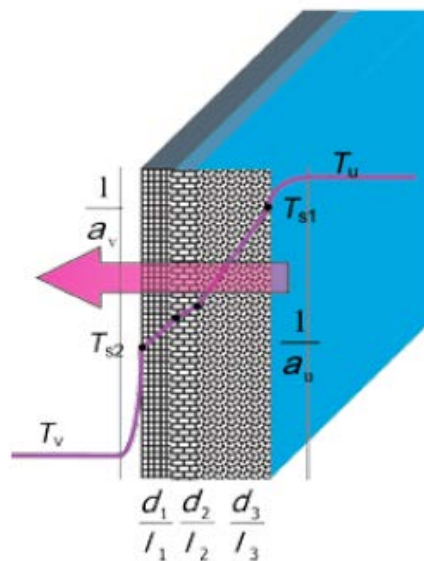
d - debljina sloja materijala, [m]
 λ - toplinska provodnost sloja materijala, [W/(mK)]

Toplinski otpor varira ovisno o vrsti materijala, gustoći i strukturi pora, sadržaju vlage i temperaturnoj razlici. Materijali s većim otporom imaju bolja izolacijska svojstva.

Ukupni toplinski otpor građevnog elementa-čini ga zbroj toplinskih otpora svakog pojedinog homogenog sloja s površinskim toplinskim otporima.

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n + R_{se} \quad (10)$$

- $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$ - otpor provođenju topline pojedinog homogenog sloja, [(m² K)/W]
 R_{si}, R_{se} - unutarnji, odnosno vanjski otpor prijelazu topline, plošni otpori, [(m² K)/W]



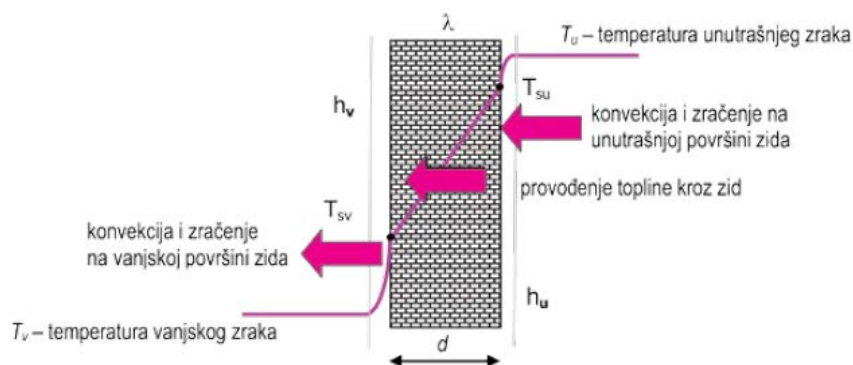
Slika 11. Prolazak topline kroz građevinski element sastavljen od više homogenih slojeva, [1].

Koeficijent prolaska topline (U vrijednost)-to je recipročna vrijednost ukupnog toplinskog otpora, [1].

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (11)$$

pri čemu R_T predstavlja ukupni toplinski otpor građevnog dijela.

Prolazak topline u sebi uvijek uključuje dva transporta topline konvekcijom na rubnim plohama zida, provođenje kroz zid i, ako postoji, izmjenu topline radijacijom na rubnim plohama, [1].



Slika 12. Prolazak topline kroz jednoslojni ravni zid, [1].

2.4.1 Korekcija koeficijenta prolaska topline

Koeficijent prolaska topline treba korigirati za slučaj kada u obzir treba uzeti utjecaje zračnih šupljina, što je opći naziv za prostor ispunjen zrakom u izolaciji ili između izolacije i susjednih elemenata, koji postoji u stvarno izvedenom objektu, ali se ne prikazuje u crtežima. Uzimaju se u obzir kod mehaničkih spojnica, koje prolaze kroz izolaciju i kod obrnutih krovova. Ako je ukupni $\Delta U < 3\%$, korekcija se ne mora primijeniti, [1].

$$U_c = U + \Delta U \quad (12)$$

$$\Delta U = \Delta U_g + \Delta U_f + \Delta U_r \quad (13)$$

pri čemu je:

ΔU_g - korekcija za zračne šupljine, uzima u obzir gibanje zraka u toplinskoj izolaciji

ΔU_f - korekcija za mehaničke spojnice, uzima u obzir utjecaj pričvrsnica ploča toplinske izolacije

ΔU_r - korekcija za obrnute krovove, uzima u obzir utjecaj oborina na toplinsku izolaciju

3. TRADICIONALNI IZOLACIJSKI MATERIJALI

Zadaća je toplinske izolacije smanjivanje toplinskih gubitaka, a posredno i troškova za energiju, ali i zaštita nosive konstrukcije od vanjskih vremenskih utjecaja i njihovih posljedica, [2,3].

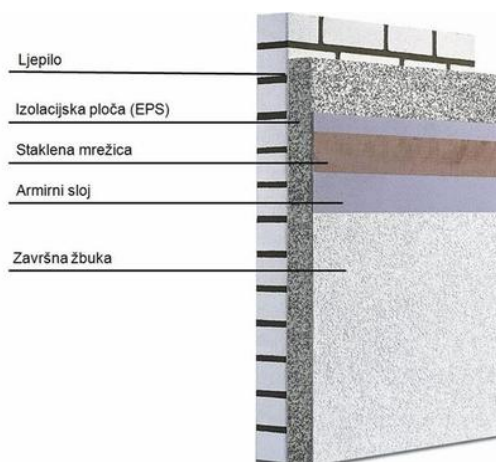
Toplinsko izolacijski materijali, koji se danas načešće koriste, mogu se podijeliti s obzirom na kemijski sastav i na strukturu. Anorganski i organski materijali imaju predstavnika u skupini najčešće upotrebljivanih klasičnih toplinsko-izolacijskih materijala. Od anorganskih materijala, na prvome je mjestu po opsegu uporabe toplinska izolacija od mineralnih vlakana, staklena i kamena vuna, a od organskih materijala najvažniji su pjenasti materijali, na primjer ekspanzirani i ekstrudirani polistiren (EPS, XPS) te pjenasti poliuretan (PUR)

S obzirom na fizikalno-kemijske karakteristike toplinsko-izolacijski materijali mogu se podijeliti na vlaknaste i porozne materijale. [2]

3.1. Ekspandirani polistiren – EPS (stiropor)

Ekspandirani je polistiren (EPS), danas poznatiji pod imenom stiropor, prvi proizveo 1954. godine koncern BASF u Njemačkoj pod zaštićenim imenom “Styropor®”. Kroz sada već više od 50 godina uporabe, ovaj se materijal pokazao kao odličan izolacijski materijal za različite namjene. EPS je materijal odličnih mehaničkih i termo – izolacijskih svojstava ($\lambda = 0.041$ do 0.035 W/mK) te niske cijene. U suvremenoj gradnji najviše se koristi u povezanim sustavima za toplinsku izolaciju (ETICS), ali također i za izolacije podova, krovova i dr. Danas na tržištu postoje i dodatno unaprijeđene i poboljšane varijante EPS-a (npr. sa dodatnim grafitnim česticama – Dalmatiner EPS, grafitni stiropor, kombinacija sa poliuretanom kao izolacijskim materijalom), čime se poboljšavaju njegova mehanička svojstva, kao i toplinska vodljivost, čak i do 40%.

Osnovni nedostatak ekspandiranog polistirena u odnosu na mineralnu vunu, su njegova loša protupožarna svojstva, budući da nije otporan na temperature više od 80 °C. Na tržište EPS dolazi u pločama dimenzija 100×50 cm, različitih debljina (od 2 cm do gotovo 30 cm).



Slika 13. Fasadni sustav s EPS-om kao izolacijskim materijalom, [2].

3.2. Ekstrudirani polistiren (XPS)

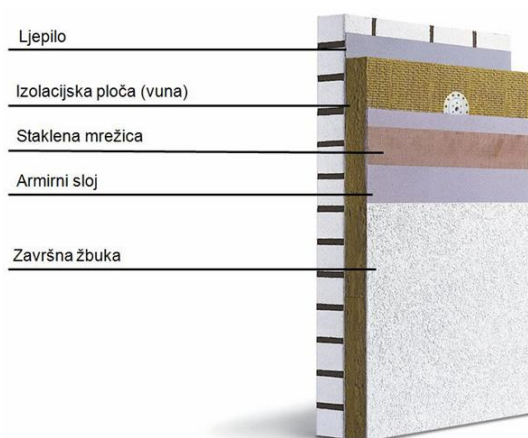
Materijal koji, zbog različitog načina proizvodnje u odnosu na ekspandirani polistiren, ima zatvorene pore i praktički ne upija vodu te se koristi na mjestima gdje je toplinska izolacija u neposrednom dodiru s vodom (podrumski zidovi, obrnuti ravni krov itd). Ekstrudirani polistiren je, za razliku od klasičnog bijelog ekspandiranog polistirena, obojen (svijetloplavo, svijetlozeleno, ružičasto) u karakterističnu boju pojedinog proizvođača, [2].



Slika 14. Fasadni ETICS sustav s XPS-om, [2].

3.3. Mineralna vuna

Izolacija od mineralne vune (kamena i staklena vuna) kemijski je neutralna, ne mrvi se, ne stari, postojana je pri visokim temperaturama, a dobiva se od prirodnih materijala (bazalt i diabaz u kombinaciji s koksom pri temperaturi taljenja oko 1600°C). Staklena vuna dobiva se pretežno iz kvarcnog pijeska u elektropečima pri temperaturama od oko 1350°C, nakon čega raspuhivanjem nastaju vlakna koja se povezuju dodavanjem veziva, a u toj fazi mineralna vuna dobiva karakterističnu boju, pri čemu je staklena vuna žuta, a kamena sivozelena. Mineralna se vuna proizvodi u obliku ploča i u obliku lamela i na tržište dolazi u debljinama od 3 do 24 cm. Toplinska vodljivost mineralne vune je otprilike ista kao i ekspaniranog polistirena, od 0,035 do 0,045 W/m. Posebno dobra strana mineralne vune je da ona osim svojih odličnih termo – izolacijskih svojstava, pruža zaštitu i od buke, a budući da je negoriva, i od požara. Negativna strana mineralne vune, je da prilikom gradnje, zbog sićušnih vlakana od kojih je sastavljena, može utjecati na zdravlje ljudi te se stoga pri radu s ovim materijalom treba pridržavati zaštitnih mjera, [2].



Slika 15. Fasadni sustav s mineralnom vunom kao izolacijskim materijalom, [2].

3.4. Poliuretanske pjene PIR i PUR

U novije vrijeme sve se više kao izolacijski materijali koriste poliuretanska pjena (PUR), te PIR (poli-izocijanurat), koji imaju izvrsne toplinsko-izolacijske karakteristike ($\lambda = 0,023-0,028$). Poliuretanska pjena upotrebljava se prvenstveno u industriji, ali i kao efikasan izolacijski materijal za sanacije krovista. Otporna je na temperaturne promjene (do 100 - 150°C), vlagu, plijesan, UV zrake, ali budući da ima visoki modul elastičnosti, zbog svoje „tvrdoće” je manje prikladna za povezane sustave za toplinsku izolaciju.

Kako bi se uklonio taj nedostatak PUR materijala, proizvode se izolacijske ploče čije su bočne stranice prešane klasičnim, grafitnim ili Dalmatiner EPS-om, [2].



Slika 16. Panel s PUR izolacijom (1-poliuretanski izolacijski sloj, debljine 40mm; 2-kvarcni pijesak; 3-sloj opeke debljine 20 mm), [4]

Vrijednosti toplinske provodnosti (λ) navedenih karakterističnih izolacijskih materijala su, [10]:

- Beton
 - 200-2000 mW/(mK)
- Staklena vuna, ekspanzirani polistiren (EPS), ekstrudirani polistiren (XPS), pluto
 - 32-40 mW/(mK)
- Poliuretanske pjene (PUR)
 - 20-30 mW/(mK)

Beton se ne smatra izolacijskim već građevinskim materijalom, no naveden je zbog njegove široke primjene i usporedbe.

4.MODERNI IZOLACIJSKI MATERIJALI VISOKIH PERFORMANSI ("THE STATE-OF-THE-ART" MATERIJALI)

Problemi energije u svijetu i čovjekova nepresušna glad za njom doveli su do gotovo svakodnevnih najpogubnijih i neočekivanih vremenskih nepogoda. U tom kontekstu smanjenje potrošnje energije koja je u izravnoj svezi s tom emisijom, svakodnevna je zadaća dizajnera, inženjera i projektanata, vlasnika i investitora da njihove nove ili stare zgrade troše što manje energije. U toj zadaći najodgovornije su ovojnice zgrada. Zbog toga se današnje zgradarstvo karakterizira intenzivnim nastojanjima da se neželjeni transfer energije kroz ovojnice zgrada svede na minimum.

Da bi se zadovoljili ti strogi nul-energetski uvjeti, tj. kako bi se postigao dovoljno nizak koeficijent prolaska topline (U-vrijednost), koristeći tradicionalne izolacijske materijale, ovojnice zgrada bile bi jako debele, reda veličine od 40-50 cm. Da bi se izbjegle previše debele ovojnice, uz zadržavanje jednakih, pa čak i boljih toplinskih svojstava, sve više se razvijaju i proučavaju novi, inovativni materijali i tehnologije toplinskog izoliranja zgrada.

U ovu grupu materijala, koji već imaju široku primjenu, spadaju, [10]:

- Aerogel
- Plinom ispunjene ploče (GFP)
- Fazno promjenjivi materijali (PCM)
- Vakuum izolacijske ploče (VIP)

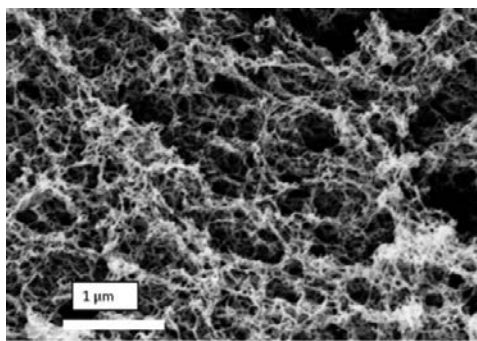
U nastavku je dan naglasak na Vakuum izolacijske ploče (VIP) i Fazno promjenjive materijale (PCM).

4.1 Aerogel

Aerogel je sintetički porozni, iznimno lagan materijal proizveden iz gela glinice, kroma, kositrovog oksida ili ugljika, u kojem je tekuća komponenta gela zamijenjena plinom. Često nazivan "smrznuti dim", aerogel spada u zapanjujuće materijale današnjice. Ovaj je osušeni gel otkriven 1934. godine, kada su Kistler i Caldwell izvijestili o materijalu koji je imao nevjerojatna svojstva. Novi materijal je, u trenutku otkrića, imao najnižu izmjerenu toplinsku vodljivost u povijesti, [12] .

Zamjena tekućeg djela plinom obavlja se sušenjem pod kritičnim uvjetima, što omogućava da se tekućina može lagano sušiti bez urušavanja pora gela, kao što bi se dogodilo standardnim sušenjem, [12].

