



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI
FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



Provođenje toplote kroz zid

- diplomski rad -

Mentor:

Dr Imre Gut

Kandidat:

Kristina Fodor, 436/05

Novi Sad, 2011

Ovom prilikom bih želela da se zahvalim mentoru, prof. dr Imretu Gutu, na strpljenju i saradnji. Posebno se zahvaljujem svojim kolegama, i roditeljima što su bili uz mene i u teškim, ali i onim lepim trenucima tokom studiranja.

Sadržaj

Uvod.....	4
Glava 1	6
1 Osnovne osobine materijala koji se koriste u građevinarstvu.....	6
1.1 Fizičke osobine materijala	7
1.2 Fizičke osobine pod dejstvom spoljnih uticaja	8
1.2.1 Prenošnje toplote.....	9
1.2.1.1 Prenos toplote provođenjem	9
1.2.1.2 Stacionarno jednodimenziono provođenje.....	12
1.2.1.3 Provođenje toplote kroz jednoslojni zid	14
1.2.1.4 Provođenje toplote kroz višeslojni zid.....	16
1.2.1.5 Koeficijent prolaza toplote, K.....	17
Glava 2	20
2.1. Opšti uslovi za termoizolacione materijale.....	20
Glava 3	23
3.1. Spoljašnja izolacija zida.....	25
3.2. Unutrašnja izolacija	34
3.3. Izolacija šupljeg zida.....	34
Glava 4	44
4 Model aktivne izolacije.....	44
4.1. Model aktivne izolacije sa premošćenjem	46
4.1.1. Opis simulacije.....	49
4.1.2. Simulacije i analiza simulacija.....	50
4.1.2.1. Neizolovan zid	50
4.1.2.2. Uticaj izolacije	55
4.1.2.3. Uticaj vrste izolacionog materijala	58
4.1.2.4. Uticaj debljina izolacionog materijala	60
4.1.2.5. Uticaj debljine nosećeg zida	62
4.1.2.6. Uticaj debljine nosećeg zida u konstrukciji "sendvič" zida	65
4.1.2.7. Efekat hlađenja.....	68
5 Zaključak.....	70
6 Literatura.....	72

Uvod

Sve do prve polovine dvadesetog veka nije se poklanjala velika pažnja termičkim osobinama spoljnih zidova. Zidovi su uglavom građeni po starim empirijskim pravilima. Kod nas je važno pravilo: dovoljno je da je spoljni zid debljine 1,5 pune opeke. Ukoliko zid nije bio dovoljno toplotno izolovan, prostorije su se jače grejale, a kako energenti (drvo, ugalj, struja, gas) nisu bili skupi, termičke osobine zidova nisu bile merodavne za dimenzionisanje spoljnih zidova.

Zbog energetske krize izazvane velikim skokom cene nafte, tzv. naftnog šoka, kod nas je 1980. godine donesen standard pod nazivom: "Toplotna tehnika u građevinarstvu TEHNIČKI USLOVI ZA PROJEKTOVANJE I GRAĐENJE ZGRADA", po kome su uslovi za toplotnu zaštitu pooštreni.

Prema tome, potreba uštede energije koja se troši na zagrevanje prostorija, aktuelna je poslednjih trideset godina. Prosečna zgrada u Srbiji na grejanje godišnje troši 200 do 280 kWh/m² energije, standardno izolovana ispod 100 kWh/m², dok savremene niskoenergetske kuće troše 40 kWh/m², a pasivne 15 kWh/m² i manje. Poslednjih godina rasprava o značaju uštede energije dobija na intenzitetu, zbog potrebe da se smanji emisija gasa CO₂ u atmosferu, koji je jedan od glavnih uzročnika najaktuelnijeg problema, globalnog zagrevanja. Takođe, postoje vrlo značajni higijenski i zdravstveni razlozi, zbog kojih se ovoj pojavi posvećuje velika pažnja. Na primer, prilikom odvođenja toplote u većoj količini, površina zida postaje vlažna (uglovi prostorije) te dolazi do obrazovanja plesni. Plesni prouzrokuju alergijske efekte i emituju toksine što nije samo kozmetički problem, već ima veoma štetan uticaj na zdravlje ljudi.

Termoizolacija objekata ima višestruki značaj:

- komfor unutrašnjeg prostora – ne samo u smislu pružanja optimalne temperature, već i umirivanja neprijatnih vazdušnih strujanja koja se inače javljaju zbog temperaturnih razlika (od fasadnog zida ka unutrašnjosti objekta i od poda ka plafonu)
- trajna zaštita – nakon osnovnog ulaganja i ugradnje, na duži period vrši svoju ulogu, ne zahtevajući dodatne troškove održavanja, napajanja i sl., za razliku od sistema za klimatizaciju
- dvojaka uloga – zavisno od mesta na planeti gde se objekat nalazi, od godišnjeg doba ili doba dana, termoizolacija ga štiti od zime ili vrućine, a najčešće od oba temperaturna ekstrema, dakle 24 časa tokom cele godine
- energetska efikasnost – doprinosi smanjenju troškova za energiju, ali dodatno utiče i na očuvanje planete

Nakon izolovanja kuće, ušteda energije i novca mogu biti čak i do 80%, pa se primarna investicija može vratiti već za nekoliko meseci. Međutim, i dalje se teži nalaženju načina da se smanje troškovi ove investicije.

Po opšte prihvaćenom zaključku, radikalna put smanjenja koštanja fasadnih konstrukcija i ukupne cene građevinskih radova jeste vraćanje na jednoslojne

konstrukcije fasadnih zidova i otkazivanje od svih vidova višeslojnih polimernih termoizolacionih materijala i tehnologija.

» Idealno gledano, zahtevi ka fasadnim konstrukcijama stambenih i poslovnih objekata svode se na sledeće:

- sposobnost da obavljaju funkciju nosećih ili samonosećih zidova,
- posedovanje visokih termoizolacionih svojstava,
- obezbeđivanje zvukoizolacije,
- otpornost na vlagu,
- otpornost na mraz,
- vazduhopropustljivost,
- paropropustljivost,
- dovoljna lakoća,
- ekološka čistoća,
- zadovoljenje protivpožarnih uslova,
- dugovečnost,
- i konačno, da ne sputavaju arhitektonsku izražajnost.

Na žalost, danas ni jedan materijal za izvođenje zidova objekata ne može da zadovolji ceo kompleks nabrojanih zahteva«

Ideju za temu ovog diplomskog rada sam dobila kada nam je stigao račun za struju u decembru. Živim u Srbobranu u kući koju su sagradili moji roditelji i u kojoj se pretežno grejemo pomoću "čarobne peći", koja predstavlja kombinaciju tri šamotne cigle i gvođenog oklopa, i uglavnom koristimo drvo kao ogrev. Pošto zime znaju da budu duge i hladne, potrebno je koristiti i TA peć da bi temperatura sobe bila prihvatljiva u delovima kuće koje koristimo.

Zbog razloga da je i mojoj porodici, kao najverovatnije i većini, bio cilj da se što pre usele u kuću, moji roditelji nisu puno obraćali pažnju na toplotnu izolaciju. Kuća nam je sagrađena od šuplje opeke, a sa spoljašnje i unutrašnje strane je stavljen sloj krečnog maltera. Svake godine nam se obrazuju plesni u ćoškovima prostorija, i da bi to sprečio, tata je odlučio da instalira izolaciju sa unutrašnje strane. Kao izolacioni materijal je koristio stiropor, tj. ekspanzirani polistirol, a kao zaštitni sloj drvenu lamperiju. Pokušaj je bio bezuspešan, jer i dan danas imamo plesni u ćoškovima. Postavljanje spoljašnje izolacije u našem slučaju nije moguće, razloge neću navoditi, i zbog ovog problema me je interesovalo da li postoji mogućnost da se ipak izvede korektna i kvalitetena izolacija u kućama koje su kao naša.

Kada sam predstavila ideju za temu mom mentoru, on mi je savetovao da se koncentrišem samo na toplotnu izolaciju zida. U radu je analizirana termoizolacija zida višebrojinih kombinacija i na osnovu dobijenih rezultata je prikazan i objašnjen model koji je, po svim stavkama, najidealniji za široku upotrebu.

Tokom pisanja rada, mentor mi je preporučio da uradim simulaciju jednog modela izolacije. Uz njegovu veliku pomoć, simulacija je odrađena i rezultati su prezentovani i diskutovani u radu. Kao prilog uz diplomski rad, priložen je i CD sa simulacijama.

Glava 1

U ovom delu će biti opisane osnovne osobine građevinskih materijala, pri čemu će se pratiti podela iz [2], i detaljnim razmatranjem fizičkih osobina, biće data jednačina toplotnog provođenja kroz zid.

1 Osnovne osobine materijala koji se koriste u građevinarstvu

Svaki materijal koji se koristi u građevinarstvu okarakterisan je određenim osnovnim osobinama. Shodno tome, određuje se mogućnost primene materijala u zavisnosti od samog konstrukcionog objekta, klime, ekonomike korišćenja itd.

Uvedena je sledeća podela osobina materijala:

- Fizičke osobine definišu bilo koju fizičku osobenost stanja materijala ili određuju ponašanje prema nekom fizičkom uticaju (npr. prema fizičkom uticaju vode, toplote).
- Mehaničke osobine u većini slučajeva određuju sposobnost materijala da se suprotstavi dejstvu raznih mehaničkih sila koje izazivaju pritisak, savijanje, istežanje, uvijanje ili smicanje. Ove osobine igraju veliku ulogu kod građevinskih materijala, kako u toku njihovog ispitivanja, tako i u toku njihove primene.
- Fizičko-hemijske osobine određuju uticaj fizičkog stanja materijala na određene hemijske procese, kao što je npr. uticaj stepena disperzije na brzinu hemijskih reakcija.
- Hemijske osobine opisuju sposobnost materijala da se u njemu odvija određeni hemijski proces. Ovde se, pre svega, misli na hemijske procese do kojih dolazi u kontaktu sa drugim materijalima, pri čemu ti procesi mogu biti korisni ili štetni.

Pomenute osnovne osobine materijala koji se koriste u građevinarstvu, u najvećoj meri zavise od hemijskog sastava i strukture samih materijala. Posebno je važno napomenuti poznavanje navedenih osnovnih osobina materijala, naročito kod njihove proizvodnje, kako bi se dobili ne samo materijali koji imaju određene, već i zahtevane osobine. Prema tome, poznavanjem ovih osobina pronalazi se tehnološki proces proizvodnje kojim se dobija materijal željenih osobina.

U ovom radu je stavljen akcenat na toplotnu provodljivost građevinskih materijala, upotrebu istih u toplotnoj izolaciji i objašnjenje zašto su korisni i kakve su beneficije od korišćenja takvih materijala. Stoga će rad većinom biti koncipiran na razmatranju fizičkih osobina.

1.1 Fizičke osobine materijala

Osobine koje definišu fizičko stanje materijala su:

- 1) specifična masa
- 2) zapreminska masa
- 3) gustina
- 4) poroznost

1) Specifična masa predstavlja masu jedinice zapremine materijala u “apsolutno gustom stanju” (bez pora). Prema tome, ako je masa materijala m u $[kg]$ a njegova zapremina u apsolutno gustom stanju V_a u $[m^3]$, specifična masa γ_s $[kg/m^3]$ je definisana izrazom:

$$\gamma_s = \frac{m}{V_a} \quad (1.1)$$

2) Zapreminska masa predstavlja masu jedinice zapremine materijala u njegovom prirodnom stanju, zajedno sa porama. Određuje se pomoću izraza:

$$\gamma = \frac{m}{V} \quad (1.2)$$

gde je: γ $[kg/m^3]$ - zapreminska masa
 m $[kg]$ -masa materijala
 V $[m^3]$ -zapremina materijala

3) Gustina nekog materijala predstavlja stepen ispunjenosti određene zapremine samim materijalom. Gustina se može odrediti pomoću izraza:

$$q = 100 - p = \frac{\gamma}{\gamma_s} \cdot 100 \% \quad (1.3)$$

gde je: q - gustina u %
 p - poroznost u %
 γ - zapreminska masa
 γ_s - specifična zapreminska masa

Gustina potpuno neporoznog materijala naziva se teorijska gustina i određuje se izračunavanjem mase i zapremine jedinične ćelije kristalnog materijala. Dobija se u $[kg/m^3]$ i praktično je identična sa “specifičnom” masom kod neporoznih materijala.

4) Poroznost predstavlja stepen ispunjenosti određene zapremine porama. Pod porama se podrazumevaju praznine u čvrstom materijalu različitog oblika, veličine i

raspodele veličina, koje su ispunjene vazduhom, nekim drugim gasom ili vodom. Njihova veličina kreće se u veoma širokom rasponu od 10^{-8} do 10^{-3} m. Za određivanje poroznosti koristi se sledeći obrazac:

$$p = \left(1 - \frac{\gamma}{\gamma_s}\right) \cdot 100\% \quad (1.4.)$$

Ovde je definisana takozvana ukupna poroznost koja se sastoji od "otvorene" i "zatvorene" poroznosti. "Otvorena" poroznost predstavlja skup otvorenih pora koje se nalaze u unutrašnjosti čvrstog tela i imaju vezu sa spoljnom okolinom. Nazivaju se još i "kanalne" pore. "Zatvorene" pore predstavljaju pore koji nemaju međusobnog kontakta, niti kontakta sa spoljnom atmosferom, a nalaze se u masi čvrstog materijala. Poroznost čvrstih materijala, koji se koriste u građevinarstvu, kreće se u širokom rasponu od 0,1-0,6% (kod mermera i granita), preko 70-85% (kod termoizolacionih opeka) do preko 90% (kod veštačkih polimernih materijala). Od ove fizičke osobine zavisi i čitav niz drugih osobina, kao što su: mehaničke osobine, vodoprovodljivost itd.

Kao izolacioni materijali, prema tome, koriste se oni materijali koji imaju visoku poroznost.

1.2 Fizičke osobine pod dejstvom spoljnih uticaja

Ovde se pravi sledeća podela:

-odnos prema dejstvu vode:

higroskopnost,
apsorpcija vode,
propustljivost vode,
omekšavanje pod dejstvom vode,

-odnos prema dejstvu toplote:

toplotno širenje i skupljanje,
toplotna provodljivost,
toplotni kapacitet,
otpornost prema dejstvu mraza,
vatrostalnost,
otpornost prema dejstvu plamena,

-druge osobine:

propustljivost pare i gasova,
elektroprovodljivost,
otpornost prema dejstvu radioaktivnog zračenja itd.

I u ovom slučaju će se detaljnije pričati samo o određenim pojavama koje su povezane sa odnosom materijala prema dejstvu toplote.

1.2.1 Prenos toplote

Poznata su tri osnovna načina prenošenja toplote:

1) Prilikom prenošenja toplote provođenjem (kondukcijom) dolazi do prenosa toplote sa jednog tela na drugo i to bez primetnog kretanja čestica tela, u pravcu kretanja toplotnog fluksa, tj. sa mesta više temperature na mesto niže temperature. Uslov da se prenos toplote odvija isključivo na ovaj način je da tela, ili delovi tela, budu u neposrednom dodiru.

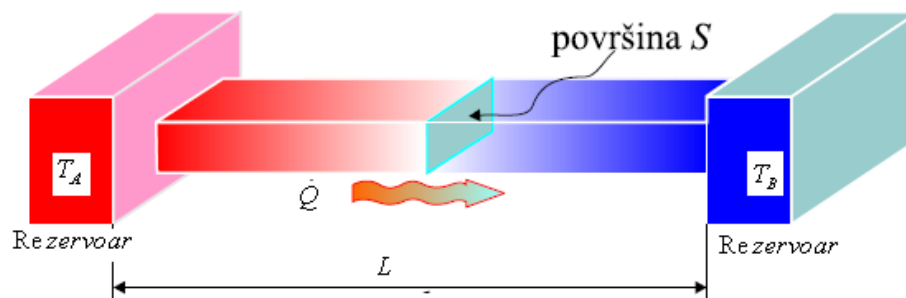
2) Prenos toplote prenošenjem (konvekcijom) odvija se putem kretanja pojedinih delova tela i to pod dejstvom razlike u temperaturama.

3) Prenos toplote zračenjem (radijacijom) je oblik prenosa toplote sa jednog tela na drugo telo, posredstvom kretanja elektromagnetnih talasa u prostoru između ta dva tela (tela nisu u neposrednom dodiru).

Sva tri pomenuta načina prenošenja toplote mogu se odvijati istovremeno, ali je uvek jedan od njih dominantan.

1.2.1.1 Prenos toplote provođenjem

Neophodno je naći način povezivanja provođenja toplote sa ostalim osobinama (mehaničkim, geometrijskim itd.). Rešenje ovog problema može se naći u razmatranju protoka toplote kroz provodnu šipku postavljenu između dva toplotna rezervoara koja se nalaze na temperaturama T_A , T_B , kao što je na slici 1.1. prikazano.



Slika 1.1. Provođenje toplote kroz provodnu šipku postavljenu između dva rezervoara koja se nalaze na različitim temperaturama, na temperaturi T_A i T_B ,

gde je $T_A > T_B$.

Logično je pretpostaviti da će količina toplote u jedinici vremena biti funkcija temperature datih rezervoara, geometrije provodne šipke i ostalih osobina provodne šipke:

$$\dot{Q} = f_1(T_A, T_B, \text{geometrija i ostale osobine šipke}). \quad (1.5)$$

U fizici se definiše posebna klasa izvoda koju čine vremenski izvodi. Oznaka za vremenski izvod, koja se često koristi, je tačkica¹ iznad simbola neke fizičke veličine. Takođe je opravdano pretpostaviti da će \dot{Q} zavisiti od temperaturne razlike $T_A - T_B$. Ako je temperaturna razlika $T_A - T_B$ nula, tada bi i toplotna provodljivost trebala biti nula. Prema tome, temperaturnu zavisnost je moguće izraziti kao:

$$\dot{Q} = f_2(T_A - T_B, T_A, \text{geometrija i ostale osobine šipke}). \quad (1.6)$$

Da bi se našao oblik funkcije f_2 , treba da se uvede uslov da kada je $T_A = T_B$, $f_2 = 0$, koristeći Meklarenov razvoj:

$$f(\Delta T) = f(0) + \left. \frac{\partial f}{\partial(\Delta T)} \right|_0 \Delta T + \dots \quad (1.7)$$

Ako se definiše ΔT kao $\Delta T = T_A - T_B$ i $f = f_2$ dobije se (za malo $T_A - T_B$):

$$f_2(T_A - T_B) = \dot{Q} = f_2(0) + \left. \frac{\partial f_2}{\partial(T_A - T_B)} \right|_{T_A - T_B = 0} (T_A - T_B) + \dots \quad (1.8)$$

Poznato je da $f_2(0) = 0$. Izvod uzet u $T_A = T_B$ (termalna ravnoteža) je veličina koja se može meriti. Očevidno je, iz relacije (1.8.), da je toplotni protok pozitivan, $\dot{Q} > 0$, ako je temperatura rezervoara A veća od temperature rezervoara B, tj. $T_A > T_B$, ili ako je odgovarajući izvod toplotnog protoka po razlici temperatura odgovarajućih rezervoara, koji se pojavljuje u Maklorenovom razvoju, veći od nule, $\left. \frac{\partial f_2}{\partial(T_A - T_B)} \right|_{T_A = T_B} > 0$. Takođe je logično pretpostaviti da bi, ako bi postojale dve šipke iste površine koje se nalaze između rezervoara kao što je to prikazano na slici 1.1., toplotna provodljivost bila dvostruko veća. Stoga možemo pretpostaviti da je \dot{Q} proporcionalna površini. Merenjem toplotnog protoka \dot{Q} u zavisnosti od dužine šipke, utvrđeno je da su ovi kvantiteti u obrnutoj srazmeri². Sve ovo vodi prema uopštenju koji je uveo Furije, da za provodnu šipku, izvod u jednačini (1.8.) ima oblik:

$$\left. \frac{\partial f_2}{\partial(T_A - T_B)} \right|_{T_A = T_B} = \frac{\lambda S}{L}. \quad (1.9)$$

¹ Vremenski izvod količine toplote je: $\dot{Q} = \frac{dQ}{dt}$.

² Sa povećanjem dužine šipke toplotni protok se smanjuje.

U jednačini (1.9.) λ je faktor proporcionalnosti, koji je funkcija materijala i temperature, S je poprečni presek, a L je dužina provodne šipke.

Ako se na rastojanju Δx između dve tačke na šipci dužine L , koja spaja rezervoare A i B koji se nalaze u stanju bliskom termodinamičkoj ravnoteži, desi promena temperature ΔT , izraz za toplotni protok postaje:

$$\dot{Q} = \lambda S \frac{(T_A - T_B)}{L} = -\lambda S \frac{(T_B - T_A)}{L} = -\lambda S \frac{dT}{dx} \quad (1.10.)$$

U ovom izrazu $\dot{Q} = \frac{dQ}{dt}$ [W] predstavlja brzinu prenosa toplote;

S [m^2]- površina preseka normalna na pravac prenosa toplote;

$\frac{dT}{dx}$ - gradijent temperature;

λ -koeficijent provođenja toplote u [W / m^0C]. Prema tome, koeficijent lambda označava količinu toplote izraženu u džulima, koju u jedinici vremena propusti sloj nekog materijala jedinične debljine, i to upravno na njegovu jediničnu površinu, ako razlika temperature u stacionarnom stanju između graničnih površina materijala iznosi 1^0C .

Prevedena količina toplota po jedinici površine u jedinici vremena, definisana je kao:

$$\frac{\dot{Q}}{S} = \dot{q}. \quad (1.11.)$$

Veličina \dot{q} se naziva toplotni fluks u jedinici vremena, i ima jedinicu [W / m^2]. Zamenjujući jednačinu (1.10.) u jednačinu (1.11.) dobija se:

$$\dot{q} = -\lambda \frac{dT}{dx}. \quad (1.12.)$$

Ovo je jednodimenzioni oblik Furijeovog zakona za toplotnu provodljivost.

U opštem slučaju, toplotna provodljivost je tenzorskog oblika [5], pa bi i oblik Furijeovog zakona u tom slučaju bio:

$$\begin{pmatrix} \dot{q}_x \\ \dot{q}_y \\ \dot{q}_z \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \lambda_{xx} & \lambda_{xy} & \lambda_{xz} \\ \lambda_{xy} & \lambda_{yy} & \lambda_{yz} \\ \lambda_{xz} & \lambda_{yz} & \lambda_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \partial T / \partial x \\ \partial T / \partial y \\ \partial T / \partial z \end{pmatrix} \quad (1.13.)$$

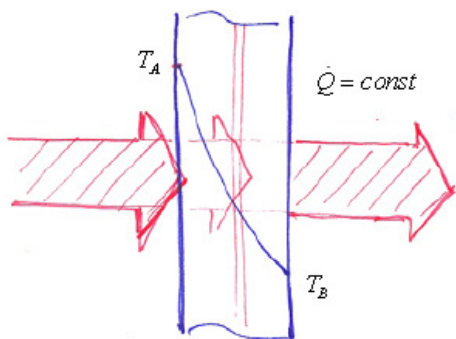
Materijali kao npr. kristali imaju izraženu anizotropiju, pa će shodno tome i toplotna provodljivost ovih materijala biti anizotropna, tj. provođenje toplote u jednom

smeru može da bude veće nego u drugom smeru. Spomenuto je već da je toplotna provodljivost funkcija temperature i , u opštem slučaju, kod gasova sa povećanjem temperature se povećava λ , dok kod fluida i u čvrstim telima opada sa povećanjem temperature.

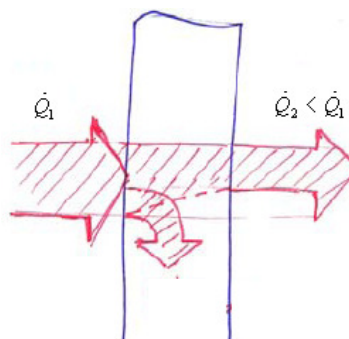
1.2.1.2 Stacionarno jednodimenziono provođenje

Temperaturno polje je određeno prostorom i vremenom [7]. U slučaju kada je temperatura u svim tačkama ista, imamo izotermno temperaturno polje. Možemo definiisati stacionarno i nestacionarno temperaturno polje.

- Stacionarno temperaturno polje je ono u kojem se temperatura na posmatranoj izotermnoj površi ne menja u toku vremena, i funkcija je samo prostornih koordinata: $T = f(x, y, z)$. Prema tome, preneti količina toplote u jedinici vremena je stalna veličina.
- Nestacionarno temperaturno polje je ono u kojem se temperatura menja u posmatranoj oblasti u toku vremena, a temperatura zavisi od prostornih koordinata i vremena: $T = f(x, y, z, t)$.