Aerogel "state-of-the-art" materijali, trenutno dostupni na tržištu, su na bazi silicija. Struktura aerogela je uglavnom prazna; ima veliku specifičnu površinu (500-1200 m²/g), visoku poroznost (80-99,8%) i nisku gustoću (~ 3 kg/m³), a kao rezultat toga je niska toplinska provodljivost od oko 0,005 W/(mK). Unutarnja struktura aerogela ograničava sva tri mehanizma toplinskog transporta, što dovodi do toga da materijal ima izuzetna toplinska svojstva.



Slika 17. Mikrostruktura aerogela (silicij).

[15]



Slika 18. Niska toplinska provodnost,

Aerogel na bazi silicija ima prilično visoku tlačnu čvrstoću do 300 kPa, ali slabu vlačnu čvrstoću, što ga čini vrlo krhkim. Stoga mora biti u dobro zabrtvljenom prostoru prilikom primjene. Još jedan nedostatak aerogela na bazi silicija je degradacija izolacijskih svojstava tijekom vremena. Navedeni su nedostaci otklonjeni kada je NASA-in Glenn tim razvio poliamidne aerogelove, koji su fleksibilni i mehanički robusni. Poliamidni aerogelovi su znatno tanji, a nude izuzetna toplinska svojstva i izvanrednu mehaničku izvedbu, te su 500 puta jači od tradicionalnih silikatnih aerogelova. Mogu biti proizvedeni i oblikovani u raznim oblicima i tankim filmovima. Toplinska provodnost poliamidnih aerogelova je 14-20 mW/mK, a R vrijednosti je 2-10 puta veća od polimernih pjena, što je u rangu sa silicijiskim aerogelovima iste gustoće. Poliamidni su aerogelovi izuzetno lagani s više od 95% zraka u svom volumenu, gustoće od oko 0,08 g /cm³ i velike površine od 512 m²/g . Mogu izdržati visoke temperature 300 °C, te mogu biti uključeni u kompozitni materijal ili kemijski modificirani kako bi funkcionirali kao izolacijski proizvod, [13].



Slika 19. Poliamidni aerogel, [13].

Postoji nekoliko patenata, u vezi korištenja aerogela u raznim izolacijskim oblicima, vakuum ploče su jedno od njih, kao i kompozitni materijal s polimerima ili fibreglasom. Komercijalno dostupni proizvodi na bazi granula aerogela dosežu nisku toplinsku provodnosti od 0.013-0.014 W/(mK). Također su dostupni i na građevinskom tržištu u nekoliko oblika, kao što su pokrivači i granule za rastresite ispune ili se miješaju u žbuku ili drugi sustav za premazivanje (CABOT, 2011, Aspen, 2011, Baetens i sur., 2011), [12].

Monolitni aerogel može biti proziran ili neproziran, čime ostvaruje mogućnost široke primjene. Može se koristiti tamo gdje je poželjno veće osvjetljenje uz dobra izolacijska svojstva. Budući da su uobičajene prozirne površine objekata prozori i ostakljene fasade, koji su vrlo često glavni krivci povećanog ispuštanja topline, to je prvo mjesto gdje aerogel itekako može poboljšati toplinsku učinkovitost. Već se vrše ispitivanja na ovu temu, [12].

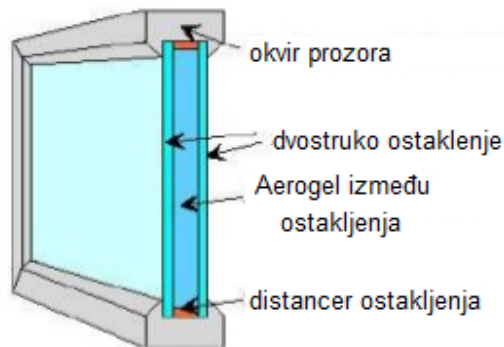
4.1.1 Aerogel stakla

Aerogel ostakljenje nije materijal, već sustav kombiniranih materijala koji imaju za svrhu poboljšanje postojećih performansi. Budući da se u ovom slučaju radi o prozoru ili ostakljenoj fasadi, nastoji se, uz toplinsku otpornost, poboljšati i propuštanje svjetlosti.

Koristi se tradicionalno okno prozora, gdje se aerogel kao materijal uvodi u prazninu, između staklenih ploča. Jedan od načina snižavanja toplinske provodnosti je eliminacija plina sadržanog u materijalu. U slučaju aerogela, pore su toliko male da je potreban samo grubi vakuum od 1-10% okolnog tlaka, za otklanjanje plinske provodnosti. Rub se zatim zapečati, tako da se aerogel ostakljenje može koristiti kod tradicionalnih okvira.

Prototipovi su izrađeni na DTU u Danskoj s obećavajućim rezultatima. Izrađene su staklene jedinice, toplinske provodnosti, u centru jedinice, od 0.010 W/(mK), prosječnom U-vrijednosti 0.066W/(m²K) i ostakljenjem iznad 70%. Usporedbe radi, dobar standardni prozor

s trostrukim ostakljenjem, danas ima U-vrijednost između $0.8-1.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, s ostakljenjem malo iznad 60%, [12].



Slika 20. Detalj dvostrukog ostakljenja s Aerogelom, [12.]

4.2. PLINOM ISPUNJENE PLOČE (GAS FILLED PANELS-GFP)

Kao i kod izolacijskih stakala, koji koriste niskoemitirajuće plinove, postoje i eksperimentalni izolacijski materijali koji kombiniraju plinove kao što su argon, kripton i ksenon sa sjajnim polimernim pregradama u geometriji saća, Slika 23. Slobodan prostor u pregradnoj mreži je ispunjen plinom po izboru za poboljšanje učinkovitost, a barijera, koja služi da plin ne bježi van, oblikuje cijeli paket. Toplinska provodnost, ako su pregrade dizajnirane ispravno, ploča punjenih primjerice sa ksenonom je mjerena na $0,008 \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$. Isti dizajn, ali s jezgrom punjenom zrakom, rezultirao je izmjerenom provodnosti od $0,028 \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$.



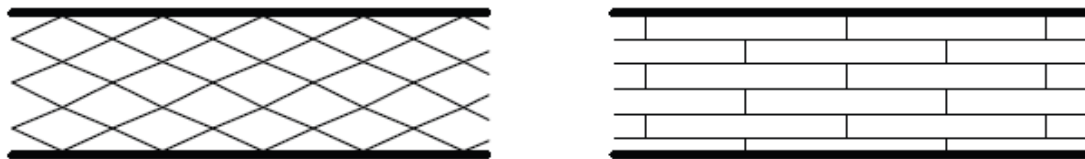
Slika 21. Uzorak unutrašnjosti GFP-a, [12]



Slika 22. Plinom ispunjene ploče, [16]

GFP se sastoji od tri glavne komponente: pregrade (ili unutrašnje saće), inkapsulacijske barijere i plinskog punjenja. Pregrada ima više funkcija. Prvo, stvara ćelije (stanice), dovoljno male da suzbiju konvekciju plina, drugo, niskoemitirajuća površina pregradnog materijala značajno potiskuje radijaciju. Kondukcija duž pregradne mreže je limitirana geometrijskim oblikom mreže, slika 8. Mreža ima osnovni oblik saća i put provođenja kondukcije od jedne ploče do druge je produljen, što dovodi do smanjene provodnosti.

Ćelije oblika romba ili zmijolikog oblika, slika 23, vjerojatno će biti još učinkovitiji u smanjenju provodnosti topline kroz ploču



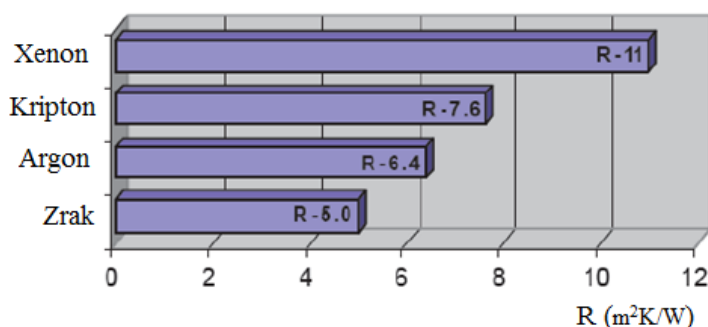
Slika 23. Alternativni oblici unutarnje mreže, koji će produžiti put provođenja u odnosu na sačastu strukturu, [12].

Provodnost odabranog plina je vrlo važna za ukupni učinak. Plinovi s većom molekulskom masom, obično imaju nižu toplinsku provodnost. Jednoatomski plinovi, kao što su kripton i ksenon, imaju nižu toplinsku vodljivost od poliatomskih plinova jednake ili veće težine.

Plinski punjeni ploče još nisu uvedene na građevinsko tržište, iako su izvedena preliminarna testiranja i modeliranja. Predstavljeni su rezultati numeričkog modeliranja stjenke s tradicionalnom izolacijom i njezina zamjena s GFP-om. Izračuni pokazuju poboljšanje od oko 30%, [12].

Tablica 2. Karakterisitke panela s različitim ispunama, [16]

Tip panela	Debljina pri sobnoj temperaturi u (mm.)	Prosječne ispitne temperature °F (°C)	Ukupna otpornost h·ft ² ·°F/Btu (m ² ·°C/W)
Kripton-GFP	1.0 (25.4)	45.1 (7.3)	12.6 (2.21)
Kripton-GFP	2.0 (50.8)	54.1 (12.3)	25.7 (4.52)
Xenon-GFP	1.0 (25.4)	52.7 (11.5)	18.4 (3.24)



Slika 24. R vrijednost GFP panela s različitim plinovima kao ispunama, [16].

4.3 FAZNO PROMJENJIVI MATERIJALI (PCM)

4.3.1 Latentna i senzibilna toplina

Pohrana toplinske energije (Thermal Energy Storage -TES) omogućuje da hladnoća i toplina budu uskladišteni, kako bi kasnije mogli biti korišteni. Uskladištenje može biti izvršeno na dva načina: fizikalnim (osjetno i latentno skladištenje topline) i kemijskim metodama, [6].

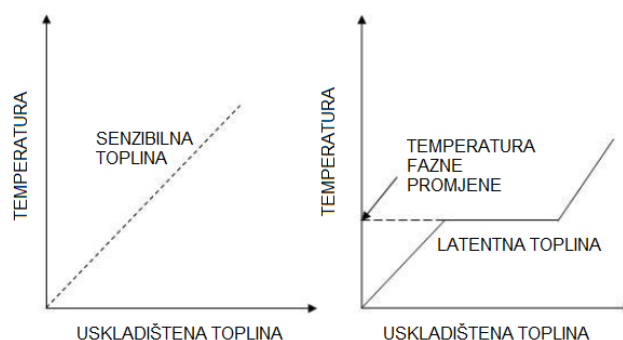
Kad zagrijavamo neki objekt i kako mu dodajemo toplinu njegova temperatura raste. Povećanje te topline naziva se *senzibilna toplina*. Slično tome, kad objektu oduzimamo toplinu i njegova temperatura pada, oduzeta toplina također se naziva senzibilna toplina. Toplina koja uzrokuje promjenu temperature kod nekog objekta naziva se senzibilna toplina, [5]. Može se izračunati kao, [6]:

$$Q_{SENSIBLE} = m * c_p * \Delta T \quad (14)$$

Sve supstance u prirodi imaju mogućnost promjene stanja. Krute supstance mogu postati tekuće i tekuće mogu postati plinovite. No za takve promjene potrebno je dodati ili oduzeti toplinu. Toplina koja uzrokuje ovakve promjene za ove se *latentna toplina*, [5].

Može se zapisati u obliku, [6]:

$$\Delta Q_{LATENT} = \Delta H = m * \Delta h \quad (15)$$



Slika 25. Razlika između latentnog i senzibilnog uskladištenja topline, [6].

Kako je energija, akumulirana u građevinskom elementu, izgrađena iz standardnih materijala, ograničena masom i temperaturnim razlikama (specifični toplinski kapaciteti nisu veliki),

ukupni efekt ovako pohranjene energije (senzibilna toplina) ne može biti značajan. Puno se veći efekt pohrane energije može postići primjenom materijala koji, promjenom svog agregatnog stanja, omogućuju korištenje latentne topline. Prijelaz krute u tekuću fazu događa se za tvar pri točno određenoj temperaturi, pri čemu je za taj fazni prijelaz tvari potrebno dovesti toplinu. Obrnuti proces (prijelaz iz tekuće u krutu fazu), zahtjeva odvođenje topline od tvari. I pri drugoj pretvorbi agregatnog stanja, pri konstantnom tlaku, nema promjene temperature tvari. Tvari ili smjese tvari s visokim vrijednostima latentne topline, koje taljenjem i kralizacijom mogu primiti ili odati velike količine energije, a temperatura taljenja im se nalazi u području u kojemu je ovaj proces iskoristiv pri regulaciji temperature, nazivaju se Fazno promjenjivim materijalima (PCM), [1].

Na temperaturama nižim od tališta fazno promjenjivi materijali se ponašaju kao sve ostale krutine. Dovođenjem topline povećava im se temperatura. Međutim, zagrijavanjem na temperaturu tališta dolazi do pretvorbe krute u tekuću fazu (taljenje) pri čemu temperatura ostaje konstantna. Nakon što se rastali cijela krutina, daljnjim dovođenjem topline raste temperatura nastale kapljevine. U obrnutom procesu, snižavanjem temperature okoline, kapljevina se hladi do temperature tališta, nakon čega slijedi skrutnjavanje, tijekom kojega se od tvari odvodi toplina, a njezina temperatura ostaje konstantna, [1].

4.3.2. Kako PCM funkcionira?

Prije opisa načina rada PCM-a, da bi se lakše razumjela problematika, proučimo primjer jednostavne primjene PCM-a u izradi odjeće. .

Zima je period godine koji predstavlja izazov u odabiru odgovarajuće odjeće za one koji žele boraviti vani. Ukoliko se nosi previše slojeva, ljudi će se više znojiti; ukoliko se nosi premalo, ljudima će postati hladno. Tehnologija je ponudila rješenje- parafin voskastu tvar, poznatu kao fazno promjenjiv materijal, koja je zatvorena u mikroskopski toplinski otpornim kuglicama, poput plastičnih, nalik na one koje se koriste u strojevima za pranje suđa. Obložen tkaninom, fazno se promjenjiv materijal topi i zamrzava prije nego što toplina i hladnoća počnu utjecati na ljude i u tom procesu, pohranjuju i izbacuju toplinsku energiju. Odjeća koja je isprogramirana na ovaj način može osigurati postizanje odgovarajuće tjelesne temperature, tj. može se zagrijati ili ohladiti, kako bi se osjećali što ugodnije, [8].

Fazno promjenjivi materijali su dizajnirani na način da održavaju središnju točku u uskom temperaturnom rasponu. Primjerice, fazno promjenjiv materijal korišten u jaknama zadržava

temperaturu između 27 ° C i 38 ° C. Specifični raspon određuje duljina molekula ugljikovodika koje čine materijal; različite dužine uvjetuju različite raspone, [8].