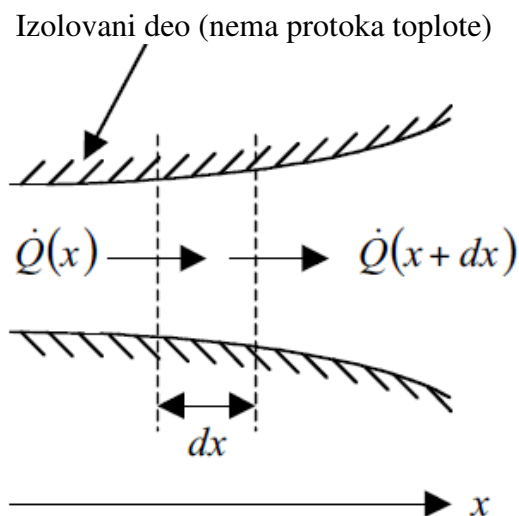
Slika 1.2. Prikaz stacionarnog provođenja. U ovom slučaju se ne menja profil temperaturnog polja sa vremenom.



Slika 1.3 Prikaz nestacionarnog provođenja. Usled stalnog "priliva" energije, temperatura tela se menja - tokom vremena se menja profil temperaturnog polja.

Najveći pad temperature po jedinici dužine dobija se u smeru normalnom na izotermnu površ. Ta razlika temperature naziva se gradijent temperature.

Uočimo u telu tanak sloj debljine dx unutar izotermne površi (slika 1.4.). Kako je proces stacionaran, ulazna količina toplote u jedinici vremena mora biti jednaka izlaznoj količini.



Slika 1.4. Stacionarno provođenje toplote kroz homogen materijal u smeru normalnom na izotermnu površ

Ulazna količina toplote u jedinici vremena prema jednačini (1.10.) je:

$$\dot{Q}(x) = -\lambda \left(S \frac{dT}{dx} \right)_x. \quad (1.14.)$$

Količina toplote u jedinici vremena koja prođe kroz debljinu dx je prema tome:

$$\dot{Q}(x+dx) = \dot{Q}(x) + \frac{d\dot{Q}}{dx} \Big|_x dx + \frac{1}{2!} \frac{d^2\dot{Q}}{dx^2} \Big|_x dx^2 + \dots \quad (1.15.)$$

Zanemarujući više članove, i uzimajući u obzir stacionarnost procesa, razlika jednačina (1.14.) i (1.15.) treba da bude 0.

$$\dot{Q}(x) - \left(\dot{Q}(x) + \frac{d\dot{Q}}{dx} \Big|_x dx \right) = 0 \quad (1.16.)$$

Uzimajući graničnu vrednost kada dx teži nuli dobija se:

$$\frac{d\dot{Q}(x)}{dx} = 0 \quad (1.17.)$$

Zamenjujući izraz za \dot{Q} iz jednačine (1.10.), dobija se:

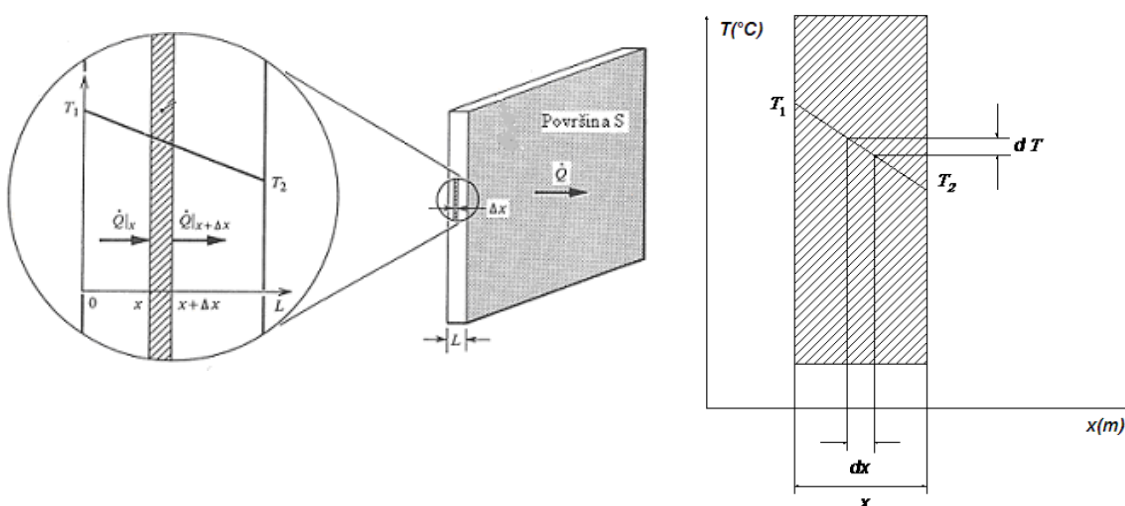
$$\frac{d}{dx} \left(\lambda S \frac{dT}{dx} \right) = 0 \quad (1.18.)$$

$$S \frac{d\lambda}{dx} \frac{dT}{dx} + \lambda \frac{dS}{dx} \frac{dT}{dx} + \lambda S \frac{d^2T}{dx^2} = 0. \quad (1.19.)$$

Ova jednačina opisuje temperaturno polje za kvazi-jednodimenzionu stacionarnu toplotnu provodljivost. Analizirana je u slučaju homogenog materijala, u nastavku rada neophodnog za dalju analizu jednoslojnog ravnog homogenog zida, a zatim i višeslojnog.

1.2.1.3 Provođenje toplote kroz jednoslojni zid

Sada se može primeniti prethodna jednačina na ravan homogen zid prikazan na slici 1.5..



Slika 1.5. Stacionarna 1D kondukcija kroz ravan zid

Smer prenosa toplote je normalan na izotermnu površ. Površina nije funkcija od x , tj. $S = const$ i uzima se da je koeficijent toplotnog provođenja λ takođe konstantan (jer je on funkcija temperature, što je već i ranije spomenuto, ali na njega utiče i vlažnost vazduha i dimenzija pora), prema tome jednačina (1.19.) se svodi na:

$$\lambda S \frac{d^2T}{dx^2} = 0. \quad (1.20.)$$

Nakon deljenja sa λS dobija se:

$$\frac{d^2T}{dx^2} = 0. \quad (1.21.)$$

Integracijom ovog izraza se dobija:

$$\frac{dT}{dx} = a, \quad \text{tj. } T = ax + b. \quad (1.22.)$$

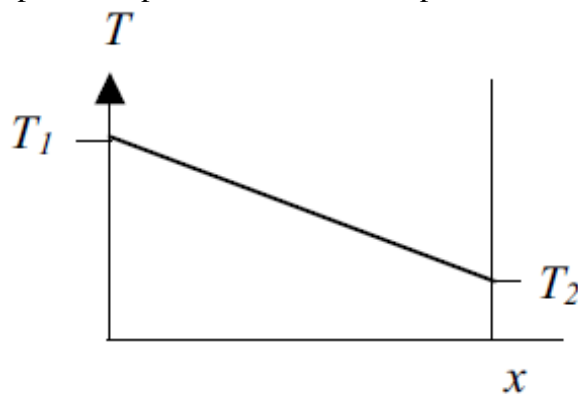
Ova jednačina opisuje *temperaturno polje zida*. U jednačini (1.22.) a i b su integracione konstante. Da bi se odredile ove konstante, treba uvesti sledeće granične uslove: $T(0) = T_1$ i $T(L) = T_2$. Iz prvog uslova $T(0) = T_1$ dobija se da je $b = T_1$, a drugi uslov $T(L) = T_2$ daje:

$$T_2 = aL + T_1, \quad \text{tj. } a = \frac{T_2 - T_1}{L}. \quad (1.23.)$$

Zamenom izraza za a i b u (1.22.) dobija se:

$$T(x) = T_1 + \left(\frac{T_2 - T_1}{L} \right) x. \quad (1.24.)$$

Dakle, stacionaran temperaturni profil kroz ravan zid, pri $\lambda = \text{const.}$ je linearan, slika 1.6..



Slika 1.6. Temperaturni profil kroz ravan zid

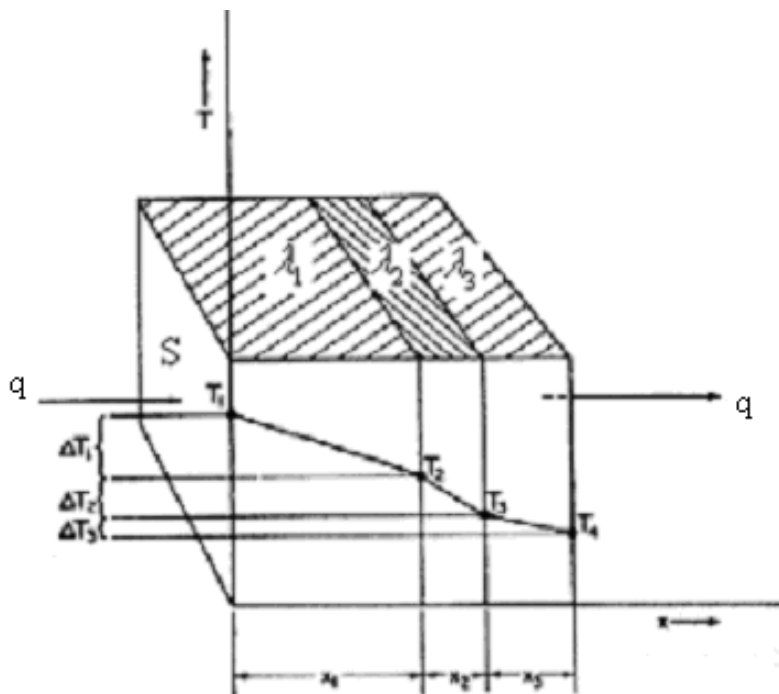
Toplotni fluks u jedinici vremena je dat jednačinom (1.12.) i uzimajući u obzir da je $S = \text{const}$ i da je uzeto takođe $\lambda = \text{const}$ dobija se:

$$\dot{q} = -\lambda \frac{dT}{dx} = -\lambda \frac{(T_2 - T_1)}{L} = \text{const}. \quad (1.25.)$$

Prema tome, kroz ravan homogen zid, promena temperature je linearna funkcija rastojanja kroz zid. Sledi da u izrazu za toplotni fluks u jedinici vremena sada figurišu samo konstante. Prema tome, i toplotni fluks u jedinici vremena je konstantan.

1.2.1.4 Provođenje toplote kroz višeslojni zid

Sada će se razmotriti slučaj kada se toplota prenosi kroz sistem koji se sastoji od vertikalnih paralelnih slojeva. Svaki pojedinačni sloj predstavlja poseban materijal i ima određenu debljinu. I ovde će se razmatrati stacionarno provođenje toplote.



Slika 1.7. Provođenje toplote kroz višeslojni zid

Uzimajući u obzir jednačinu (1.25.), može se dobiti količina toplote koja prođe kroz svaki sloj pojedinačno. Uočava se da je kod jednoslojnog zida toplotni fluks konstantna veličina, i zamenjujući je u jednačinu (1.11.) nakon integraljenja i primene graničnih uslova:

$$\begin{aligned}
 Q_1(T_2) &= Q_2(T_2) \\
 Q_2(T_3) &= Q_3(T_3) \\
 &\dots \\
 Q_{n-1}(T_n) &= Q_n(T_n)
 \end{aligned}
 \tag{1.26.}$$

dobija se:

Za prvi sloj:

$$Q_1 = \frac{\lambda_1}{L_1} (T_1 - T_2) S_1 t
 \tag{1.27.}$$

Za drugi sloj:

$$Q_2 = \frac{\lambda_2}{L_2} (T_2 - T_3) S_2 t \quad (1.28.)$$

Za n-ti sloj:

$$Q_n = \frac{\lambda_n}{L_n} (T_{n-1} - T_n) S_n t. \quad (1.29.)$$

Navedene relacije, koje predstavljaju primenu Furijeovog zakona na jednoslojne i višeslojne zidove, imaju značajnu primenu kod izračunavanja provođenja toplote, odnosno toplotnog fluksa, potrebne debljine zidova sa određenim koeficijentom toplotne provodljivosti itd.

1.2.1.5 Koeficijent prolaza toplote, K

Kao jedna bitna osobina izolacionih materijala, često se umesto toplotne provodljivosti koristi koeficijent prolaza toplote. To je veličina koja u jedinici vremena prođe kroz jediničnu površinu određene debljine, kada je temperaturna razlika jedinična. Prema tome, ako se uzme da je debljina materijala x [m], toplotna provodljivost λ [W / m^0C], koeficijent prolaza toplote K će biti:

$$K = \frac{\lambda}{x}. \quad (1.30.)$$

Jedinica koeficijenta je [$W / m^2 0C$].