Kada skijaš oblači jaknu, neke od čestica promjene fazu, apsorbiraju tjelesnu toplinu i djelomično se tope. Tijekom napornih vožnji niz planinu, skijaševo tijelo stvara višak topline koja topi preostale mikrokapsule. Budući da materijal apsorbira toplinu, temperatura unutar odjeće ostaje ugodna. Tijekom vožnje uspinjačom, natrag do planine, skijaš se hladi. No, kako temperatura između jakne i tijela opada, mikrokapsule se smrzavaju u procesu oslobađanja pohranjene topline. Fazno promjenjivi materijali mogu izvesti ove termičke cikluse "neodređen" broj puta, dok ne dosegnu svoj životni vijek, [8].

Zidne i stropne strukture mogu biti dizajnirane na određenu temperaturu, kako bi održavali toplinu u okolnom prostoru. Prilikom toplinskog opterećenja koje raste tijekom dana unutar strukture, kada se premaši određena temperaturna granica, zidovi i stropovi, koji su hladniji, počinju apsorbirati višak topline. Toplina se pohranjuje u materijalu i ponovno oslobađa kada temperatura počne opadati, što je slučaj tijekom noći, [9].



Slika 26. Mehanizam rada PCM-a, [17]

4.3.3 PCM u zgradama

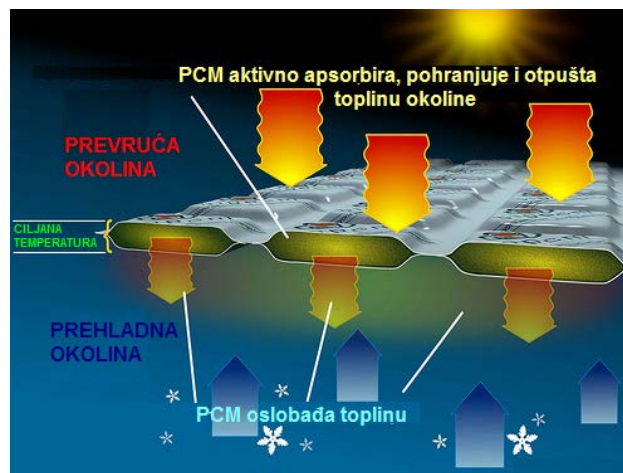
Uporaba novih građevinskih materijala koji sadrže aktivne termalne komponente u ovojnicama zgrada (npr. PCM, zračne barijere i integrirani hidraulički sustavi), će biti krajnji korak u postizanju značajnih ušteda energije za grijanje i hlađenje, [7]

PCM-i su proučavani posljednjih 40 godina, kao termalna masa komponentata u zgradama, a većina studija otkriva da PCM poboljšava energetska učinkovitost zgrada. No neki su problemi, kao visoke početne cijene, gubitak sposobnosti fazne promjene, korozivnosti (u slučaju nekog anorganskog PCMs) i curenje PCM-a, zaustavili njegovo početno široko osvajanje i primjenu, [7].

Parafinski ugljikovodični PCM-i uglavnom imaju dobar utjecaj, no povećavaju zapaljivosti ovojnice, zbog čega se više pozornosti sada posvećuje PCM-u na temelju masnih kiselina ili

hidrata anorganskih soli. Najveći potencijal PCM ostvaruje za stabilizaciju unutarnje temperature zgrada, zbog čega se tradicionalno koristi za unutarnje površine, zidove, stropove i podove. No novija istraživanja provedena u SAD-u, nastoje integrirati PCM u toplinske ovojnice zgrada, [7].

Primjenom se PCM materijala u građevnim objektima postiže uravnoteženje dnevnih varijacija temperature, s obzirom da fazno promjenjivi materijali svojim taljenjem usporavaju ili onemogućavaju dnevni porast temperature iznad svoje temperature tališta, a kristalizacijom sprječavaju prekomjeren pad temperature. Osim uravnoteženja temperature, na ovaj se način smanjuju potrebe za grijanjem i hlađenjem, štedi energija i čuva okoliš.



Slika 27. Mehanizam toplinskog transfera PCM-a, [18.]

Prema podacima u literaturi, ovisno o klimatskom području, uštede se kreću u rasponu od 20-40%. Premda su fazno promjenjivi materijali najdjelotvorniji u klimatskim područjima s velikim razlikama između dnevnih i noćnih temperatura, izborom odgovarajućih materijala za svako se klimatsko područje može postići tražena učinkovitost. Isti PCM materijali neće biti jednako učinkoviti u svim klimatskim područjima. Za hladnija područja, gdje je potrebno spriječiti prekomjerno ohlađivanje unutarnjeg prostora, preporučuju se materijali čija se temperatura taljenja kreće u rasponu od 18-22°C. Za toplija područja, gdje je važno spriječiti prekomjerno povišenje temperature, prikladniji su materijali s temperaturom taljenja između 22 i 26°C. U građevinarstvu se PCM koriste na specijalnim umreženim nosačima, mikroinkapsularni PCM materijali, te građevinski materijali na bazi mikrokapsula.

Za PCM materijale poželjna je visoka vrijednost latentne topline, temperatura taljenja u točno određenim granicama, te velika gustoća. Zahtjevi koji se postavljaju s gledišta sigurnosti primjene PCM materijala su kemijska stabilnost, neotrovnost i prihvatljivost za okoliš, [1].

Mikrokapsuliran se PCM može nalaziti u zidnim šupljinama ili može biti instaliran kao dio izolacijskog sustava potkrovlja. PCM poboljšan celulozom je bio jedan od prvih uspješnijih koraka u razvijanju ove vrste proizvoda u građevinskom sektoru (Košny i sur. 2007). Nakon toga, znanstvenici su razvili PCM pomiješan s oksidiranom stakloplastikom (Košny i sur. 2010) i plastičnom pjenom (Košny et al. 2008. godine; Mehling i Cabeza 2008). Glavna prednost izolacije poboljšanje PCM-om je sposobnost znatnog smanjivanja i prebacivanja maksimalnog satnog termičkog opterećenja generiranog ovojnicom zgrade, [7].

PCM, uzet u obzir za građevinski sektor, oslanja se na kruto-tekuću faznu promjenu i može se klasificirati u dvije kategorije: organski PCM i anorganski PCM.

4.3.3.1. Organski PCM

Organski PCM se najčešće sastoji od organskih materijala, kao što su parafini, masne kiseline, i šećerni alkoholi. Parafinski PCM je najčešće korišten, jer temperatura taljenja pada unutar raspona od oko -5° do 60° C, što je temperaturni raspon koji pokriva primjenu u zgradama za većinu klimatskih zona diljem svijeta. Osim toga, parafinski PCM je kemijski inertan, netoksičan, pouzdan i biokompatibilan. Također pokazuje zanemariv učinak pothlađenja, [7].

4.3.3.2. Anorganski PCM

Anorganski PCM pokriva širok temperaturni raspon. Iako anorganski PCM ima sličnu latentnu toplinu po jedinici mase kao organski PCM, njihova latentna toplina po jedinici volumena je obično veća zbog njihove veće gustoće. Soli hidrata su jedna vrsta anorganskih soli koje sadrže jednu ili više molekula vode, (npr. $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{LiNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ i $\text{KF} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$). Soli hidrata su netoksične, nezapaljive i manje korozivne, a temperatura taljenja im je u rasponu od 5° C do 130° C, što je pogodno za primjenu u zgradama, [7].

4.3.3.3. BioPCM

BioPCM, koji je dobiven iz životinjske masti, poput govedeg loja i masti i ulja iz biljka kao što su palme, kokos i soja, su obnovljiva i zelena alternativa parafinskog PCM-a. Oni su netoksični i mogu se reciklirati kroz tisuće ciklusa bez pojave propadanja materijala.

Budući da su to hidrogenizirani ugljikovodici sa zasićenom elektronskom konfiguracijom, oni su kemijski stabilni i mogu trajati desetljećima. Osim toga, PCM na bazi mast-ulje imaju veći stupanj otpornosti na požar, [7].

4.3.4. Fizikalne karakteristike PCM-a

Tablica . Fizikalne karakteristike PCM-a s različitim vrstama ugljikovodika, [7]

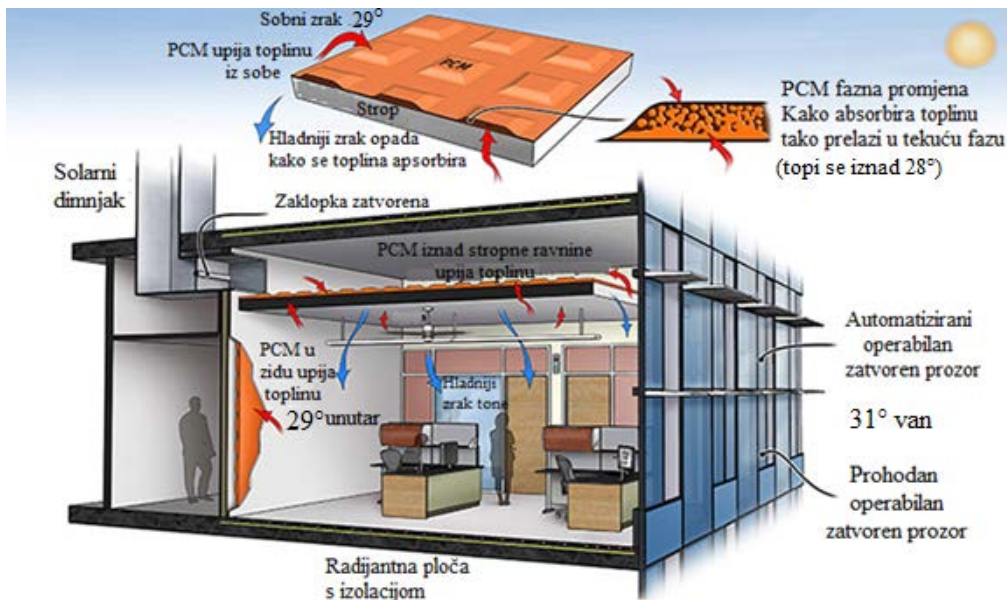
Karakteristike	Heksadekan	Heptadekan	Dodekanol	Oktadekan
Točka topljenja (°C)	20	21	24	29
Provodljivost (W/m K)	0.39	0.33	0.28	0.26
Gustoća (kg/m ³)	777	773	853	777
Specifična toplina (J/kg K)	1,390	-	1,550	1,200
Latentna toplina (J/kg)	281,000	230,000	235,000	267,000
Debljina (m)	0.0064	0.0064	0.0064	0.0064

4.3.5. Način ugradbe PCM-a u zgrade

PCM se do sada ugrađivao u podne, zidne i stropne konstrukcije u formi ploča određenih dimenzija i debljine. Na slikama 28. i 29. prikazani su načini ugradbe PCM-a u zidove i ploče

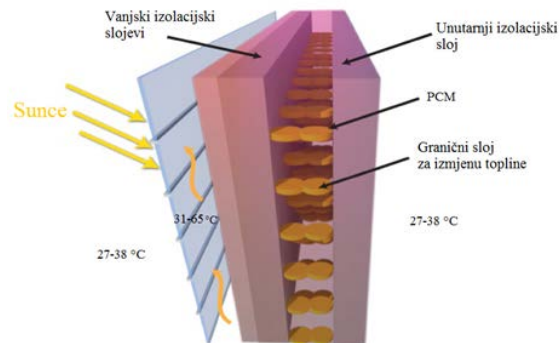


Slika 28. Način ugradbe PCM ploča, [14].



Slika 29. Mogući načini ugradbe, [16.]

U novije vrijeme je tendencija da se PCM ugrađuje i u aktivne pametne ovojnice zgrada.



Slika 30. Presjek slojeva ventilirane fasade s PCM-om, [14].

4.4 VAKUUM IZOLACIJSKI PANELI (VIP)

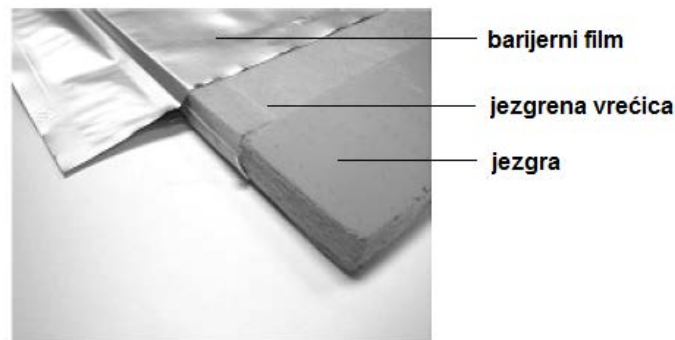
Vakuumski izolacijski paneli (VIP) su relativno nov proizvod koji se može integrirati u ovojnice zgrada. Ovaj materijal ima 8 puta bolja izolacijska svojstva nego konvencionalni izolacijski materijali, kao što su mineralne vune (EPS, XPS). Usporedbe radi, zamjenom 40 cm tradicionalne izolacije sa svega 5 do 10 cm debelog VIP-a, zadržava se ista razina toplinskog otpora, zbog čega VIP najveći potencijal ostvaruje kod skučenih prostora, gdje se za male debljine izolacije ostvaruju izvanredni rezultati. Na slici 31. uspoređene su debljine VIP-a i tradicionalnih izolacijskih materijala.



Slika 31. Usporedne debljine za $U = 0.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ (VIP, EPS, XPS, mineralna vuna, kamena vuna), [23].

Veliki interes za vakuumske izolacijske materijale različitih vrsta, ostvaruje se krajem 20. stoljeća, kada su proizvođači hladnjaka i zamrzivača morali zamijeniti, u uređajima, u to vrijeme obično korištene CFC oksidirane pjene. Jedan od mnogih mogućih zamjenskih materijala bila je vakuum izolacija. Kako se tehnologija vakuuma aplicirala kod hladnjaka i

zamrzivača, kao i za transportne ambalaže, hladnjače i drugo, postalo je jasno da ova tehnologija može postati učinkovitija u štednji energije, [12].



Slika 32. Vakuum izolacijski panel koji se već nalazi na Europskom tržištu, [12].

VIP je dizajniran kako bi postigao visoke toplinsko izolacijske performanse, odnosno kako bi se smanjile prekomjerne emisije CO₂ kroz ovojnice. Može biti primijenjen u raznovrsnim područjima, od zgrada do frižidera, kriogenih aparata i uređaja. Nedostatak VIP-a je degradacija izolacijskih performansi tijekom vremena, zbog čega su brojna istraživanja orijentirana na koji način poboljšati i produžiti životni vijek. No to i dalje ne umanjuje iznimna toplinska svojstva koja ovaj proizvod ima, [12].