Ako toplota prolazi kroz sistem koji čine više materijala poređani jedan do drugog, kao što je to analizirano u prethodnom poglavlju, tada se Furijeova jednačina može primeniti na svaki sloj posebno. U slučaju stacionarnog provođenja, ista količina toplote prolazi u jedinici vremena kroz svaki sloj.

$$\dot{Q} = \frac{\lambda_1}{x_1} S_1 \Delta T_1 = \frac{\lambda_2}{x_2} S_2 \Delta T_2 = \frac{\lambda_3}{x_3} S_3 \Delta T_3 = \dots \quad (1.31.)$$

Ako su površine jednake: $S_1 = S_2 = S_3 = \dots$

$$\dot{Q} = \frac{\lambda_1}{x_1} \Delta T_1 S = \frac{\lambda_2}{x_2} \Delta T_2 S = \frac{\lambda_3}{x_3} \Delta T_3 S = \dots \quad (1.32.)$$

Dalje se može napisati kao:

$$S\Delta T_3 = \dot{Q} \frac{x_3}{\lambda_3} \quad S\Delta T_2 = \dot{Q} \frac{x_2}{\lambda_2} \quad S\Delta T_1 = \dot{Q} \frac{x_1}{\lambda_1} \dots \quad (1.33.)$$

Uzimajući sumu ovih jednačina dobija se:

$$S(\Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 + \dots) = \dot{Q} \left(\frac{x_1}{\lambda_1} + \frac{x_2}{\lambda_2} + \frac{x_3}{\lambda_3} + \dots \right) \quad (1.34.)$$

Suma temperaturne razlike kroz slojeve je jednaka temperaturnoj razlici dva spoljašnja sloja složenog sistema:

$$\Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 + \dots = \Delta T . \quad (1.35.)$$

Koeficijent prolaza toplote K definisan je kao λ / x , prema tome dobija se:

$$\frac{x_1}{\lambda_1} + \frac{x_2}{\lambda_2} + \frac{x_3}{\lambda_3} + \dots = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_3} + \dots = \frac{1}{U} \quad (1.36.)$$

gde je U ukupni koeficijent prolaza toplote složenog sistema u $[W / m^2 \text{ } ^\circ C]$. Dobija se izraz za složen sistem:

$$\dot{Q} = US\Delta T . \quad (1.37.)$$

U praksi se toplotna provodljivost vrlo često ocenjuje na bazi zapremine mase materijala. Koeficijent toplotne provodljivosti raste sa povećanjem zapremine mase, a to znači da opada sa povećanjem poroznosti materijala.

Koeficijent λ se može prikazati empirijskim obrascem:

$$\lambda_T = \lambda_0 (1 + 0,005T) \quad (1.38.)$$

gde je : λ_T - koeficijent toplotne provodljivosti na temperaturi T

λ_0 - isti koeficijent za $T = 0^\circ C$.

Ovaj obrazac važi samo za temperature do $100^\circ C$. Fizičari bi očekivali $1/273$ umesto koeficijenta $0,005$. Ipak, bez daljeg objašnjenja ovaj empirijski izraz se koristi u literaturi, zbog toga se i ovde taj oblik ostavlja.

Vlaga koja ulazi u pore materijala povećava njegovu toplotnu provodljivost, pošto je za vodu $\lambda = 0,85 W / m^\circ C$, dok smrzavanje vode u porama još više povećava toplotnu provodljivost jer je $\lambda = 2,3 W / m^\circ C$ za led.

Poseban slučaj prenošenja toplote predstavlja toplotno prenošenje kombinacijom dva mehanizma: kondukcijom i konvekcijom, odnosno provođenjem i mešanjem. To je npr. slučaj prenošenja toplote kroz građevinske elemente izgrađene od bilo kog materijala, koji sadrži u sebi određene šupljine, odnosno između dva fluida koji su međusobno razdvojeni zidom. U tom slučaju, toplota se kroz čvrst materijal prenosi provođenjem, a kroz gasovit (šupljine ispunjene vazduhom) mešanjem. Pokazalo se da toplotna provodljivost zavisi i od dimenzija pora jer u porama malog prečnika vazduh miruje, dok u porama većih dimenzija dolazi do kretanja vazduha čime se povećava toplotna provodljivost. Npr. pokazalo se da na $T = 0^{\circ}\text{C}$ toplotna provodljivost vazduha u porama prečnika 3 mm je skoro dva puta veća nego u porama prečnika 0,5 mm. Pri temperaturi do 100°C ovaj odnos iznosi 1:3.

Ova razmena toplote se karakteriše koeficijentom prolaza toplote K , zbog čega je uvođenje ove veličine veoma korisno.

Glava 2

Ovde će biti navedene opšte osobine termoizolacionih materijala i biće data tabela sa materijalima koji se koriste u izgradnji prilikom toplotne izolacije zida [1].

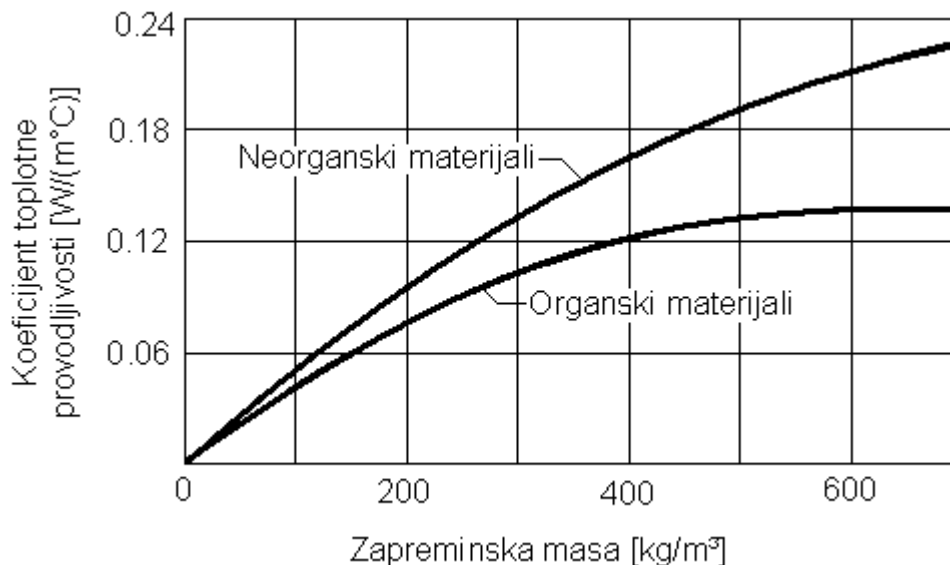
2.1. Opšti uslovi za termoizolacione materijale

Termoizolacioni materijali treba da imaju visoku poroznost i da po mogućnosti predstavljaju supstance amorfnе strukture. Ovaj zaključak proizilazi iz činjenice da kristalna tela veoma dobro provode toplotu. Osnovni uslov visoke poroznosti kod termoizolacionih materijala podrazumeva samo prisustvo pora u vidu sitnih vazdušnih ćelija ili tankih slojeva vazduha, pošto se u većim praznim prostorima ispunjenim vazduhom toplotna provodljivost materijala jako povećava usled prenosa toplote konvekcijom i zračenjem.

Za dobijanje materijala tzv. ćelijaste strukture (gas-betoni, peno-betoni, porozne plastične mase) primenjuju se tehnologije u okviru kojih dolazi do oslobađanja određenih gasova i do nadimanja mase materijala u fazi proizvodnje, a takođe i postupkom dovođenja još neočvrstih materijala u penasto stanje. Široku primenu imaju i postupci koji podrazumevaju da se u fazi proizvodnje prave mešavine komponenata sa većim količinama vode, tako da se kroz postupke sušenja i pečenja dobije povećana poroznost finalnog produkta. Formiranje vlaknastog skeleta je osnovni način za dobijanje visoke poroznosti vlaknastih termoizolacionih materijala (staklena vuna, mineralna vuna i sl.). U ovakvim slučajevima termoizolacioni materijali se dobijaju postupkom izvlačenja iz rastopa u vrlo tanke niti ili putem raspršivanja mlaza rastopa u relativno kratka, ali vrlo tanka vlakna. U prvom slučaju dobijaju se vlakna i tzv. voali, dok se u drugom slučaju dobijaju materijali tipa "vune".

Kao što je napred rečeno, veliki značaj u odnosu na poroznost termoizolacionih materijala ima ravnomeran raspored i karakter pora u njima. Teži se dobijanju materijala sa sitnim porama zatvorenog tipa. U slučaju ovakvih pora vazduh se ne kreće, pa se tako dobijaju povoljniji efekti termičke zaštite.

Zapreminska masa predstavlja glavni parametar koji određuje toplotnu provodljivost pa time i termoizolaciona svojstva materijala. Uočava se da se vrednost koeficijenta toplotne provodljivosti λ povećava sa povećanjem zapreminske mase γ (slika 2.1.). Treba napomenuti da prikazane vrednosti koeficijenta λ odgovaraju potpuno suvim materijalima. U slučaju vlažnih materijala, toplotna provodljivost se značajno menja, što utiče na pogoršavanje termoizolacionih karakteristika materijala.



Slika 2.1. Funkcionalana zavisnost koeficijenta toplotne provodljivosti materijala λ i zapreminske mase γ

Pored toplotne provodljivosti, odnosno zapreminske mase, kao još jedna karakteristika termoizolacionih materijala javlja se čvrstoća. Ona je u poređenju sa drugim materijalima vrlo mala. Npr. čvrstoća pri pritisku termoizolacionih materijala kreće se najčešće od 0,2 do 2,5 MPa, a čvrstoća pri savijanju od 0,15 do 2,0 MPa.

Termoizolacioni materijali treba da zadovoljavaju i sledeće dodatne uslove:

- da imaju malo upijanje vode,
- da budu postojani na povišenim temperaturama,
- da imaju zadovoljavajuću provodljivost pare i gasova (potrebno je da termoizolacioni materijali difunduju gas i paru, ali u slučajevima kada je sa jedne strane termoizolacionog sloja prisutna izuzetno vlažna atmosfera, termoizolaciju treba štititi hidroizolacijom koja se postavlja sa tople strane),
- da su otporni na dejstvo požara,
- da su otporni na dejstvo mraza,
- da imaju zadovoljavajuću hemijsku i biološku postojanost.

Opširnije o materijalima, koji se koriste prilikom izgradnje i toplotne izolacije zida, pisano je u dodatku.

Tabela. 1. Vrednosti koeficijentata toplotne provodljivosti materijala koji se koriste u građevini za toplotnu izolaciju.

Naziv	Grupa	Zapreminska masa [kg / m ³]	Koeficijent toplotne provodljivosti [W / m ⁰ C]
Obična opeka	Građevinska keramika	1800	0,8
Puna opeka		1700-1900	0,56-0,61
Šuplja opeka i šuplji blokovi		1000-1600	0,32-0,42
Cigla-fasadna opeka		1760	0,7
Giter blok		1200	0,22
Običan beton	Beton	2400	2
Durisol	Lakoagregatni beton	400-800	0,10-0,25
Tarolit i heraklit		350-450	0,25-0,30
Jednozrni-kaverozni betoni	Laki beton	1600-1800	0,55-0,80
Gasobetoni	Ćelijasti betoni	500-700	0,14-0,20
Penobetoni		300-1200	
Krečni malter	Malteri za zidanje	1700	0,85
Produžni malter		1800	0,87
Cementni malter		2100	1,4
Azbestni cement		890	0,17
Termoizolacioni malter		600	0,19
Ploče od gipsa		1000	0,5
Ekspandirani perlit	Veštački agregat	100-500	0,052-0,07
Ekspandirani vermikulit		50-200	
Mineralna vata		400	0,05
Azbestna vlakna		200-1200	0,07-0,20
Mineralna vuna		35-250	0,04-0,14
Jela, bor	Četinari	500-600	0,14
Hrast	Listopad	700-800	0,21
Bukva		800	0,2
Meki lesonit	Drvo	200-400	0,05-0,07
Tvrđi lesonit		cca1000	cca 0,20
Ploče iverice		cca 600	cca 0,10
Panel ploče		400-600	0,08-0,12
Ploče od plute		100-200	0,02-0,04
Ploče od prošivene trske	Materijali biljnog porekla	800	0,05
Ploče od prošiene slame		300-350	0,09
Stiropor-ekspandirani polistirol	Poroplast	25-40	0,03-0,05
Poliuretan	Plastične mase	30-500	0,02
Saćaste plastične mase		30-120	0,05-0,06
Penoplasti		15-50	0,08
Parna brana			0,21
Vazduh		1,204	0,023
Zemlja		320	0,7

Glava 3

Zemaljska kugla je podjeljena u tri građevinske, klimatske zone, prema srednjoj vrednosti najnižih godišnjih temperatura koje su zabeležene u pojedinim njenim delovima [4]. Isto tako, za svaku zonu su određeni i najveći dozvoljeni koeficijent prolaza toplote K za različite delove zgrade (spoljne zidove, pregradne zidove, stepenišne zidove itd.), ali će se ovde navesti K [$W / m^2 \text{ } ^\circ C$] za spoljne konstruktivne zidove:

građevinska klimatska zona I	$-12^\circ C$	$K = 1,225 W / m^2 \text{ } ^\circ C$
građevinska klimatska zona II	$-18^\circ C$	$K = 0,930 W / m^2 \text{ } ^\circ C$
građevinska klimatska zona III	$-24^\circ C$	$K = 0,830 W / m^2 \text{ } ^\circ C$.