4.4.1. Osnovna konstrukcija VIP-a

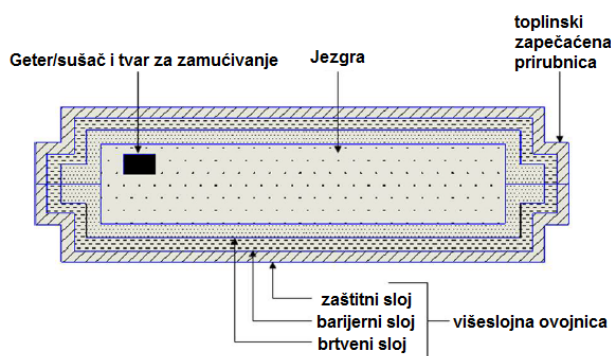
VIP može biti opisan kao porozni materijal iz kojeg je izvučen zrak, pokriven višeslojnom ovojnicom. Glavne komponente VIP-a su *unutarnja jezgra*, *barijerna ovojnica*, *geteri** i *isušivači*, slika 33. Ovojnica može uključivati ili tanke metalne presvlake ili višeslojne barijere od metaliziranih polimernih slojeva koje ju štite od vanjskih utjecaja. Geteri i/ili isušivači su integrirani u jezgru kako bi apsorbirali plinove i vodenu paru koji penetriraju u VIP kroz ovojnicu. Navedeni materijali oblažu jezgru VIP-a, sloj po sloj, pri čemu treba naglasiti da se izvlači zrak, stvarajući vakuum stanje, koje je ključno za postizanje izvanrednih toplinskih svojstava. Kod tradicionalnih, nevakuumskih izolacijskih materijala, dominantan je prijenos topline kondukcijom, zbog toga što pore ispunjene zrakom pogoduju prijenosu topline, dok pore bez zraka (ili nekog drugog medija) pogoduju boljoj izolaciji. Toplina zahtijeva medij za svoj prijenos, u čemu leži glavna svrha apliciranja vakuuma u panelima. Dakle, vakuumske šupljine su ugrađene u jezgreni materijal, čime se potiskuje prijenos topline, [11].

**geteri (eng. getters)-tvari koje se uvode u vakuum za uklanjanje tragova plina*

VIP može biti podijeljen u dvije grupe: VIP na bazi ploča i VIP na bazi filma. Vakuum u pločama se postiže tijekom tvorničke proizvodnje, što znači da se ne može ponovno postići nakon što je proces proizvodnje završen, kao što ne može biti regeneriran nakon godina uporabe. Upravo zbog te činjenice je i izvršena podjela. Za VIP na bazi ploča, se koriste metalni materijali, što dovodi do bolje nosivosti i otpornosti na mehanička oštećenja, no nedostatak je veća težina i utjecaj toplinskih mostova. S druge strane, tanji ($100 \sim 150 \cdot 10^{-6} \text{m}$) i lakši VIP na bazi višeslojnog metaliziranog polimernog filma kao ovojnica, može biti lako oštećen prilikom rukovanja, [11].

Godine 2002., objavljeno je izvješće pripremljeno za US Department of Housing and Urban development, na temu vakuum izolacije u zgradama (NaHB, 2002) kao rezultat istraživačkog projekta u trajanju od tri godine. Cilj ovog izvješća je ubrzanje korištenja VIP u zgradama u SAD-u, [12].

U Europi projekt IEA je započeo 2001. godine, dodatak (annex) 39-visoke performanse toplinske izolacije. Rad na ovom projektu bio je podijeljen u dva zadatka. Pri zadatku se bavi samim panelima i njegovim komponentama, dok se drugi zadatka bavi integracijom Vakuum izolacijskih panela u zgrade, [12].

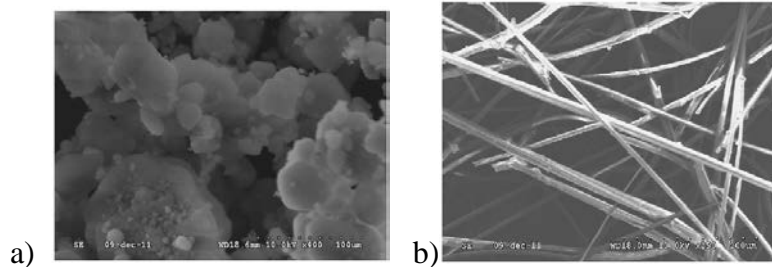


Slika 33. Konceptcija Vakuum izolacijskog panela, [11].

4.4.2. Jezgreni materijal

Jezgreni materijal mora imati porastu strukturu, prikladne veličine pora. Budući da prijenos topline mora biti potisnut, pore jezgrenog materijala moraju biti što manje, kao što su porozno otvorene pjene, prah ili neke vrste vlakana. Kostur mora imati geometriju, koja ostvaruje male točke kontakata u strukturi materijala kako bi se smanjio kondukcijski prijenos topline; čak i

pod velikim opterećenjem. Optimalni oblici su sferični ili cilindrični kao u slučaju silicij dioksida, slika 17. i staklenih vlakana, slika 16. Materijal mora biti u stanju izdržati velika vanjska opterećenja bez urušavanja, [11].



a) Slika 34. SEM prikaz praha silicij dioksida, sferičnog oblika (mala dodirna površina, mali prijenos topline i pod djelovanjem opterećenja), [12]. b) Slika 34. SEM slika staklenih vlakana, cilindričnog oblika (mala dodirna površina, mali prijenos topline i pod djelovanjem opterećenja), [12].

Različiti jezgri materijali trebaju različite razine unutarnjeg tlaka, za postizanje niske toplinske provodnosti. Na primjer staklena vlakna dosežu najnižu toplinsku vodljivost od oko $0.002 \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$, ali kako bi se to ostvarilo, unutarnji tlak mora biti ispod $0,05 \text{ mbar}$, dok jezgra na bazi silicij dioksid ne može izdržati toliko nizak tlak, ali će zadržati nisku toplinsku provodljivost $0,004 \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$, čak i pri unutarnjim tlaku od 1 bar , [11].

4.4.2.1. Pjena u jezgri VIP-a

Poliuretan (PUR) ili ekspanzirani polistiren (EPS) mogu se koristiti kao jezgri materijali Vakuuma izolacijskih ploča. Veličina pora je reda veličine $30 \sim 250 \cdot 10^{-6} \text{ m}$. Navedene pjene imaju malu gustoću ($60 \sim 100 \text{ kg/m}^3$), tako da se u uvjetima vakuuma može postići niska toplinska provodnost. Prema istraživanjima može se postići toplinska provodnost od $0.003 \sim 0.007 \text{ W/mK}$. Kako bi se postigla niska toplinska provodnost, također je potreban nizak unutarnji tlak (niži od $1 \cdot 10^{-4} \text{ bar}$). Međutim, treba paziti i s tim da prenizak tlak utječe na trajnost cijelog materijala, očekivano 50-60 godina ili više kod upotrebe na zgradama.

Uporabom pjena, očito je da će se teže postići niže vrijednosti toplinske provodnosti. Nadalje, pjene imaju veću požarnu toksičnost, ispuštajući uglavnom ugljični monoksid (CO), cijanovodik (HCN) kao i druge štetne spojeve. Srećom, niža toplinska provodnost kod pjena se može postići smanjivanjem veličina pora. U posljednje vrijeme se istražuju gumeno uklopljen polipropilen i polietilenske nano/mikrostanične pjene s poboljšanim strukturalnim uređenjem, [11].

4.4.2.2. Prah u jezgri VIP-a

Materijali, koji se mogu koristiti, u formi praha su silicij dioksid ili pirogeni silicij, aerogel na bazi silicija i ekspanzirani perlit. Mogu se koristiti zasebno ili u kombinaciji. Najčešće je korišten silicij dioksid kao jezgri materijal, zbog svoje niske toplinske provodnosti ($0.003 \sim 0.006 \text{ W/mK}$) i odgovarajućeg tlaka, reda veličine $20 \sim 100 \cdot 10^3 \text{ bar}$. Gustoća je približno $150 \sim 200 \text{ kg/m}^3$, a veličina pora $300 \cdot 10^3 \text{ m}$. Dakle, zbog svoje niske toplinske provodnosti i gustoće, silicij dioksid zadovoljava sve kriterije koji moraju biti ispunjeni kako bi se postigla ukupna niska toplinska provodnost od oko 0.004 W/mK .

O aerogelu na bazi silicija je već bilo govora ranije i navede su vrijednosti toplinske provodnosti i gustoće, no treba naglasiti dobru požarnu stabilnost koju posjeduje ovaj materijal.

Ekspanzirani perlit zahtjeva nizak tlak, niži od 0.1 mbar , kako bi se postigla tražena toplinska provodnost; simultano je manje učinkovit od aerogela na bazi silicija i silicijevog dioksida, te može jedino biti impregniran u kombinaciji s navedenim. Stoga se optimiziraju količine u kombinaciji, koja bi dala najpovoljnija toplinska svojstva i relativno visok tlak, koji bi zadovoljio uvjete vijeka trajanja jezgre VIP-a, [11].

4.4.2.3 Staklena vlakna u jezgri VIP-a

Staklena vlakna također mogu biti korištena kao jezgri materijal, prilikom aplikacije visokih temperatura, zbog svoje niske gustoće i visoke toplinske stabilnosti ($>1000^\circ\text{C}$). Gustoća je slična silicijevom dioksidu, približno 250 kg/m^3 . Promjer vlakana je $0.5 \sim 0.7 \cdot 10^{-6} \text{ m}$. Navedene značajke rezultiraju toplinskom provodljivošću od 0.0028 W / mK , pri tome zahtijevajući potiskivanje plinske toplinske vodljivosti unutar 0.0012 W / mK , da bi se postigla zahtijevana toplinska provodnost VIP jezgre od 0.004 W / mK . Da bi se potisnula plinska toplinska provodnost, potreban je tlak od približno $0.01 \cdot 10^{-3} \text{ bar}$.

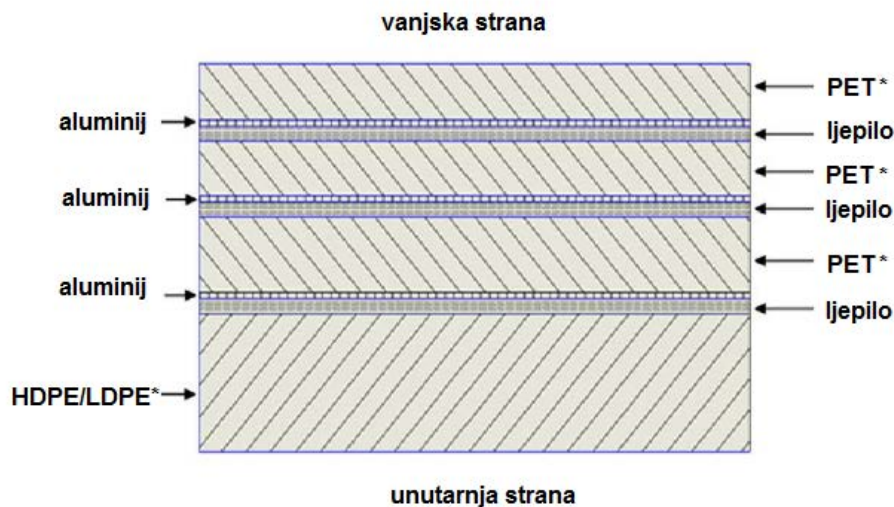
Neka istraživanja su pokazala da VIP na bazi nekih staklenih vlakana mogu biti korištena za izoliranje rezervoara tople vode u industriji. VIP na bazi staklenih vlakana su dobra izolacijska alternativa za kućanske pećnice, peći, koncentrirane solarne elektrane i elektrane na gorive ćelije, [11].

4.4.3. Materijali za ovojnice VIP-a

Ovojnica ima ulogu da zaštiti panel od vanjskih utjecaja (djelovanja zraka i vode), kao i da odoli vanjskom (atmosferskom) pritisku i mehaničkim oštećenjima prilikom transporta i instalacije. Svojstva ovojnice ovise o svojstvima višeslojne barijere i sposobnosti da odole utjecaju toplinskih mostova preko rubova. Materijali ovojnice trebaju imati ograničenu brzinu prijenosa vodene pare i kisika, kako bi se postigao životi vijek od približno 30-50 god. za aplikaciju na zgradama.

Ako plin dospije u jezgru onda se povećava pritisak, što rezultira povećanjem toplinske provodnosti u jezgri. Kad se provodnost jezgre poveća iznad određene razine, ploča doseže kraj svog vijeka trajanja.

Koriste se kombinacije polimera i tankih metaliziranih filmova i metalnih folija, slika 35. Vijek trajanja višeslojnih filmova ovojnice ovisi o vanjskoj temperaturi, relativnoj vlažnosti i veličini panela.



Slika 35. Višeslojna VIP ovojnica (*HDPE-high density polyethylene/polietilen velike gustoće ; LDPE-low density polyethylene/polietilen male gustoće ; PET-polyethylene terephalate/ polietilentereftalata), [11].

4.4.3.1. Zaštitni sloj

Zaštitni sloj je vanjski dio ovojnice, koji ima ulogu zaštite od vanjskih utjecaja, a ujedno djeluje i kao supstrat barijernog sloja. Polyethylene terephthalate (PET) se trenutno koristi kao

zaštitni sloj zbog svoje niske cijene. Brojna istraživanja se bave aplikacijom i drugih zaštitnih materijala, među kojima je i najlon, zbog ponašanja pri visokim temperaturama, [11].

4.4.3.2. Barijerni sloj

Barijerni sloj ima ulogu reguliranja prolaza vodene pare i zraka. Koriste se ili aluminijske folije ili polimerni metalizirani slojevi. Aluminij je vezan uz polimerni supstrat. Broj barijernih slojeva se kreće od jednog do tri, pri čemu su naravno najpovoljnija tri sloja za sprječavanje oštećenja od zraka ili vodene pare. Polipropilen (PP) i PET se uvijek koriste kao supstrati. I u ovom području postoje brojna istraživanja, koja proučavaju primjenu raznih materijala za barijerni sloj. Jedno od takvih materijala je i metalizirani sloj s etilen vinil kopolimerom, koji se pokazao dobrim u smislu brzine prijenosa vodene pare i kisika, u odnosu na aluminijsku foliju. No budući da metal ima višu toplinsku provodnost, utjecaj toplinskih mostova na rubovima VIP-a će biti veći. Primjenom dušikom i kisikom obogaćenog silicija, mogu se smanjiti utjecaji toplinskih mostova, [11].

4.4.3.3. Brtveni sloj

Brtveni sloj zatvara jezgru materijala. Proces brtvljenja se vrši zagrijavanjem, pri čemu su površine folija zagrijane pod određenim pritiskom, koji stvara povezivanje dva polimerna sloja uslijed difuzije. Temperatura i vrijeme brtvljenja su vrlo bitni čimbenici koji utječu na kvalitetu brtvljenja. HDPE i LDPE imaju ulogu brtvenog sloja, [11].

4.4.4 Apsorpcijski materijali: geteri, isušivači i tvari za zamućivanje

Apsorpcijski su materijali sastavni dijelovi ili kemikalije ugrađene u jezgru, koji imaju funkciju hvatanja vlage ili plina, kako bi se spriječio rast tlaka u jezgri. To su posebno dizajnirani materijali za hvatanje molekula iz okoline. Razlika između isušivača i getera je u tome što isušivači otklanjaju vlagu, dok su geteri dizajnirani kako bi uklonili molekule plina. Geteri su kompliciraniji za proizvodnju, pa time i skuplji.

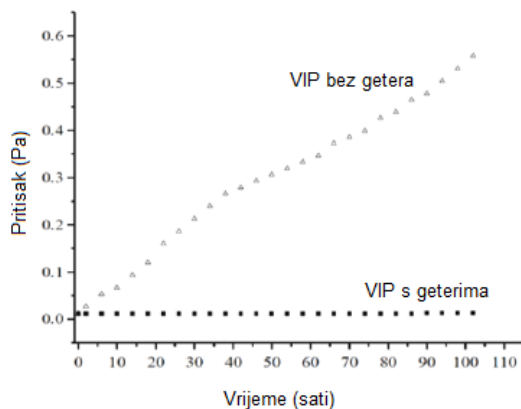
Isušivači su posebno dizajnirani kako bi zarobili vlagu i time su izrađeni od visoko higroskopskih materijala. Isušivači, koje najčešće susrećemo, su izrađeni od čvrste tvari koja vlagu hvata adsorpcijom i nakon toga apsorpcijom, dok za ostale namjene mogu biti u drugim oblicima i koristiti druge mehanizme.

Geteri, u smislu zamki za plin, su vrlo porozne strukture s velikom površinom koja privlači i spaja se s plinovima i promjenjivim organskim molekulama. Djeluju kao male vakuumske pumpe, (Kwon et al., 2010).

Jedna od prvih uloga getera je održavanje vakuuma u elektronskim vakuum cijevima. Ovi geteri su obično male okrugle šupljine ispunjene materijalom, često metalom, koji vrlo brzo oksidira i veže molekule kisika nepovratno. Barij se čest koristio kao metal. U ovoj ulozi, geteri moraju biti aktivirani toplinom; isparavaju i reagiraju s zaostalim molekulama u epruveti, ostavljajući naslage srebrne boje u unutarnjoj cijevi.

Tvari za zamućivanje služe za redukciju radijacijske provodnosti jezgrenog materijala, budući da su neprozirni za infracrveno zračenje. Povoljno je korištenje silicij karbida kao tvar za zamućivanje u jezgri na bazi silicijevog dioksida.

Porast tlaka degradira performanse VIP-a. Najčešći plinovi koji ulaze u jezgru vakuum ploče su dušik, kisik, CO₂ i vodena para. Za neke vrste jezgrenog materijala VIP-a, potrebno je dodati getere i / ili sredstva za sušenje, čime se povećava životni vijek. U slučaju jezgre od silicijevog dioksida, sama jezgra djeluje kao sredstvo za sušenje, tako da nije potrebno dodati dodatna sredstva za sušenje, a za ostale jezgrene materijale, potrebna je mala količina isušivača i/ili getera za kontinuirano apsorpiranje plinova i vodene pare. Silicijev dioksid, zbog velike specifične površine, ima velike sorpcijske sposobnosti; 1 kg materijala će adsorbirati 0,05 kg vode pri 75% relativne vlage, [11].



Slika 36. Porast tlaka u jezgri za panel s i bez getera, [12].

4.4.5 Nedostaci VIP-a

Iako VIP ima neupitno značajna toplinsko izolacijska svojstva zadržavajući malu debljinu, tu su i nedostaci, kao ograničena veličina, postojanje toplinskih mostova na spoju dva panela i degradacija performansi tijekom vremena, [11,12].

4.4.5.1 Životni vijek VIP-a i definicija vijeka trajanja

Najvažnija komponenta VIP-a, koja utječe na trajanje njegovog životnog vijeka, je ovojnica, tj. njezina svojstva u kombinaciji s odabranim jezgrenim materijalom. Okolina utječe na svojstva polimerne barijere, a povećana vlaga i toplina su čimbenici koji doprinose brzom povećanju difuzije kroz polimerne barijere u VIP-u, a time i smanjenju performansi panela. Silicijev dioksid, obično korišten kao jezgra panela, ima sposobnost da veže vodenu paru i zrak u određenoj mjeri, što ograničava smanjenje performansi zbog prodiranja.

Uzroci povećanje tlaka u jezgri VIP-a su, [12]:

1. Ostatak plina u jezgri
2. Otplinjavanje iz jezgre
3. Prodiranje plina kroz barijeru i njezine rubove

Plinovi koji pretežno difundiraju u VIP, integriranih u ovojnice zgrada, su kisik, CO₂ i vodena para. Prodor plina kroz barijeru je vrlo spor proces, a može biti i odgođen, ovisno o primjeni, dok s druge strane, otplinjavanje iz jezgre može biti mnogo brže i može početi odmah nakon procesa istiskivanja jezgre. Količina otplinjavanje iz jezgrenog materijala će biti puno manja, nego potencijalno prožimanje iz atmosfere, ali nije zanemariv faktor, uzimajući u obzir degradaciju svojstava panela, [12].

Faktori utjecaja na vijek trajanja vakuum izolacijskih ploča su funkcija, [12]:

- minimalnih zahtjeva izvođenja
- Veličine ploče
- Kvalitete izrade
- Izbora komponenti VIP-a
- Uvjeta korištenja
- Rukovanja

Postoje dva pristupa za definiranje vremena vijeka trajanja vakuumskih panela. U prvom pristupu, odlučujući faktor je toplinska provodnost, dok drugi koristi prosječnu toplinsku provodnost tijekom vremena. Prvi pristup je integriran u američkom standardu za vakuum

izolacijske panele, (ASTM Standardni C1484), dok druga definicija može biti korisna za izračun potrošnje energije tijekom vremena.

Vijek trajanja Definicija 1, [12]: proteklo vrijeme, od trenutka proizvodnje do trenutka kada se toplinska vodljivost materijala ili komponente, λ_c , poveća do neke ograničavajuće vrijednosti λ_{lim} ili drugim riječima, vijek trajanja je istekao, ako je postignut sljedeći uvjet:

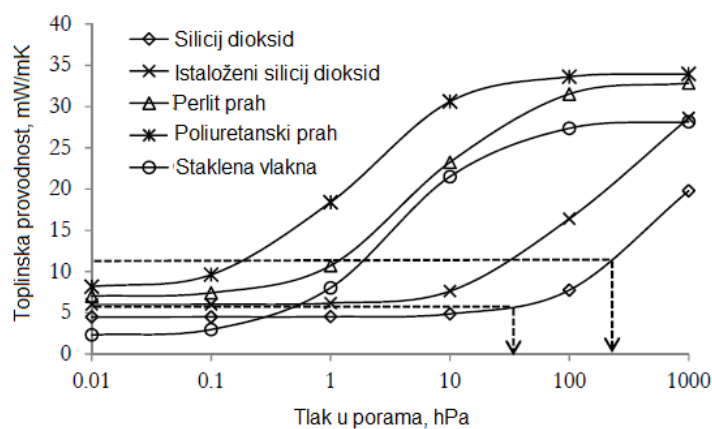
$$|\lambda_c|_{t=t_{SL}} = \lambda_{lim} \quad (16)$$

Vijek trajanja Definicija 2, [12]: proteklo vrijeme, od trenutka proizvodnje ploče ili materijala do trenutka kada prosječna vrijednost toplinske provodljivost materijala ili materijal dosegne neke kritične vrijednosti $\lambda_{critical}$; ili vijek trajanja je istekao, ako vrijedi:

$$|\bar{\lambda}_c|_{t=t_{SL}} = \lambda_{critical} \text{ gdje je } \bar{\lambda}_c = \frac{1}{t} \int_0^t \lambda_c(t) dt \quad (17)$$

S drugom definicijom, moguće je, u proračunu, uzeti u obzir da povećanje stope toplinske provodnosti varira tijekom vremena, zbog moguće ne-linearne korelacije između toplinske provodnosti i tlaka u porama, kao i (teoretski) nelinearnog povećanja tlaka u porama tijekom dužeg vremenskog razdoblja.

Druga definicija omogućuje ograničenja ukupnog gubitka topline kroz zgrade, uključujući toplinske mostove tijekom cijelog vijeka trajanja VIP-a, dok je prva definicija ograničava samo trenutne gubitke topline.



Slika 37. Minimalni kriteriji tražene toplinske provodnosti regulirani dopuštenim pritiskom unutar jezgre na bazi silicij dioksida VIP-a, [12].

U slučaju kada su bitne trenutne performanse, onda je primjenjiva prva definicija. U određenoj primjeni može biti dovoljno da izolacijski materijal ima toplinsku vodljivost $0,010 \text{ W}/(\text{m K})$. I u tom slučaju, može se dopustiti veće prodiranje plina u ploče. Ako je granična vrijednost toplinske vodljivosti $0,005 \text{ W}/(\text{mK})$, tada je dozvoljeno povećanje toplinske vodljivosti vrlo malo, zbog čega je, dopušteni iznos prodiranja plina puno manji nego u prvom slučaju. Ploča će imati kraći vijek trajanja nego u prvom slučaju, ako je stopa prodiranja plina ista. To se događa i ako su sve druge okolnosti jednake. Slučaj s maksimalnom dopuštenom toplinskom vodljivošću od $0,010 \text{ W}/(\text{m K})$ može omogućiti pet puta veći unutarnji tlak, u odnosu na drugi slučaj, prije nego dosegne svoj vijek trajanja. Ovaj primjer se odnosi na ploče s jezgrom od silicijevog dioksida. (Slika 38)

4.4.6. Veličina panela

Veći paneli će imati veći očekivani vijek trajanja od manjih panela. Učinak veličine panela je jednostavno odnos između volumena i duljine šava, kao i volumena i površine barijere. Rubovi, kod zapečaćenih barijernih filmova, su prikazani kao područje povećanog prodiranja. Stoga, u slučaju da se debljina povećava u odnosu na duljinu šavova, tada više plina može prodrijeti u jezgu, prije nego se dosegne kriterij kraja vijeka trajanja panela.

Ako se površina panela povećava dok debljina ostaje ista, tada se omjer volumena i površine neznatno smanjuje, dok se omjer između dužine šava i volumen smanjuje drastično, pod pretpostavkom da će šavovi biti postavljeni duž vanjskih rubova panela. Plinovi ne prodiru kroz prepreke u obliku filma, ako je izrađen od lima ili metalnih folija. Osim toga, u ovom slučaju, veći volumen u odnosu na površinu je poželjan zbog povećanja vijeka trajanja, [12].

4.4.7. Toplinske značajke VIP-a -toplinski mostovi

VIP ne može biti tretiran kao zaseban materijal, već kao cijeli sistem. Tu je jezgra koja je u vakuumu, pa prema tome vrlo dobar izolator. Silicij dioksid ima toplinsku vodljivost u rasponu od $0,005 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ pri maksimalnom unutarnjem tlaku od 10 mbar. Ova vrijednost je mjerena u sredini velikih vakuum ploča i zove se središnja vrijednost ploče.

Barijera je s druge strane ključna za trajnost vijeka VIP-a. Ako je barijera je vrlo niske plinopropusnosti, panel će imati duži vijek trajanja. Jezgra od materijala s malim porama će imati kraći srednji slobodni put, te će stoga biti manje sklon provođenju topline, pa će i ukupna toplinska provodnost biti manja nego u materijalu s većim porama, pri određenom

unutarnjem tlaku. Alternativno, materijal s manjim porama može izdržati viši tlak u jezgri, uz održavanje niske toplinske provodnosti.

Istražuju se redukcija utjecaja toplinskih mostova kao i procjena utjecaja tijekom vijeka trajanja panela. Zbog same koncepcije VIP-a, uočavaju se dvije razine toplinskih mostova: toplinski most VIP-a zbog ovojnice i uslijed zračnog prostora između dvije susjedne ovojnice. Također, na uglovima ploča, pojavit će se dodatni toplinski mostovi, tzv. točkasti mostovi, koji su obično zanemarivi.

Za izračunavanje ukupnog prolaska topline kroz panel svi toplinski mostovi moraju biti dodani u središte ploče i pomnoženi s površinom, vidjeti jednadžbu, [12].

$$\Phi = (\sum (U \cdot A) + \sum (\Psi \cdot l) + \sum X) \cdot (T_i - T_e) \quad (18)$$

Pri čemu je:

Φ = Ukupni protok topline kroz panel (W)

U = Toplinska provodnost u centru panela (W/(m²·K))

A = Površina panela (m²)

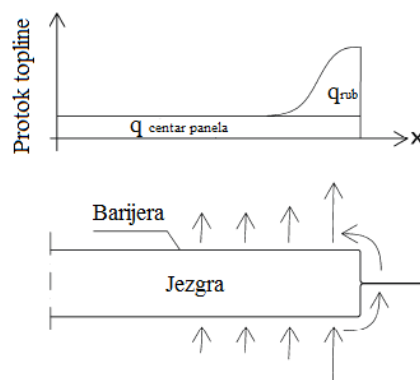
Ψ = Linijska toplinska provodnost ruba (W/(m·K))

l = Duljina ruba-opseg (m)

X = Točkasta toplinska provodnost (W/K)

T_i = Temperatura s unutarnje strane panela (°C)

T_e = Temperatura s vanjske strane panela (°C)



Slika 38. Grafički prikaz presjeka tipično oblikovanog ruba VIP-a i put prolaza topline koji rezultira stvaranjem linijskih toplinskih mostova oko svih rubova panela, [12].

Toplinski most uslijed ovojnice VIP-a

Zbog utjecaja ove vrste toplinskog mosta, ukupna provodnost VIP-a je veća od toplinske provodnosti na sredini panela, [11].

$$\Lambda_{\text{eff}} = \Lambda_{\text{cop}} + \Psi_{\text{edg}} \frac{P}{A} \quad (19)$$

Λ_{eff} - provodnost na sredini panela

Ψ_{edg} - linijski prolaz koji ovisi o debljini panela d , toplinskoj provodnosti centra panela, debljini barijere i toplinskoj provodnosti odgovarajuće folije

P - opseg ruba

A - površina panela

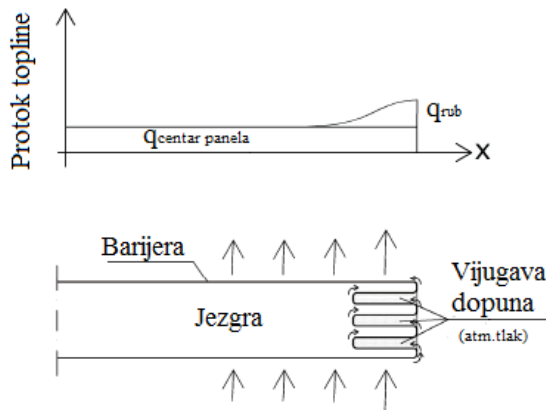
Vrijednost Ψ_{edg} se kreće od 0.001 do 0.4 W/mK, efektivna provodnost u rangu od 0.0051 do 0.0086 W/mK za panele veličine od 1 x 0.5 x 0.02 m. Centar panela ima provodnost od 0.004 W/mK. Iz ovoga iščitavamo kolika je važnost utjecaja rubova panela, [11].