U Tabeli 2. dati su koeficijenti prolaza toplote K i primenljivost u klimatskim zonama onih zidova čija je debljina uslovljena veličinama komponenata od kojih je zid sagrađen (opeka, blokovi od pečene gline, betona, lakog betona itd.).

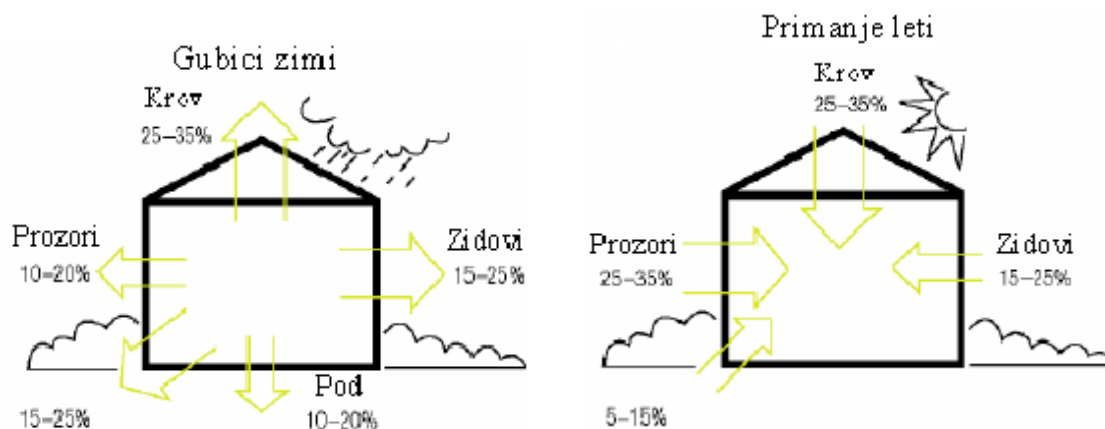
Tabela 2. Standardne debljine zidova i mogućnost primene u određenoj zoni.

Red. br.	Vrsta zida	K [$W / m^2 \text{ } ^\circ C$]	Spoljni zid		
			Klimatske zone		
			I	II	III
			1,225	0,93	0,83
1	zid od pune opeke 25 cm	1,79	Ne	Ne	Ne
2	zid od pune opeke 38 cm	1,31	Ne	Ne	Ne
3	zid od pune opeke 51 cm	1,04	Da	Ne	Ne
4	zid od giter opeke 25 cm	1,54	Ne	Ne	Ne
5	zid od giter opeke 38 cm	1,12	Da	Ne	Ne
6	zid od giter opeke 51 cm	0,87	Da	Da	Ne
7	zid od giter blokova 25 cm	1,44	Ne	Ne	Ne
8	zid od giter blokova 29 cm	1,28	Ne	Ne	Ne
9	zid od lako-bet. Termo blokova 19 cm	1,87	Ne	Ne	Ne
10	zid od lako-bet. Termo blokova 24 cm	1,57	Ne	Ne	Ne
11	zid od lako-bet. Termo blokova 29 cm	1,38	Ne	Ne	Ne
12	zid od ojačanih Durisol blokova 25 cm	0,77	Da	Da	Da
13	zid od ojačanih Durisol blokova 30 cm	0,72	Da	Da	Da
14	zid od blokova gas-betona 15 cm	1,01	Da	Ne	Ne
15	zid od blokova gas-betona 20 cm	0,81	Da	Da	Da
16	zid od blokova gas-betona 25 cm	0,67	Da	Da	Da
17	zid od blokova gas-betona 30 cm	0,57	Da	Da	Da

Iz tabele se vidi da klasični zidovi od opeke debljine 38 cm ne zadovoljavaju propise toplotne zaštite ni za jednu klimatsku zonu. Pravljenje mnogo debljih zidova nego što to statički račun zahteva nije racionalno, pa se zato pribegava poboljšanju termičkih osobina na druge načine.

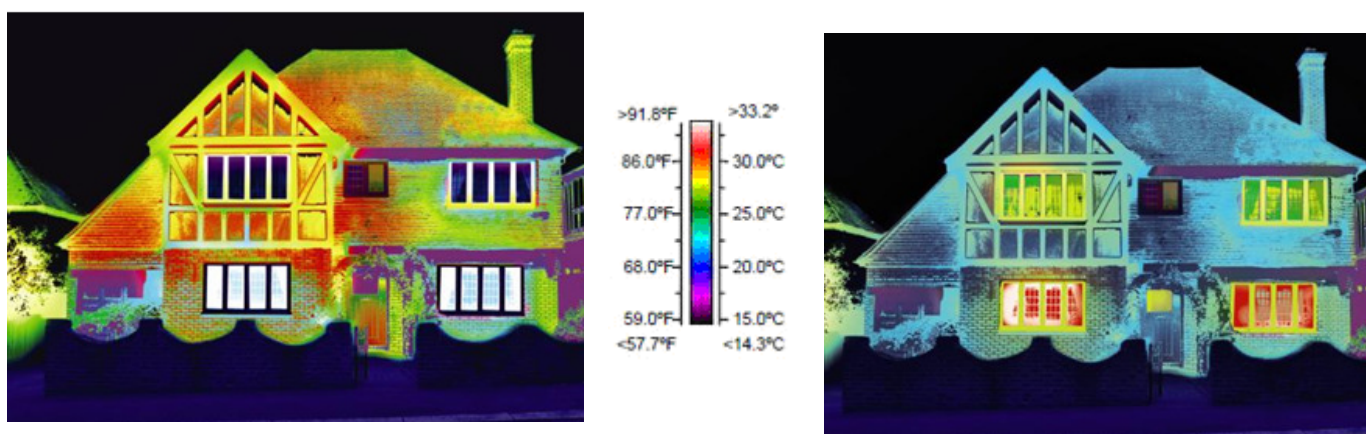
Korišćenjem termoizolacionih materijala mogu se ispuniti uslovi shodno zahtevima određenih klimatskih zona, pri čemu ukupna debljina zida ostaje prihvatljiva. Razmotriće se tri načina toplotne izolacije zida: spoljašnja i unutrašnja izolacija, i izolacija zida sa šupljinom (poznatiji naziv za takvu konstrukciju je "sendvič" zid).

Neizolovana kuća tokom zime gubi toplotu, dok se leti zagreva. Na slici 3.1. je prikazano koliko toplote se izgubi ili primi kroz neizolovane delove kuće.



Slika 3.1. Gubici i primanja toplote neizolovane kuće

Na slici 3.2. je napravljeno poređenje između izolovane i neizolovane kuće. Uočava se da neizolovana kuća gubi toplotu i preko prozora i preko krova, zidova, dimnjaka itd. (mesta gde toplota u većoj količini napušta kuću su označena određenim bojama i pomoću date skale se može pratiti toplotni gubitak kroz određene delove kuće). U izolovanoj kući, međutim, kako se i vidi sa slike 3.2., toplota se gubi samo kroz prozore.

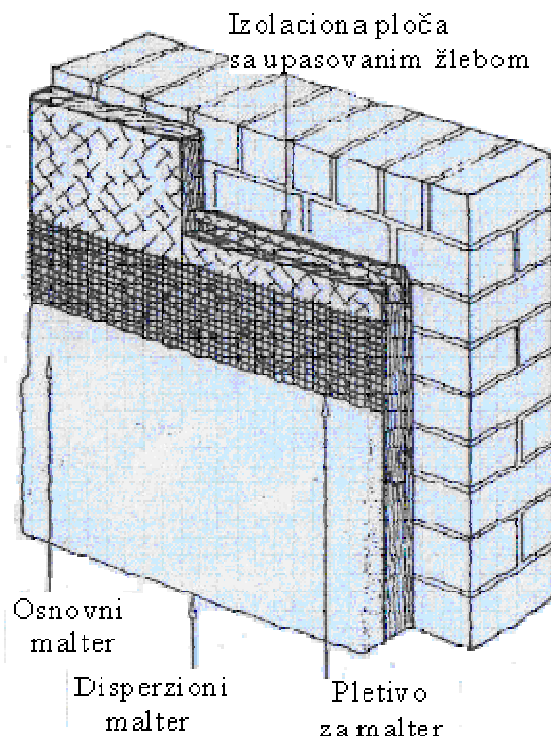


Slika 3.2. Gubici toplote neizolovane kuće (levo) i izolovane kuće (desno)

3.1. Spoljašnja izolacija zida

Postavljanje termoizolacije na fasadi je skuplje, ali tehnički bolje rešenje [3]. Razlog poskupljenja treba tražiti u tome što se izolacioni sloj mora zaštititi od atmosferskih uticaja. Tehnički razlog je taj da ostaje sposobnost zida da akumulira toplotu, što je važno za dobru klimu u kući jer pregradni zidovi i tavanice ne prekidaju izolacioni omotač čime je izbegnuto nastajanje "toplotnih mostova"³. Na taj način, svi konstrukcioni delovi se ravnomerno zagrevaju, vodovodne i kanalizacione cevi ne mrznu u spoljnim zidovima, isključeni su naponi zbog temperaturnih razlika između građevinskih delova koji dovode do pukotina itd. Građevinsko-fizički razlozi koji govore u prilog spoljašnje izolacije su veoma ubedljivi, pa će se ovde razmotriti nekoliko predloga za spoljašnju izolaciju.

Na noseći zid izolacija se nanosi spolja. Najpre se stavlja izolaciona ploča na koju se kao fasadna obrada stavlja mineralni malter. Spoj lakih izolacionih ploča i mineralnog maltera predstavlja trajnu i krajnje otpornu zaštitu fasade. Mineralni malter sastoji se iz tri sloja: podloge za malter sa cementnim mlekom, donjeg grubog maltera od krečnog cementa i gornjeg finog krečnog maltera. Podloga za malter mora se stvrdnjavati više nedelja pre nego što se nanese drugi slojevi maltera. Pre nanošenja ova tri sloja maltera, zid se mora armirati (obložiti) zavarenim i pocinkovanim žičanim pletivom. Gore opisana konstrukcija se može videti na slici 3.3..



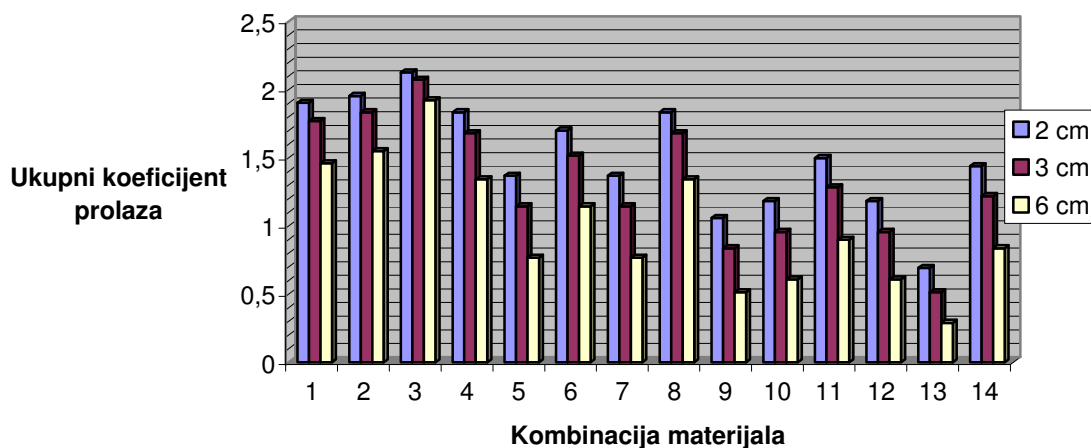
Slika 3.3. Redosled postavljanja spoljašnje izolacije

³ Toplotni most nastaje kada je izolacija, iz nekog razloga, prekinuta materijalom koji je loš izolator. Postojanje toplotnog mosta ili kako se još naziva hladnog mosta može da izazove značajno smanjenje temperature u tom delu objekta i pojavu kondenzacije i buđi, kao i značajan gubitak toplote.

Danas se koristi veliki broj izolacionih materijala. U zavisnosti od stepena izolacije, može se izabrati odgovarajuća kombinacija materijala. U ovom delu će se predstaviti nekoliko mogućih kombinacija i razmatrati njihova primenjivost u određenoj klimatskoj zoni.

U Tabeli 3. mogu se videti koeficijenti prolaza toplote $K [W / m^2 \text{ } ^\circ C]$ za nekoliko mogućih kombinacija materijala, saglasno sa konstrukcijom datoj na slici 3.3., kao i ukupni koeficijent prolaza $U [W / m^2 \text{ } ^\circ C]$. Uočava se iz tabele da ovakav spoj materijala sa termoizolacionom pločom od durisola, tarolita i heraklita, tvrdog lesonita, jednozrnokaveroznog betona i gasobetona, debljine 2 cm, 3 cm i 6 cm, ne ispunjava uslove ni jedne građevinske klimatske zone. Najbolja kombinacija je sa sačastom plastičnom masom kao termoizolacionim materijalom debljine 6 cm. Međutim, kombinacija sa pločom od prošivene slame debljine 5 cm, kao termoizolacionim materijalom, već daje prihvatljive vrednosti u našoj, odnosno II građevinskoj klimatskoj zoni. Ploča od prošivene trske kao izolacioni materijal daje prihvatljivu izolaciju već sa ukupnom debljinom zida od 30 cm. Može se još videti da uslove primene u I građevinskoj klimatskoj zoni ispunjavaju kombinacije sa ekspanziranim perlitom debljine 3 cm, mekim lesonitom debljine 6 cm, plutom debljine 2 cm, ekspanziranim polistirolom debljine 2 cm i 3 cm i penoplastom debljine 3 cm. Uslove II građevinske klimatske zone ispunjavaju kombinacije sa termoizolacionom pločom od plute debljine 3 cm, prošivene slame debljine 6 cm, penoplasta debljine 6 cm. Uslove III građevinske klimatske zone ispunjava kombinacija sa termoizolacionom pločom od gasobetona, plute i prošivene trske debljine 6 cm, ekspanziranog polistirola debljine 6 cm i sačaste plastične mase debljine 2 cm, 3 cm i 6 cm.

Spoljašnja izolacija



Slika 3.4. Grafički prikaz vrednosti koeficijenta U , u zavisnosti od kombinacija slojeva (Tabela 3.) i debljine termoizolacionog materijala (dato u legendi)

Primećuje se da kombinacija materijala sa ekspaniranim polistirolom debljine 6 cm daje dvostruko slabiju izolaciju od kombinacije sa saćastom plastičnom masom kao izolacionim materijalom iste debljine. Koristeći ploče od prošivene slame debljine 6 cm, dobija se ista izolacija kao kod kombinacije sa ekspaniranim polistirolom iste debljine, dok ploče od plute debljine 3 cm daju izolacionu vrednost istu kao i ploče od penoplasta debljine 6 cm. Prema tome, koristeći ploče od plute, možemo smanjiti ukupnu debljinu zida, a pri tome dobiti zadovoljavajuću izolaciju.

Sa slike 3.4. je moguće jasnije razumeti prethodnu analizu Table 3.. Uočava se da prve tri kombinacije ne zadovoljavaju uslove ni jedne građevinske klimatske zone, takođe se vidi da kombinacija 13 zadovoljava sve uslove. Detajnija razrada grafika neće biti urađena, jer je sve objašnjeno tokom analize Tabele 3. i ona služi samo za lakše razumevanje analize.

Tabela 3. Ukupni koeficijent prolaza za spoj materijala. U ovom slučaju računa se za kombinaciju o krečnog maltera, pune fasadne opeke i termoizolacionog materijala. U kombinacijama se menja debljina i vrsta termizolacionog materijala.

Broj kombinacija	Materijal	Toplotna provodljivost	Koeficijent prolaza K $K = \lambda / x$				1/K				Suma $\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \dots + \frac{1}{K_n} = \frac{1}{U}$			Ukupni koeficijent prolaza $U [W / m^2 \cdot ^\circ C]$			
			Debljina izolacionog materijala				x=0,02m	x=0,03m	x=0,06m		x=0,02m	x=0,03m	x=0,06m	x=0,02m	x=0,03m	x=0,06m	
			x=0,02m	x=0,03m	x=0,06m												
	Krečni malter 3cm	0,85				28,33				0,04							
1	Termoizolacioni materijal debljine x	Durisol	0,25	12,5	8,33	4,17		0,08	0,12	0,24		0,53	0,57	0,69	1,90	1,77	1,46
2		Taroklit i heraklit	0,3	15	10	5		0,07	0,1	0,2		0,51	0,55	0,65	1,95	1,83	1,55
3		Jednozrni-kaverozni betoni	0,8	40	26,67	13,33		0,02	0,04	0,08		0,47	0,48	0,52	2,13	2,07	1,92
4		Gasobetoni	0,2	10	6,67	3,33		0,1	0,15	0,3		0,55	0,60	0,75	1,83	1,68	1,34
5		Ekspandirani perlit	0,07	3,5	2,33	1,17		0,29	0,43	0,86		0,73	0,87	1,30	1,37	1,14	0,77
6		Mineralna vuna	0,14	7	4,67	2,33		0,15	0,21	0,43		0,59	0,66	0,87	1,70	1,52	1,14
7		Meki lesanit	0,07	3,5	2,33	1,17		0,29	0,43	0,86		0,73	0,87	1,30	1,37	1,14	0,77
8		Tvrđi lesanit	0,2	10	6,67	3,33		0,1	0,15	0,3		0,55	0,60	0,75	1,83	1,68	1,34
9		Ploče od plute	0,04	2	1,33	0,67		0,5	0,75	1,5		0,95	1,20	1,95	1,06	0,84	0,51
10		Ploče od prošivene trske	0,05	2,5	1,67	0,83		0,4	0,6	1,2		0,85	1,05	1,65	1,18	0,96	0,61
11		Ploče od prošiene slame	0,09	4,5	3	1,5		0,22	0,33	0,67		0,67	0,78	1,11	1,50	1,28	0,90
12		Stiropor-ekspandirani polistirol	0,05	2,5	1,67	0,83		0,4	0,6	1,2		0,85	1,05	1,65	1,18	0,96	0,61
13		Saćaste plastične mase	0,02	1	0,67	0,33		1	1,5	3		1,44	1,95	3,45	0,69	0,51	0,30
14		Penoplasti	0,08	4	2,67	1,33		0,25	0,38	0,75		0,7	0,82	1,20	1,44	1,22	0,84
	Puna fasadna opeka 25 cm	0,61				2,44				0,41							

Sa različitim bojama su predstavljene vrednosti koeficijenta U, koja odgovara određenoj klimatskoj zoni.

Žuta: klimatska zona I

Zelena: klimatska zona II

Crvena: klimatska zona III

Od spoljnih zidova zahteva se i tzv. toplotna stabilnost, tj. da zid u letnjem razdoblju sačuva relevantnu postojanost temperature na svojoj unutrašnjoj površini. Ako se u zidnoj oblozi, sa spoljne strane, predvidi provetravani vazdušni sloj, nije potrebna provera toplotne stabilnosti. Taj vazdušni sloj služi i za odvođenje vodene pare iz termoizolacionih materijala.

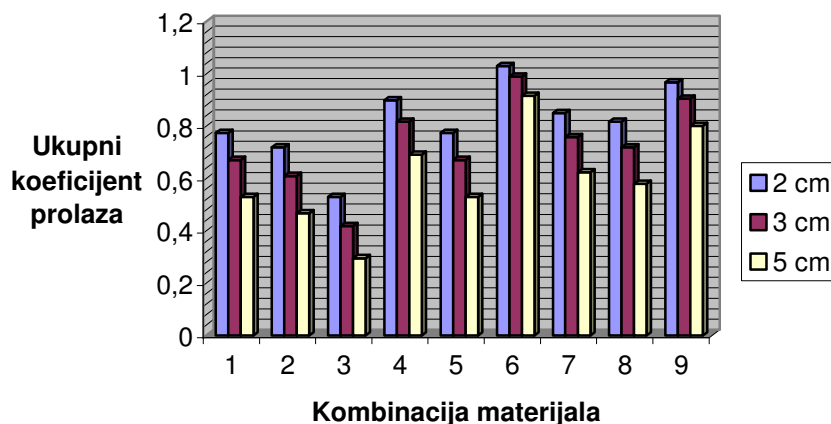


Slika 3.5. Presek konstrukcije za spoljašnju izolaciju sa vazdušnim slojem

Računske vrednosti za ovakav sklop se mogu videti u Tabeli 4.. Kao što se može primetiti, ukupna debljina zida ne prelazi 35 cm. Sudeći po vrednostima iz tabele, vazdušni sloj veoma doprinosi toplotnoj izolaciji datog sklopa, jer su svi spojevi prihvaćeni u najmanje jednoj od klimatskih zona. Najbolja kombinacija se postiže termoizolacionom pločom od poliuretana debljine 5 cm. Međutim, dobra izolacija sa ovom kombinacijom može se dobiti već sa ukupnom debljinom zida od 32 cm. Sudeći po vrednostima u tabeli, vidi se da ploče od prošivene slame i trske, kao i ploče od plute daju veoma dobre vrednosti. S obzirom na to da se radi o materijalima biljnog porekla, trebalo bi im posvetiti posebnu pažnju. Kombinacija sa ekspaniranim polistirolom debljine 5 cm daje skoro dvostruko bolju toplotnu izolaciju od kombinacije sa durisolom debljine 2 cm. Prema tome, pored vrste materijala i debljina veoma utiče na krajnji efekat izolacije. Primećuje se da se, koristeći ploče od plute debljine 5 cm, dobija skoro dvostruko bolja izolacija od mineralne vune iste debljine. Međutim, možda je ekonomičnije i u zavisnosti od vrste materijala od mineralne vune (jer u ovu grupu spada i kamena vuna, kao i staklena), nekada i bolje koristiti mineralnu vunu, jer je ona fleksibilnija i može se koristiti u konstrukcijama bilo kog oblika.

Da bi tabelarna analiza bila jasnija i u ovom slučaju će se dati grafički prikaz vrednosti koeficijenta U , u zavisnosti od kombinacije i debljine materijala (slika 3.6.). Uočava se sa slike da kombinacija 3 daje najmanju vrednost ukupnog koeficijenta prolaza toplote U , prema tome pruža najbolju toplotnu izolaciju. Kombinacije 1 i 2 takođe daju veoma dobre rezultate. Detaljnija analiza grafika se neće dati, jer ona i u ovom slučaju služi samo da bi se lakše pratila analiza Tabele 4..