Toplinski most uslijed zračnog prostora između dvije susjedne ovojnice

Zbog nepravilnog oblika ruba panela, postoje uvjeti za stvaranje zračnog prostora između dva susjedna VIP-a. Pretpostavljeno je da nema istjecanja zraka kroz praznine od jedne strane panela do druge. Zračne praznine kod laminiranih aluminijskih folija imaju neznatan utjecaj na linijsku provodnost, gdje je postignuto povećanje vrijednosti Ψ_{edg} od 7-15% za praznine do 5 mm. Međutim prosječna vrijednost $\Psi_{\text{edg}} = 0.32$ i 0.17 W/mK je testirana i za debljine panela 10 i 20 mm, redom. Zaključeno je, da VIP s laminiranim aluminijskim folijama nije preporučljivo koristiti za panele veličine do 1 m². Usporedno s laminiranim aluminijskim folijama, vrijednost Ψ_{edg} se mijenja, za različite razmake, ako se koriste aluminijom presvučene višeslojne folije: povećanje vrijednosti Ψ_{edg} u rasponu od 600-900% je testirano za zračne praznine od 5 mm, u odnosu na praznine od 0 mm. Međutim, vrijednost Ψ_{edg} se održava u rasponu od 0.012-0.022 W/mK što je manje uspoređujući laminirane aluminijske folije. Praznine trebaju biti što manje da bi se postigao odgovarajući toplinski otpor VIP-a.

No problem linijskih toplinskih mostova je možda moguće riješiti odgovarajućim dizajnom ruba, pri čemu se taj dizajn treba bazirati na činjenici da je potrebno ostvariti veći put prolaska

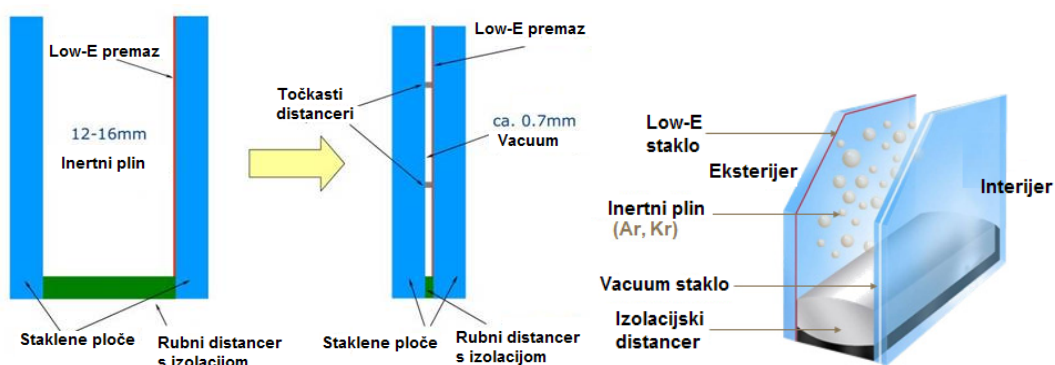
topline s jedne strane na drugu. Istraživanja su pokazala da optimizirani dizajn ruba, vijugavi rub, ima potencijal da smanji toplinske gubitke za trećinu u odnosu na ravne rubove.



Slika 39. Vijugavi rub, put topline je prolongiran što rezultira smanjenim protokom topline na rubovima, [12].

4.4.8. Vakuum ostakljenje

Primjena vakuum konstrukcijskog koncepta toplinskog izoliranja ovojnica zgrada se u novije vrijeme primjenjuje i u izvedbi transparentnih ostakljenih dijelova ovojnica tj. u ostakljenju prozora i ostakljenih fasada zgrada. Pri tome se klasični koncept dvostrukog ostakljenja na sl. a) dopunjava vakuum izolacijskom staklenom pločom (sl. b) ostvarujući mnogo bolja toplinska svojstva u pogledu zaštite od gubitka topline kroz ostakljenje. Klasična izvedba prozorskog ostakljenja na sl.a) ostvaruje koeficijent prolaza topline od $U_g = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$, dok u kombinaciji prema sl. c) se postiže $U_g = 0,3-0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$.



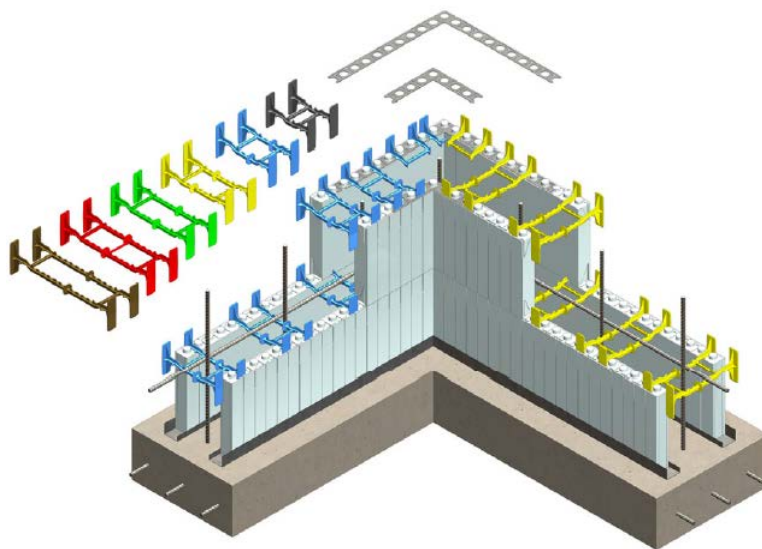
- a) Klasična izvedba dvostrukog ostakljenja s low-E premazom
- b) vakuum staklena ploča s low-E premazom
- c) dvostruko low- E + vakuum ostakljenje

Slika 40. Prikaz klasičnog i vakuum ostakljenja s low-E premazom, [19]

5. INTEGRACIJA MODERNIH IZOLACIJSKIH MATERIJALA U MODULARNE ZIDOVE-ICF (insulated concrete form) TEHNOLOGIJA KORIŠTENJA BETONA SA STALNIM IZOLACIJSKIM OPLATAMA

U novije vrijeme se razvijaju i tehnologije izgradnje zgrada koje u konstrukcijskim elementima izvedbe integriraju izolacijske materijale. Odnosno u modularnoj se izvedbi zidova ili ploča koriste integralni oplatni elementi izrađeni od izolacijskih materijala (EPS, XPS), formirajući time jedinstvenu, višeslojnu, nosivu i izolacijsku strukturu. Primjer takvog hibridnog sistema nosivih elemenata, modularnih zgrada, je QUAD-LOCK (<http://www.cemgra.hr/#>) sistem, kojeg tvrtka Cemgra d.o.o koristi u projektiranju i izvedbi montažnih, niskoenergetskih i pasivnih stambenih objekata.

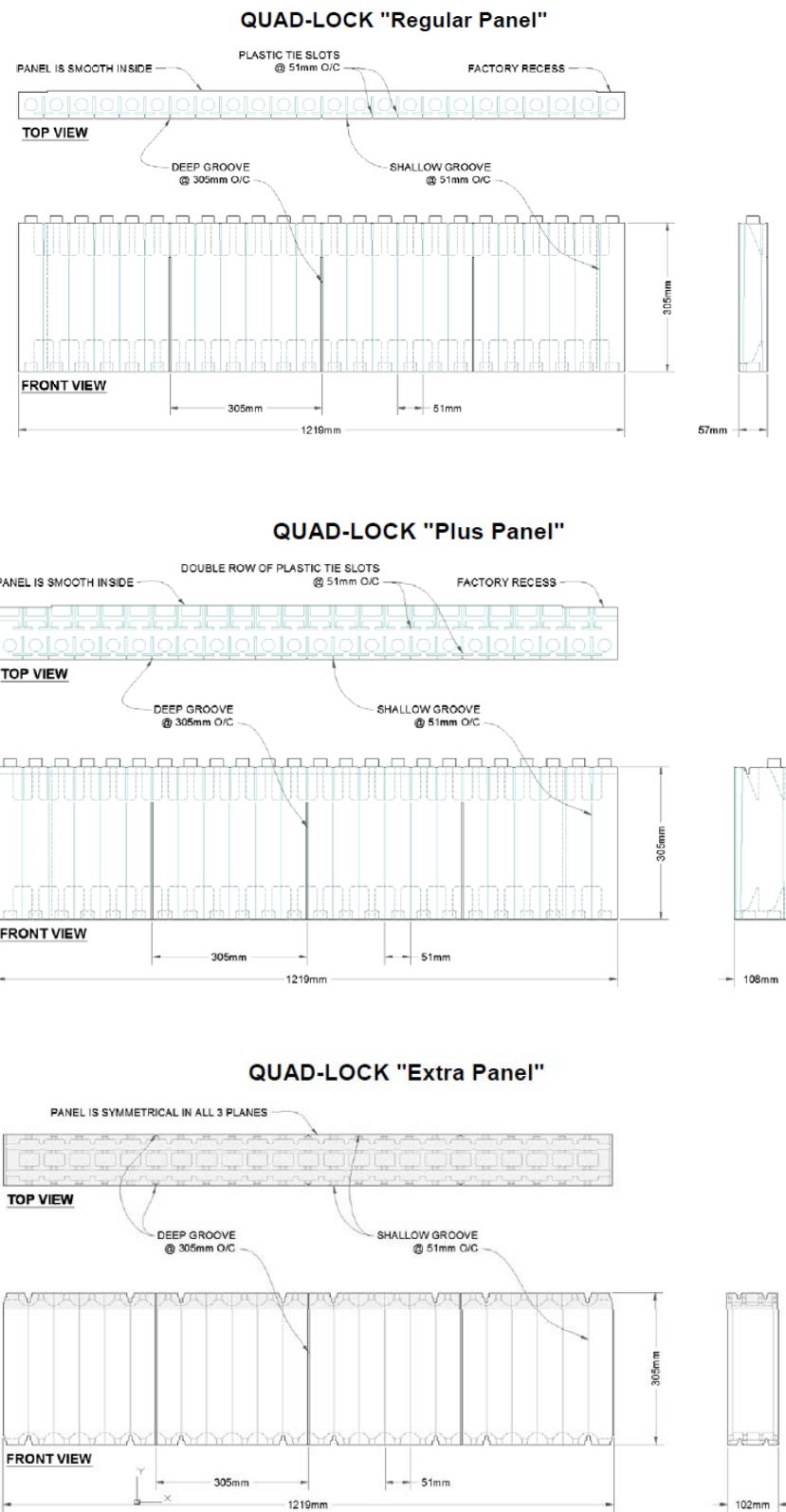
Cemgra QUAD-LOCK modularni se sustav formira postavljanjem EPS izolacijskih panela na razmaku definiranom strukturalnom debljinom betonskog zida, oblikujući ujedno integralnu oplatu i toplinsku izolaciju. Međurazmak izolacijskih, oplatnih panela se postiže fiksiranjem specijalnim PVC kopčama koje različitim bojama definiraju različite debljine zidova, slika 41.



Slika 41. Konstrukcijska koncepcija QUAD-LOCK sistema, [20]

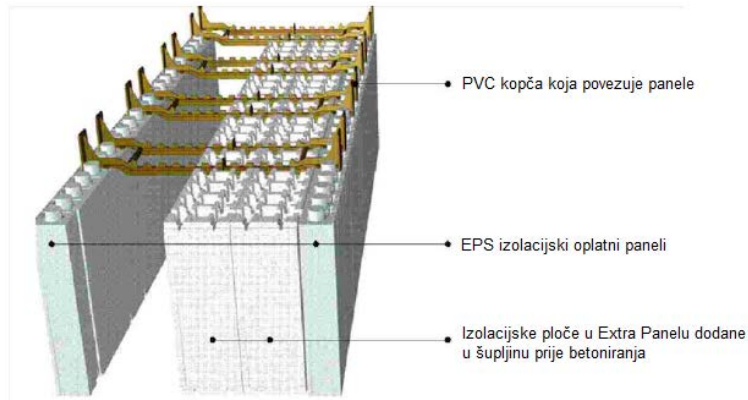
Izolacijski paneli kao i armaturno ojačanje se montiraju prije izlivanja betona.

U izvedbi se razlikuju tri vrste oplatno izolacijskih panela, slika 42:



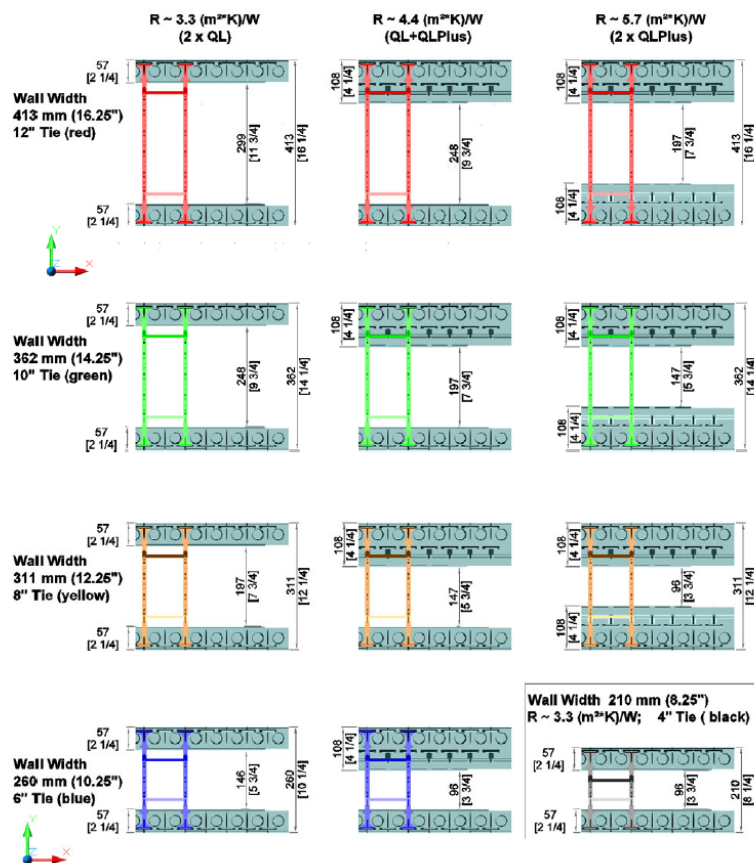
Slika 42. Vrste oplatno izolacijskih panela, [20].

Betonske jezgre Cemgra QUAD-LOCK sustava, ovisno o strukturalnoj nosivosti, mogu biti od 96 do 655 mm debele.



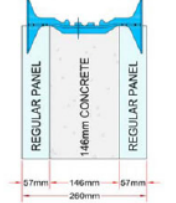
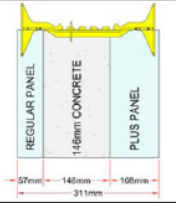
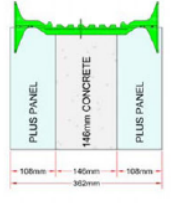
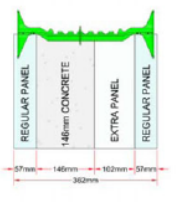
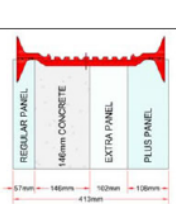
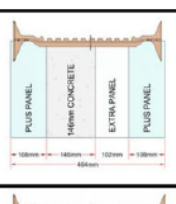

Slika 43. Izvedbeni koncept betonskog zida s Extra Panelima, [20]

Različite konstrukcijske izvedbe izolacijskih oplatnih panela Cemgra QUAD-LOCK sustava osiguravaju različite razine toplinske zaštite definirane koeficijentom prolaza topline (U vrijednost, W/m^2K), odnosno otporom prolasku topline (R vrijednost, m^2K/W), slika 43, tablica 3.



Slika 44. Konstrukcijske izvedbe izolacijskih, oplatnih panela, [20].