Spoljašnja izolacija sa vazдушnim slojem



Slika 3.6. Grafički prikaz vrednosti koeficijenta U , u zavisnosti od kombinacija slojeva (Tabela 4.) i debljine termoizolacionog materijala (dato u legendi)

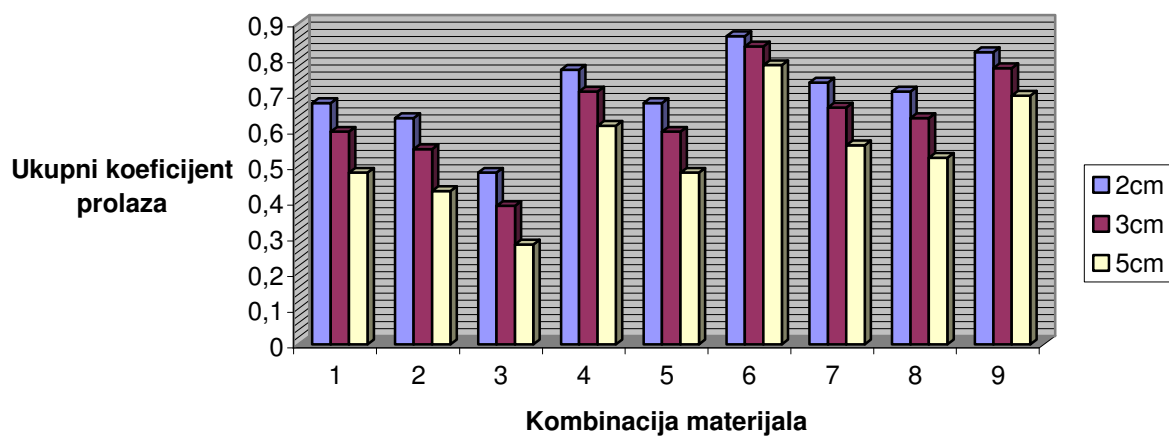
U poslednje vreme se sve više koriste šuplji blokovi, delom zato što je zidanje brže, zgrade su lakše, a delom zato što potrebe za štednjom toplotne energije, propisi za toplotnu zaštitu postaju stroži, pa bi se debljine spoljašnjih zidova građenih punom opekom znatno povećale. U Tabeli 5. će biti data ista kombinacija materijala kao u Tabeli 4., samo sa šupljom opekom.

Vidi se da je maksimalna debljina zida 35 cm, ali se dobija veoma dobra izolacija i već sa ukupnom debljinom zida od 32 cm. Uočava se da najbolju izolaciju pruža kombinacija sa pločom od poliuretana debljine 5 cm. Najslabiju zaštitu daje ploča od durisola debljine 2 cm. Može se primetiti da približno istu vrednost ukupnog koeficijenta prolaza daje spoj sa ekspanziranim polistirolom, plutom i trskom debljine 5 cm. Skoro istu zaštitu pruža i kombinacija sa poliuretanom debljine 2 cm. Spoj sa slamom ili mineralnom vunom debljine 5 cm pruža sličnu zaštitu kao kombinacija sa trskom, ekspanziranim perlitom ili saćastom plastičnom masom debljine 3 cm.

Upoređujući Tabelu 4. i 5., primećuje se da se dobija bolja zaštita kod svake kombinacije koristeći šuplju opeku umesto pune opeke. Prema tome, gore navedena izjava je dokazana.

I u ovom slučaju, da bi tabelarna analiza bila jasnija, dat je grafički prikaz rezultata. Na tom prikazu (slika 3.7.) je dat ukupni koeficijent prolaza, u zavisnosti od kombinacije materijala i debljine izolacionog sloja. Sa slike se vidi, da je najmanji koeficijent prolaza U za kombinaciju 3, prema tome ovaj spoj pruža najbolju zaštitu. Najslabiju izolaciju daje kombinacija 6, ali i ona ispunjava uslove II građevinske klimatske zone. Detaljnije objašnjenje prikaza se neće dati ni u ovom slučaju.

Spoljašnja izolacija sa šupljom opekom



Slika 3.7. Grafički prikaz vrednosti koeficijenta U , u zavisnosti od kombinacija slojeva (Tabela 5.) i debljine termoizolacionog materijala (dato u legendi)

Tabela 4. Ukupni koeficijent prolaza U za datu kombinaciju materijala. U ovom slučaju računa se za spoj, sa vazдушnim slojem, od dva sloja krečnog maltera, pune fasadne opeke i termoizolacionog materijala. U kombinacijama se menja debljina i vrsta termoizolacionog materijala.

.Broj kombinacije	Materijal		Toplotna provodljivost	Koeficijent prolaza toplote $K = \lambda / x$			Koeficijent 1/K			Suma $\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \dots + \frac{1}{K_n} = \frac{1}{U}$			Ukupni koeficijent prolaza $U [W / m^2 \text{ } ^\circ C]$				
				Debljina izolacije				Debljina izolacije									
				x=0,02m	x=0,03m	x=0,05m		x=0,02m	x=0,03m	x=0,05m							x=0,02m
	Krečni malter 2 cm		0,85				42,5	0,02									
	Vazdušni sloj 1 cm		0,023				2,3	0,44									
1	Izolacija debljine x ploče od:	Stiropora-ekspandiranog polistirola	0,05	2,5	1,67	1			0,4	0,6	1	1,29	1,49	1,89	0,77	0,67	0,53
2		Plute	0,04	2	1,33	0,8			0,5	0,75	1,25	1,39	1,64	2,14	0,72	0,61	0,47
3		Poliuretana	0,02	1	0,67	0,4			1	1,5	2,5	1,89	2,39	3,39	0,53	0,42	0,29
4		Prošivene slame	0,09	4,5	3	1,8			0,22	0,33	0,56	1,11	1,22	1,45	0,90	0,82	0,69
5		Prošivene trske	0,05	2,5	1,67	1			0,4	0,6	1	1,29	1,49	1,89	0,77	0,67	0,53
6		Durisol	0,25	12,5	8,33	5			0,08	0,12	0,2	0,97	1,01	1,09	1,30	0,99	0,92
7		Ekspandirani perlit	0,07	3,5	2,33	1,4			0,29	0,43	0,71	1,18	1,32	1,61	0,85	0,76	0,63
8		Sačaste plastičnec mase	0,06	3	2	1,2			0,33	0,5	0,83	1,25	1,39	1,72	0,82	0,72	0,58
9		Mineralne vune	0,14	7	4,67	2,8			0,14	0,21	0,36	1,04	1,11	1,25	0,97	0,90	0,80
	Puna opeka 25 cm		0,61				2,44	0,41									
	Krečni malter 2 cm		0,85				42,5	0,02									

Sa različitim bojama su predstavljene vrednosti koeficijenta U , koja odgovara određenoj klimatskoj zoni.

Žuta: klimatska zona I

Zelena: klimatska zona II

Crvena: klimatska zona III

Tabela 5. Ukupni koeficijent prolaza U za datu kombinaciju materijala. U ovom slučaju računa se za spoj, sa vazдушnim slojem, od dva sloja krečnog maltera, šuplje opeke i termoizolacionog materijala. U kombinacijama se menja debljina i vrsta termoizolacionog materijala.

Broj kombinacije	Materijal		Toplotna provodljivost	Koeficijent prolaza toplote			Koeficijent 1/K			Suma			Ukupni koeficijent prolaza				
				$K = \lambda / x$						$\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \dots + \frac{1}{K_n} = \frac{1}{U}$			$U [W / m^2 \cdot ^\circ C]$				
				Debljina izolacije			Debljina izolacije			x=0,02m x=0,03m x=0,05m			x=0,02m x=0,03m x=0,05m				
			x=0,02m	x=0,03m	x=0,05m		x=0,02m	x=0,03m	x=0,05m		x=0,02m	x=0,03m	x=0,05m	x=0,02m	x=0,03m	x=0,05m	
	Krečni malter 2 cm		0,85				42,5				0,02						
	Vazdušni sloj 1 cm		0,023				2,3				0,43						
1	Izolacija debljine x ploče od:	Stiropora-ekspandirani polistirol	0,05	2,5	1,67	1		0,4	0,6	1		1,48	1,68	2,08	0,68	0,60	0,48
2		Plute	0,04	2	1,33	0,8		0,5	0,75	1,25		1,58	1,83	2,33	0,63	0,55	0,43
3		Poliuretana	0,02	1	0,67	0,4		1	1,5	2,5		2,08	2,58	3,58	0,48	0,39	0,28
4		Prošivene slame	0,09	4,5	3	1,8		0,22	0,33	0,56		1,30	1,41	1,63	0,77	0,71	0,61
5		Prošivene trske	0,05	2,5	1,67	1		0,4	0,6	1		1,48	1,68	2,08	0,68	0,60	0,48
6		Durisol	0,25	12,5	8,33	5		0,08	0,12	0,2		1,16	1,20	1,28	0,86	0,84	0,78
7		Ekspandirani perlit	0,07	3,5	2,33	1,4		0,29	0,43	0,71		1,36	1,51	1,79	0,73	0,66	0,56
8		Saćaste plastičnec mase	0,06	3	2	1,2		0,33	0,5	0,83		1,41	1,58	1,91	0,71	0,63	0,52
9		Mineralne vune	0,14	7	4,67	2,8		0,14	0,21	0,36		1,22	1,29	1,43	0,82	0,77	0,70
	Šuplja opeka 25 cm		0,42				1,68				0,60						
	Krečni malter 2 cm		0,85				42,5				0,02						

Sa različitim bojama su predstavljene vrednosti koeficijenta U , koja odgovara određenoj klimatskoj zoni.

Žuta: klimatska zona I

Zelena: klimatska zona II

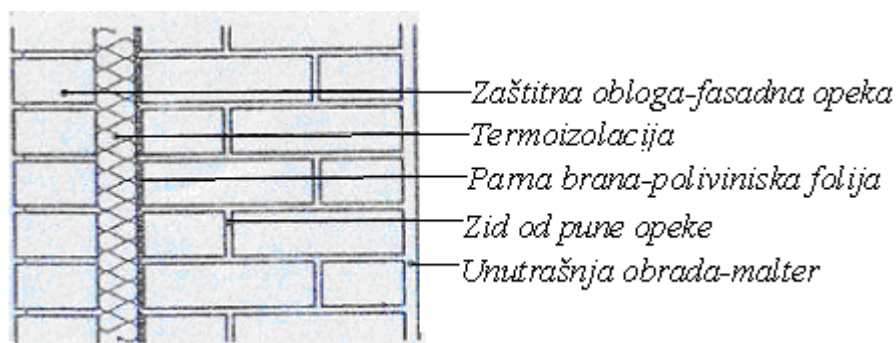
Crvena: klimatska zona III

3.2. Unutrašnja izolacija

Nasuprot izolaciji koja se stavlja spolja, unutrašnja izolacija je četverostruko do sedmostruko jeftinija. Zid se može izolovati od vremenskih uticaja bez dodatnog postavljanja zaštitnog sloja. Ponekad, pogotovo kod starijih zgrada sa slabom toplotnom zaštitom, kada bi postavljanje toplotne zaštite sa spoljne strane bilo nepogodno, skupo ili nemoguće, izolacioni sloj se mora postaviti sa unutrašnje strane. U ovom radu ovaj način izolacije se neće opširnije razmatrati, jer model aktivne izolacije, koja se razmatra u sledećoj glavi, ne može se primeniti kod ove konstrukcije.

3.3. Izolacija šupljeg zida

U našim klimatskim uslovima uglavnom se koriste "sendvič" zidovi, što je poznatiji naziv za izolaciju šupljeg zida, kao što je to već na početku ove glave i navedeno. Oni mogu biti različitih materijala u zavisnosti od klimatskih uslova i arhitektonske obrade zgrade.



Slika 3.8. Presek konstrukcije "sendvič" zida

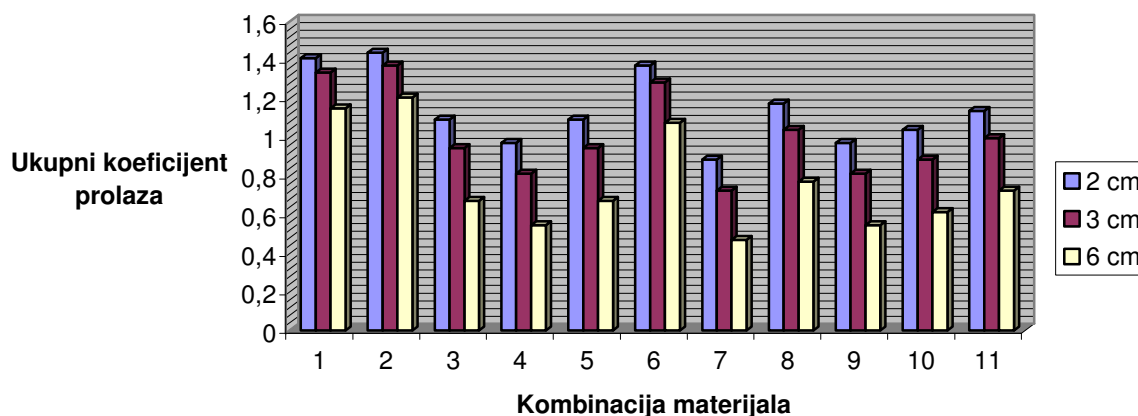
Svaki sloj u tom sistemu ima određenu funkciju i treba da bude sklopljen po određenom redosledu.