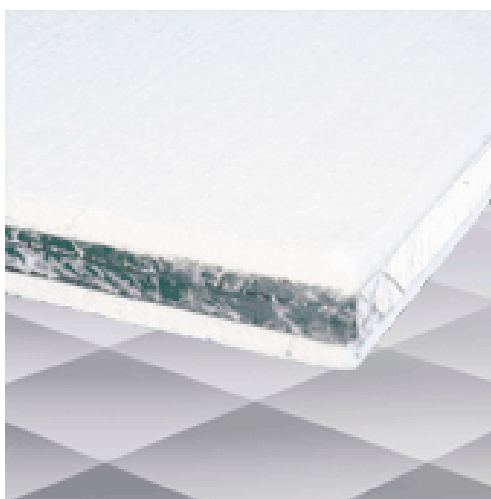
Tablica 3. Konstrukcijske i toplinske karakteristike QUAD-LOCK sustava, [20].

Sample with 147 mm concrete core				Nominal value of thermal conductivity λ				Nominal value of thermal resistance of shuttering elements									
				Type	Regular	Plus	Extra	EPS shuttering leaves		concrete core							
				[W/m×K]	0,0346	0,0370	0,0369	R _{0,EPFS} [*]	reduction factor (clause 2.2.7.1)	R _{0,EPFS} [*]	R _{0,concrete} [*]						
Concrete core	Thickness of the wall	Regular (QPX2, 57mm)	Plus (QPX2 Plus, 108mm)	EXTRA (QPXTRA, 102mm)	FTB4 (black)	FTB6 (blue)	FTG10 (yellow)	FTG10 (green)	FTR12 (red)	FTB14 (brown)	XT (orange)	Nominal value of thermal resistance of shuttering elements					
												R _{0,element} [*]	reduction factor (clause 2.2.7.1)	including factor	R _{0,element} [*]		
[mm]	[mm]											[m ² K/W]					
	96 210 147 260 197 311 248 362 299 413 350 464 400 514 451 565 502 616 553 667 604 718 655 769	X			X								3,333	0,961	3,203	3,295	0,038
	96 260 147 311 197 362 248 413 299 464 350 514 400 565 451 616 502 667 553 718 604 769	X	X			X							4,605	0,967	4,453	4,566	0,038
	96 311 147 362 197 413 248 464 299 514 350 565 400 616 451 667 502 718 553 769	X		X			X						5,876	1,0	5,876	5,838	0,038
	96 311 147 362 197 413 248 464 299 514 350 565 400 616 451 667 502 718 553 769	X		X					X				6,097	1,0	6,097	6,059	0,038
	96 362 147 413 197 464 248 514 299 565 350 616 400 667 451 718 502 769	X	X	X									7,369	1,0	7,369	7,331	0,038
	96 413 147 464 197 514 248 565 299 616 350 667 400 718 451 769	X	X	X									8,640	1,0	8,640	8,602	0,038
	96 413 147 464 197 514 248 565 299 616 350 667 400 718 451 769	X		2X									8,882	1,0	8,882	8,823	0,038

5.1. Usporedna analiza Quad-Lock "Regular" sustava sa i bez Vakuum izolacijskih ploča

U cilju analiziranja dimenzijskih i toplinsko izolacijskih parametara hibridnog Cemgra QUAD-LOCK sustava nosivih elemenata, izvedena je usporedna analiza klasičnog "Regular" sustava sa betonskom jezgrom od 147 mm i izolacijskim, vanjskim i unutarnjim, panelima debljine 57 mm, u odnosu na isti sustav s dodanim vakuum izolacijskim panelima tipa va-Q-vip F EPS (<http://www.va-q-tec.com/de/>)

Ovaj dodatni VIP je debljine 20 mm, a sačinjen je kao višeslojni panel koji s obje strane ima EPS ploče od 5 mm i vakuum izolacijsku jezgru od 10 mm, slika 44.



Slika 45. va-Q-vip F EPS panel, d=20 mm, [21].

Tablica 4. Karakteristike va-Q-vip F EPS panela, [21]

Toplinska provodnost	
• Početna vrijednost	< 0.0043 W/(mK) debljine 20 mm (izmjerena vrijednost)
• Procijenjena vrijednost s rubnim i vremenskim gubicima	0.0070 W/(mK) ta debljine veće od 20 mm, 0.0080 W/(mk) za 10-15 mm (izmjerena vrijednost)
• S infiltriranim zrakom	0.020 W/(mK)
Temperaturna stabilnost	-70 °C to +70 °C
Toplinska osjetljivost	Nije osjetljiv na temperaturne šokove u ovom intervalu
Otpornost na vlagu	0 % do 60 %

Unutarnji tlak	< 5 mbar
Povećanje tlaka	približno 1 mbar/god (za debljinu od 20 mm, u sobnim uvjetima)
Standardne dimenzije (L x W) I & II	I: 1000 mm x 600 mm, II: 500 mm x 600 mm
Nestandardne dimenzije III & IV	III: Površina > 0,10 m² i < 0,60 m², IV: površina < 0,10 m²
Forme panela	Pravokutnik, trokut, trapez, posebni oblici
Debljina	10 mm do 50 mm
Tolerancija dimenzija	
• 0 do 500 mm	+2 / -4 mm
• 501 do 1000 mm	+2 / -5 mm
Tolerancija debljine	± 5%
Specifični toplinski kapacitet	0.8 kJ/(kg·K) (pri sobnoj temperaturi)
U-vrijednost	
• Početna vrijednost	0.22 W/(m²K) (za debljinu 20 mm)
• Procijenjena vrijednost s rubnim i vremenskim gubicima	0.35 W/(m²K) (izmjerena vrijednost) za 20 mm debljine
Masa po površini	4 kg/m² (za debljinu 20 mm)
Tlačna otpornost	približno 150 kPa
Životni vijek	Ovisno o uporabi do 60 god.
Vatrootpornost	DIN 4102-B2
Laminacija	
• Laminacija s EPS-om	S jedne ili obe strane
• Debljina laminacije	10 mm
Toplinska provodnost za 10 mm debljine	0,040 W/(mK)

S obzirom na podatke dane u tablici za "Regular" sistem s betonskom jezgrom od 147 mm, otpor prolasku topline iznosi $R = 3.223 \text{ m}^2\text{K/W}$ (uključujući korekcijski faktor)

Ako tom sustavu s vanjske strane dodamo vakuum izolacijsku ploču, navedenih karakteristika, ukupni otpor prolasku topline ovog hibridnog sustava iznosi:

$$R_{QLr} = 3.223 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$R_{VIP} = \frac{1}{U_{VIP}} = \frac{1}{0.35} = 2.857 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$R_{QLr+VIP} = R_{QLr} + R_{VIP} = 3.223 + 2.857 = \mathbf{6.08} \text{ m}^2\text{K/W}$$

S druge strane se analiziraju podaci iz tablice za sustav s istom debljinom betonske jezgre, uočiti ćemo da približno istu vrijednost otpora prolasku topline ima Regular sistem s dodatkom Extra panela, vrijednosti $R=6.118 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Ako usporedimo ukupne debljine ova dva hibridna sistema, uočiti ćemo da je zid s VIP-om ukupne debljine 280 mm (260+20mm), u odnosu na Regular sistem s dodatkom Extra panela ukupne debljine 362mm.

Iz toga se zaključuje da su se dodatkom VIP-a ostvarila približno ista toplinska svojstva, ali je ukupna debljina zida manja za 82 mm. To daje mogućnost da se za iste vanjske gabarite zgrade osigura veća površina korisnog boravišnog prostora. Nadalje, potpuna opravdanost primjene VIP-a kao dodatne obloge, u ovakvim hibridnim sustavima, bi trebala biti potvrđena tehno-ekonomskom analizom isplativosti jednog u odnosu na drugi prethodno analizirani sustav. Svakako optimalno rješenje bi trebalo tražiti u nastojanju da se postigne ista kvaliteta tehničkog sustava s najnižom cijenom izvedbe. U svakom slučaju, primjena VIP-a daje puno šire i veće mogućnosti kombiniranja ovakvih hibridnih sustava u odnosu na EPS kao osnovni izolacijski materijal. Treba obratiti pozornost i na mogućnost integracije PCM panela u višeslojnu strukturu ovakvih hibridnih sustava. No u tom slučaju, analiza toplinske učinkovitosti takvih sustava je mnogo složenija jer se radi o dinamičkim sustavima koji mijenjaju svoja svojstva, tijekom dana i noći, zime ili ljeta. Stoga bi se njihova toplinska učinkovitost trebala utvrditi višegodišnjim eksperimentalnim istraživanjima u različitim klimatskim zonama.

6. ZAHTJEVI TOPLINSKE IZOLACIJE SUTRAŠNJICE

Poželjna je što je moguće niža toplinska provodnost za toplinske izolacijske materijale i rješenja koja će se početi primjenjivati u skoroj budućnosti. Osim toga, provodnost se ne smije povećavati u periodu od 100 i više godina. Nadalje, takvi materijali bi trebali održati svoju nisku toplinsku provodnost čak i ako su perforirani vanjskim predmetima poput čavala (ovo se ne odnosi na povećanje provodnosti uslijed lokalnih toplinskih mostova), [10].

Tehnologije bazirane na vakuumu mogu imati problema u održavanju niske toplinske provodnosti tijekom dužeg vremenskog perioda, zbog prodiranja vlage i zraka tijekom godina, [10].

Krucijalni zahtjev kojeg trebaju zadovoljiti budući toplinsko izolacijski materijali je da se njihova veličina može prilagoditi na gradilištu, tj. mogućnost rezanja na željene dimenzije, bez gubitka svojstava. Vakuum izolacijski paneli ne mogu zadovoljiti ovaj zahtjev, zbog svojeg specifičnog koncepta kojeg čini jezgra omotana metaliziranom višeslojnom barijerom, [10].

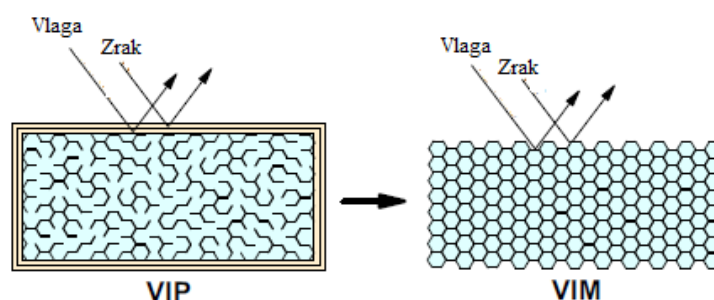
7. NAPREDNI IZOLACIJSKI MATERIJALI SUTRAŠNJICE

U ovu skupinu, naprednih izolacijskih materijala (advanced insulation materials-AIM) i koncepata spadaju, [10]:

- Vakuum Izolacijski Materijali (VIM)
- Plin Izolacijski Materijali (GIM)
- Nano Izolacijski Materijali (NIM)
- Dinamički Izolacijski Materijali (DIM)

7.1. Vakuum Izolacijski Materijali (VIM)

To su homogeni materijali sa zatvorenim malim pornim strukturama, ispunjenim vakuumom, s cjelokupnom toplinskom vodljivošću manjom od $4 \text{ mW}/(\text{mK})$, u neopterećenom stanju. VIM se može oblikovati i prilagoditi na gradilištu bez gubitka niske toplinske vodljivosti. Lokalna oštećenja VIM-a rezultiralo bi stvaranjem lokalnog toplinskog mosta, tj. ne bi bilo značajnih gubitaka slabe toplinske vodljivosti, [10].



Slika 46. Razvoj od VIP-a do VIM-a, [10]

7.2. Plin Izolacijski Materijali (GIM)

To su homogeni materijali sa zatvorenim malim pornim strukturama, ispunjenim niskovodljivim plinom, kao što su argon, kripton i ksenon, s cjelokupnom toplinskom vodljivošću manjom od $4 \text{ mW}/(\text{mK})$, u neopterećenom stanju. GIM je zapravo jednak VIM-u, razlika je samo u supstanci koja ispunjava zatvorene porne strukture, [10].

7.3. Dinamički Izolacijski Materijali (DIM)

To su materijali kod kojih toplinska vodljivost može biti kontrolirana unutar željenog raspona.

Kontrola toplinske provodnosti teoretski može biti postignuta pomoću:

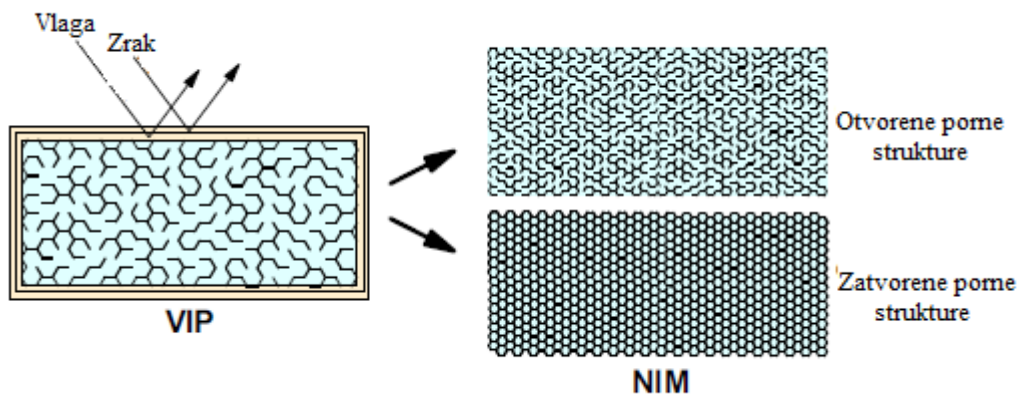
- unutarnjeg pornog plina, uključujući srednji slobodni put molekula plina i interakciju površina molekula plina
- emisivnosti površina unutarnjih pora
- toplinske vodljivosti rešetke u čvrstom stanju

Što je zapravo toplinska vodljivost u čvrstom stanju?

Moguća su dva modela, fononska toplinska provodnost (vibracije atomske rešetke) i slobodna elektronska toplinska provodnost, [10].

7.4. Nano Izolacijski Materijali (NIM)

Razvoj od VIP-a do Nano Izolacijskih Materijala NIM je ilustriran na Slici 46.. Kod NIM-a veličina pora unutar materijala je smanjena ispod određene granice, tj. 40 nm ili niže za zrak, da bi se postigla ukupna toplinska vodljivost manja od $4 \text{ mW}/(\text{mK})$, u neopterećenom stanju.



Slika 47. Razvoj od VIP-a do NIM-a, [10].

Mrežasta struktura kod NIMa, za razliku od VIM-a i GIM-a, treba spriječiti ulazak vlage i zraka u strukturne pore tijekom životnog vijeka od najmanje 100 god, [10].

Ali kako NIM postižu svoju nisku toplinsku vodljivost bez apliciranja vakuuma unutar pora?

7.4.1. Knudsenov učinak-nano pore NIM-a

Smanjenjem veličine pora ispod određene granice, tj. traženog promjera pora nižeg od 40 nm, ukupna toplinska vodljivost postaje jako niska (<4 mW/mK s odgovarajućom nisko provodnom mrežastom strukturom), čak i sa zrakom ispunjenim porama.

Ovo se događa zbog tzv. Knudsenovog efekta, gdje je srednji slobodni put molekula plina veći nego promjer pora. Tako da će molekule plina, koje se nalaze unutar pora, udarati zid pora, a ne neku drugu molekulu plina. Toplinska vodljivost plina λ_{gas} , koja se uzima u računu za Knudsenov efekt, može biti zapisana u jednostavnijem obliku, [10]:

$$\lambda_{\text{gas}} = \frac{\lambda_{\text{gas},0}}{1 + 2\beta\text{Kn}} = \frac{\lambda_{\text{gas},0}}{1 + \frac{\sqrt{2}\beta k_B T}{\pi d^2 p \delta}} \quad (20)$$

Gdje je

$$\text{Kn} = \frac{\sigma_{\text{mean}}}{\delta} = \frac{k_B T}{\sqrt{2}\pi d^2 p \delta} \quad (21)$$

λ_{gas} = toplinska vodljivost plina unutar pora (W/(mK))

$\lambda_{\text{gas},0}$ = toplinska vodljivost plina unutar pora pri standardnom tlaku i temperaturi (W/(mK))

B = koeficijent koji opisuje učinkovitost prijenosa energije sudara molekulskih zidova (između 1.5-2.0)

k_B = Boltzmann-ova konstanta $\approx 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K

T = temperatura (K)

d = promjer sudara molekule plina (m)

p = plinski tlak u porama (Pa)

δ = karakteristični promjer pora (m)

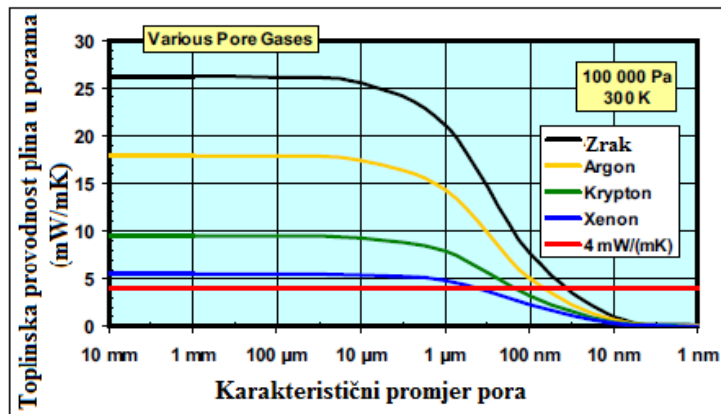
σ = srednji slobodni put molekula plina (m)

Knudsenov efekt je grafički vizualiziran u 2D i 3D na slikama, prikazom najniže dopuštene vrijednosti toplinske vodljivosti od 4 mW/(mK). Treba uočiti da su prikazi logaritamski, uvažavajući promjer pora i porni tlak.

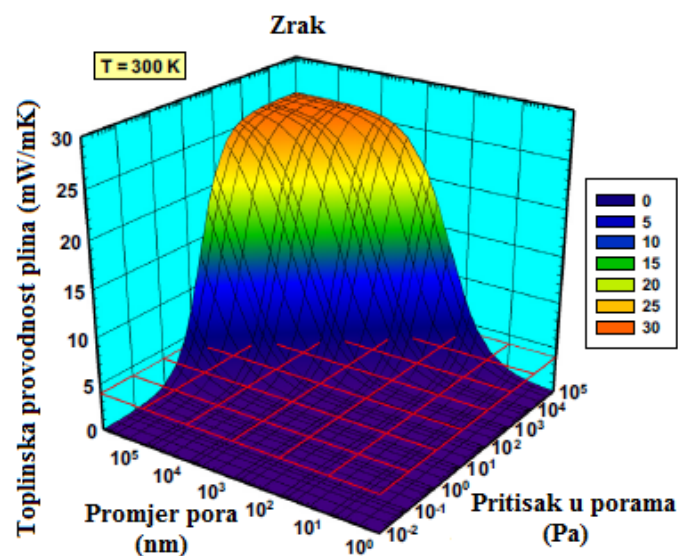
Promjeri sfernih sudara (d), korišteni u proračunu su 3.66, 3.58, 4.08 i 4.78 redom za zrak, Ar, Kr, i Xe.

Kovalentni promjeri molekula plina nisu uključeni u ovaj proračun. Osim toga, $\beta = 1.75$ i $T = 300$ K su izabrani za proračun. U dodatku izabrane vrijednosti za $\lambda_{\text{gas},0}$ su 26.2, 17.9, 9.5 i 5.5 mW/mK redom za zrak, Ar, Kr i Xe (pri temperaturi od 300 K). Na Slici 47,48. izabran je porni tlak od 100 000 Pa (≈ 1 atm = 101 325 Pa)

Za izabrane je vrijednosti na slikama 47. i 48., pokazan brz pad toplinske vodljivosti za sva 4 navedena plina, kod promjera pora od 1 μ m- 10nm i pornog tlaka od 10 Pa-0.1 Pa (za više računskih detalja i grafičkih prikaza pogledati Jelle et. al 2010)



Slika 48. 2D prikaz utjecaja promjera pora na toplinsku provodnost zraka, Ar, Kr i Xe, [10].



Slika 49. 3D prikaz utjecaja promjera pora na toplinsku provodnost zraka, argona, kriptona i Xenona, [10].

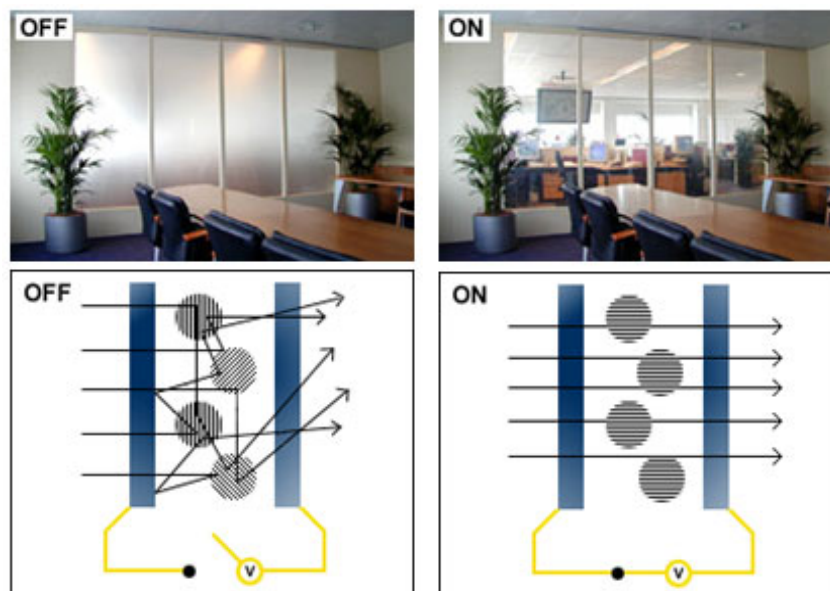
7.4.2. Ukupna toplinska provodnost kod NIM-a

Rešetka NIM-a u čvrstom stanju mora zadržati što je moguće nižu vodljivost, kako bi se ukupna toplinska provodnost održala niskom.

Ako su postignuti niska provodnost rešetke u čvrstom stanju i niska toplinska provodnost plina koji ispunjava pore, tada NIM mogu postići dobre performanse toplinske provodnosti, [10].

7.4.3. Aktivni nano premazi na “pametnom” staklu (smart glass)

Ostakljene fasade zbog dominantno izražene površine ostakljenog dijela u odnosu na netransparentni dio fasade, na zgradama u klimatskim zonama s izraženim sunčanim djelovanjem, imaju nedostatak moguće pojave pregrijavanja unutarnjih prostorija zbog aktivnog i pasivnog sunčevog zračenja, u tim sunčanim periodima. Taj nedostatak se može izbjeći ugradnjom pametnih stakala koja unutar slojeva svoje strukture imaju fotoosjetljive nano premaze s tekućim kristalima. Ta stakla u slučaju visoke sunčeve aktivnosti zračenjem (ljeti) isključuju zatvoreni elektro-strujni krug dovodeći kristale premaza u kaotično stanje i tako sprječavajući izravno prodiranje topline zračenja sunčevih zraka kroz staklo. Kada nam je djelovanje topline zračenja poželjno u prostorijama zgrade (zimi) onda su stakla postavljena na ON-opciju čime se raspored tekućih kristala uniformira i tako omogućuje propuštanje svjetlosti i izravne topline zračenja sunca, sl.49.



Slika 50. Pametna (smart) stakla sa switch ON-OFF tehnikom aktiviranja, [22].

7.5 Potencijal sadašnji i budućih "STATE-OF-THE-ART" materijala

Kratak pregled mogućnosti postojećih i budućih "STATE-OF-THE-ART" materijala i tendencija da postanu izolacijski materijali visokih performansi sutrašnjice, dan je u Tablici 4, [10].

Tablica 5. Prikaz postojećih i budućih "STATE-OF-THE-ART" materijala, [10]

Toplinski Izolacijski Materijali i Rješenja	Niska toplinska provodnost-bez opterećenja	Niska dugoročna toplinska provodnost	Perforacija-Robustnost	Moguće prilagođavanje dimenzija	Sposobnost nosivosti	Toplinski izolacijski materijali i rješenja sutrašnjice
Tradicionalni						
Mineralna vuna i Polistiren	Ne	Ne	Da	Da	Ne	Ne
Današnji State-of-The-Art						
Vakuum Izolacijski Paneli (VIP)	Da	Možda	Ne	Ne	Ne	Danas i u bliskoj budućnosti
Plinom Ispunjeni Paneli (GFP)	Možda	Možda	Ne	Ne	Ne	Vjerojatno ne
Aerogel	Možda	Možda	Da	Da	Ne	Možda
Fazno Promjenjivi Materijali (PCM)	-	-	-	-	-	Skladištenje i otpuštanje topline
Budući State-of-the-Art-napredni izolacijski materijali (AIM)						
Vakuum Izolacijski Materijali (VIM)	Da	Možda	Da	Da	Ne/Možda	Da
Plin Izolacijski Materijali (GIM)	Da	Možda	Da	Možda	Ne/Možda	Možda
Nano Izolacijski Materijali (NIM)	Da	Da	Da/Odlično	Da/Odlično	Ne/Možda	Da/Odlično
Dinamički Izolacijski Materijali (DIM)	Možda	Možda	Nepoznato	Nepoznato	Ne/Možda	Da/Odlično
Drugi?	-	-	-	-	-	-

8. Zaključak

U radu je napravljen pregled tradicionalnih, novih inovativnih, već postojećih, kao i naprednih materijala i tehnologija, koji su tema brojnih istraživanja, a koja će u vrlo skoroj budućnosti naći široku primjenu u poboljšanju energetske učinkovitosti ovojnicama zgrada. Analizom klasičnih materijala i tehnologija u izvedbi izolacija na ovojnicama zgrada, utvrđeno je da se u svijetu sve više razvijaju novi materijali i inovativne tehnologije kojima se toplinske performanse ovojnicama višestruko poboljšavaju, u odnosu na klasične. Svi novi materijali korišteni u izvedbi ovojnicama zgrada se mogu svrstati u dvije skupine, pasivne i aktivne.

Pasivni materijali i tehnologije imaju za cilj smanjenje koeficijenta toplinske provodnosti, za razliku od aktivnih koji mijenjaju svoja fizikalna svojstva, ovisno o temperaturnim uvjetima okoline. No, uočeno je da se u oba slučaja razvoj temelji na suvremenoj nanotehnologiji. U svemu tome se posebno naglašavaju principi održivog i ekološki prihvatljivog dizajniranja sustava, kojima će se osigurati smanjenje štetnih utjecaja na Prirodu, a koji su rezultat dosadašnje primjene i proizvodnje tradicionalnih materijala i tehnologija.

Analizom provedenom u radu su predstavljene i široke mogućnosti kombiniranja pasivnih i aktivnih sustava u izvedbi energetski učinkovitih ovojnicama zgrada.

U tom smislu, kao krajnji zaključak, sugerira se pokretanje razvojno-istraživačkih projekata kojima bi se razvili integralni koncepti višeslojnih, pametnih ovojnicama zgrada

LITERATURA

- [1]-Andrassy, M. ; Balen, I. ; Boras, I. ; Dović, D. ; Hrs Borković, Ž. ; Lenić, K. ; Lončar, D. ; Pavković, B. ; Soldo, V. ; Sučić, B. ; Švaić, S. Priručnik za energetska certificiranje 1. Zagreb: Program Ujedinjenih naroda za razvoj-UNDP, 2010.g.
- [2]- <http://www.gradimo.hr/izolacijski-materijali>
- [3]- <http://eeudrugajasen.weebly.com/izolacijski-materijali.html>
- [4]- <http://retrocladding.co.uk/e-brick/>
- [5]- Wikipedija
- [6]-Muruganatham, K. Application of Phase Change Material in Buildings: Field Data vs. EnergyPlus Simulation. A Thesis Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science. Arizona State University, December 2010.
- [7]-Kosny, J. ; Shukla, N. ; Fallahi, A. Cost Analysis of Simple Phase Change Material-Enhanced Building Envelopes in Southern U.S. Climates. U.S. Department of Energy/Energy Efficiency & Renewable Energy, Building Technologies Program. Fraunhofer CSE, January 2013
- [8]-<http://www.technologyreview.com/article/401383/phase-change-materials/>
- [9]- <http://www.phasechange.com/index.php/en/about/how-it-works>
- [10]-Jelle,B.P ; Gustavsen, A. ; Grynning, S. ; Wegger, E. ; Sveipe, E. ; Baetens, R. Nanotechnology and Possibilities for the Thermal Building Insulation Materials of Tomorrow. Journal of Building Physics, 2010
- [11]-Liu, X. Benefits of vacuum insulation panels in buildings envelopes for warm-keeping. Master Thesis of Energy System, June 2012.
- [12]-Thorsell, T. Advances in Thermal Insulation – Vacuum Insulation Panels and Thermal Efficiency to Reduce Energy Usage in Building. Doctoral thesis. KTH Architecture and the Built Environment, Stockholm. March 2012.
- [13]-NASA's Glenn Research Center's Mechanically Strong, Flexible Polyimide Aerogels, 2012
- [14]-Kosny, J. Short History of PCM Applications in Building Envelopes, Chapter 2. Springer International Publishing Switzerland, 2015
- [15]- <http://www.lbl.gov/>
- [16]-Selkowitz, S. ; Insulation Technologies and Materials Technologies System and Tools in the U.S.A ; IEA Building Envelope Technologies and Policies Workshop, Paris, 17/11/2011
- [17]- <http://www.alibaba.com/product-detail/PCM-phase-change-material>
- [18]- <http://gsdmaterialscollection.tumblr.com/post/13110785188/phase-change-materials>
- [19]- <http://www.lghausys.c11.jenuaryom/eng/product/windows/glass/vacuum.jsp>

[20]-European Technical Approval ETA- 06/0189, QUAD-LOCK Building systems, DIBt, from 19 February 2013 to 11 January 2017.

[21]- <http://www.va-q-tec.com/en/products/vacuum-insulation-panel-vip/va-q-vip.html>

[22]- <http://inhabitat.com/super-smart-privacy-glass/>

[23]-DOW CORNING, High Performance Insulation, For Next-Generation Curtainwalling