- **fasadna obloga**, osim što učestvuje u arhitektonskom oblikovanju zgrade, štiti izolacioni sloj koji je pravljen od lakih materijala i osetljiv je na mehanička oštećenja.
- **izolacioni sloj**, po pravilu treba da bude postavljen sa spoljne strane, u tom slučaju zid je zaštićen i topao pa se vodena para neće kondenzovati na njegovoj unutrašnjoj površini.
- **parna brana**, (plastična folija ili sl.) stavlja se na izolacioni sloj sa unutrašnje strane, kako bi se sprečilo prodiranje vodene pare kroz zid, u šupljikavu termoizolaciju i tu se kondenzovala.
- **spoljni zid**, konstruktivni ili pregradni,
- unutrašnja obrada zida (po izboru samo krečni malter, ili gipsane ploče itd.).

U Tabeli 6. su date računске vrednosti za ovakav spoj materijala za različite kombinacije. Maksimalna debljina zida je 46 cm, ali sa dobrom kombinacijom ona se može smanjiti na 42 cm. Ove vrednosti su dosta velike, ali stabilnost i trajnost ovakve

izgradnje kompenzuje ove nedostatke. Uočava se da najbolju izolaciju pruža kombinacija sa pločom od plute debljine 6 cm, ali se dobijaju približne vrednosti i sa mineralnom vatom iste debljine, kao i sa ekspaniranim polistirolom debljine 6 cm. Najslabiju izolaciju, koja ispunjava uslove I građevinske klimatke zone, pruža kombinacija sa tarolitom i heraklitom debljine 6 cm. Kombinacijom ploče od plute debljine 6 cm dobija se skoro dvostruko bolja izolacija nego sa pločom od plute debljine 2 cm. Međutim, našim klimatskim uslovima odgovara i ova poslednja kombinacija, pa uzimajući u obzir debljinu zida, zgodnija je druga mogućnost. Ploče od ekspaniranog perlita debljine 6 cm pružaju skoro istu zaštitu kao i ploče od mekog lesonita, ili kao ploče od prošivene slame, sačaste plastične mase i penoplasta iste debljine, pa se shodno tome može birati željena kombinacija za postizanje istog efekta.

"Sendvič" zid



Slika 3.9. Grafički prikaz vrednosti koeficijenta U , u zavisnosti od kombinacija slojeva (Tabela 6.) i debljine termoizolacionog materijala (dato u legendi)

Slika 3.9. je data da bi se lakše pratila analiza Tabele 6.. Uočava se sa slike da najbolju izolaciju pruža kombinacija 7, a najslabiju kombinacija 2. Detaljnije obrazloženje grafičkog prikaza ovde se neće dati, jer je analiza data iznad slike.

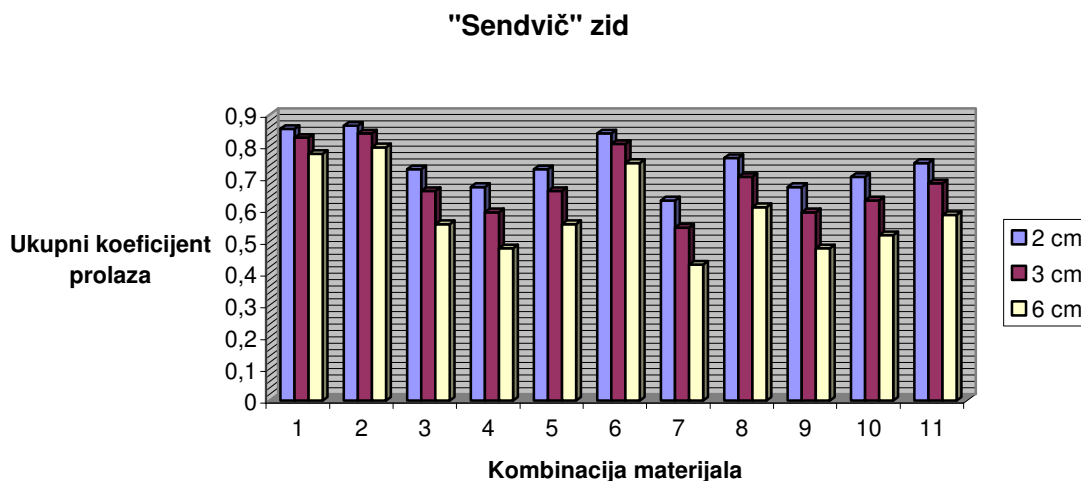
Slična kombinacija sa šupljom opekom, ali sa drugačijim redosledom slojeva daje mnogo bolje rezultate. Analiza nekoliko kombinacija je data u Tabeli 7.



Slika 3.10. Presek konstrukcije "sendvič" zida sa šupljom opekom.

Vidi se iz tabele da je svaka kombinacija dobitna, a maksimalna debljina zida je 35 cm, dok minimalna debljina od 32 cm takođe ispunjava uslove II građevinske klimatske zone. Najbolju izolaciju pruža kombinacija sa pločom od plute debljine 5 cm, mada približne vrednosti daje i kombinacija sa mineralnom vatom i ekspanziranim polistirolom kao izolacionim materijalom iste debljine. Dvostruko slabiju izolaciju nam pruža kombinacija sa durisolom, tarolitom i heraklitom debljine 2 cm. Ova konstrukcija pruža širok izbor kombinacija koje daju zadovoljavajući efekat.

Grafički prikaz vrednosti ukupnog koeficijenta prolaza toplote u zavisnosti od kombinacije i debljine materijala za Tabelu 7. dat je na slici 3.11.



Slika 3.11. Grafički prikaz vrednosti koeficijenta U , u zavisnosti od kombinacija slojeva (Tabela 7.) i debljine termoizolacionog materijala (dato u legendi)

Kombinacija 7 ima najnižu vrednost ukupnog koeficijenta prolaza toplote. Prema tome, ona pruža najbolju toplotnu izolaciju, dok kombinacija 2 najslabiju. Uočava se da sve kombinacije imaju vrednost ukupnog koeficijenta prolaza toplote manju od $0,9 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$, prema tome ispunjavaju uslove I i II građevinske klimatske zone. Detaljnija razrada grafičkog prikaza se neće dati, jer ona služi da bi se lakše pratila prethodna analiza Tabele 7..

Tabela 6. Ukupni koeficijent prolaza toplote za različite kombinacije. Napravljen je spoj od dva sloja pune opeke, termoizolacionog materijala, parne brane i krečnog maltera. Debljina i vrsta izolacionog materijala se menja, dok su ostale veličine stalne.

Broj kombinacije	Materijal		Toplotna provodljivost	Koeficijent prolaza $K = \lambda / x$			$1/K$			Suma $\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \dots + \frac{1}{K_n} = \frac{1}{U}$			Ukupni koeficijent prolaza $U [W / m^2 \text{ } ^\circ C]$				
				Debljina izolacionog materijala			Debljina izolacionog materijala			Debljina izolacionog materijala							
				x=0,02m	x=0,03m	x=0,06m	x=0,02m	x=0,03m	x=0,06m	x=0,02m	x=0,03m	x=0,06m	x=0,02m	x=0,03m	x=0,06m		
	Puna fasadna opeka 12cm		0,7			5,83				0,17							
1	Termoizolacija deljine x	Durisol	0,25	12,5	8,33	4,17		0,08	0,12	0,24		0,71	0,75	0,87	1,41	1,34	1,15
2		Tarolit i heraklit	0,3	15	10	5		0,07	0,1	0,2		0,70	0,73	0,83	1,44	1,37	1,21
3		Ekspandirani perlit	0,07	3,5	2,33	1,17		0,291	0,43	0,86		0,91	1,06	1,49	1,09	0,95	0,67
4		Mineralna vata	0,05	2,5	1,67	0,83		0,4	0,6	1,2		1,03	1,23	1,83	0,97	0,82	0,55
5		Meki lesanit	0,07	3,5	2,33	1,17		0,29	0,43	0,86		0,91	1,06	1,49	1,09	0,95	0,67
6		Tvrđi lesanit	0,2	10	6,67	3,33		0,1	0,15	0,3		0,73	0,78	0,93	1,37	1,29	1,08
7		Ploče od plute	0,04	2	1,33	0,67		0,5	0,75	1,5		1,13	1,38	2,13	0,89	0,73	0,47
8	Ploče od prošiene slame	0,09	4,5	3	1,5		0,22	0,33	0,67		0,86	0,96	1,30	1,18	1,04	0,77	
9	Stiropor-ekspandirani polistirol	0,05	2,5	1,67	0,83		0,4	0,6	1,2		1,03	1,23	1,83	0,98	0,82	0,55	
10	Sačaste plastične mase	0,06	3	2	1		0,33	0,5	1		0,96	1,13	1,63	1,04	0,89	0,61	
11	Penoplasti	0,08	4	2,67	1,33		0,25	0,38	0,75		0,88	1	1,38	1,14	0,99	0,73	
	Parna brana 0,5cm		0,21			42				0,02							
	Puna opeka 25cm		0,61			2,44				0,41							
	Krečni malter 2cm		0,85			42,5				0,02							

Sa različitim bojama su predstavljene vrednosti koeficijenta U, koja odgovara određenoj klimatskoj zoni.

Žuta: klimatska zona I

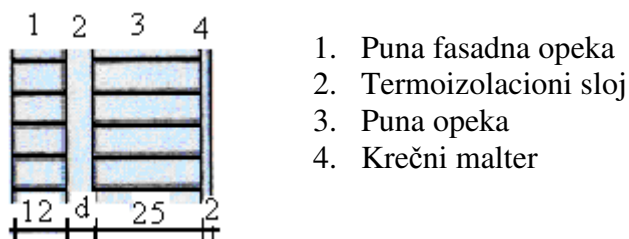
Zelena: klimatska zona II

Crvena: klimatska zona III

Tabela 7. Ukupni koeficijent prolaza U različite spojeve materijala. Računa se U za kombinaciju od dva sloja krečnog maltera, giter opeke, termoizolacionog materijala, parne brane i šuplje opeke. U kombinacijama se menja debljina i vrsta izolacionog materijala.

Broj kombinacije	Materijal		Toplotna provodljivost	Koeficijent prolaza $K = \lambda / x$			1/K			Suma $\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \dots + \frac{1}{K_n} = \frac{1}{U}$			Ukupni koeficijent prolaza $U [W / m^2 \cdot ^\circ C]$				
				Debljina izolacionog materijala			Debljina izolacionog materijala			Debljina izolacionog materijala			Debljina izolacionog materijala				
				x=0,02m	x=0,03m	x=0,05m	x=0,02m	x=0,03m	x=0,05m	x=0,02m	x=0,03m	x=0,05m	x=0,02m	x=0,03m	x=0,05m		
	Krečni malter 2cm		0,85				42,5				0,02						
	Giter opeka 19cm		0,22				1,16				0,86						
1	Termoizolacione ploče debljine x	Durisol	0,25	12,5	8,33	5		0,08	0,12	0,2		1,17	1,21	1,29	0,86	0,83	0,78
2		Tarolit i heraklit	0,3	15	10	6		0,07	0,1	0,17		1,16	1,19	1,26	0,87	0,84	0,80
3		Ekspandirani perlit	0,07	3,5	2,33	1,4		0,29	0,43	0,71		1,37	1,52	1,80	0,73	0,66	0,56
4		Mineralna vata	0,05	2,5	1,67	1		0,4	0,6	1		1,49	1,69	2,09	0,67	0,60	0,48
5		Meki lesomit	0,07	3,5	2,33	1,4		0,29	0,43	0,71		1,38	1,52	1,80	0,73	0,66	0,56
6		Tvrđi lesomit	0,2	10	6,67	4		0,1	0,15	0,25		1,19	1,24	1,34	0,84	0,81	0,75
7		Ploče od plute	0,04	2	1,33	0,8		0,5	0,75	1,25		1,59	1,84	2,34	0,63	0,54	0,43
8		Ploče od prošiene slame	0,09	4,5	3	1,8		0,22	0,33	0,56		1,31	1,42	1,64	0,76	0,70	0,61
9		Stiropor-ekspandirani polistirol	0,05	2,5	1,67	1		0,4	0,6	1		1,49	1,69	2,09	0,67	0,60	0,48
10		Saćaste plastične mase	0,06	3	2	1,2		0,33	0,5	0,83		1,42	1,59	1,92	0,70	0,632	0,52
11		Penoplasti	0,08	4	2,67	1,6		0,25	0,38	0,62		1,34	1,46	1,71	0,75	0,69	0,58
	Parna brana 0,5cm		0,21				42				0,02						
	Šuplja opeka 6,5cm		0,42				6,46				0,16						
	Krečni malter 2cm		0,85				42,5				0,02						

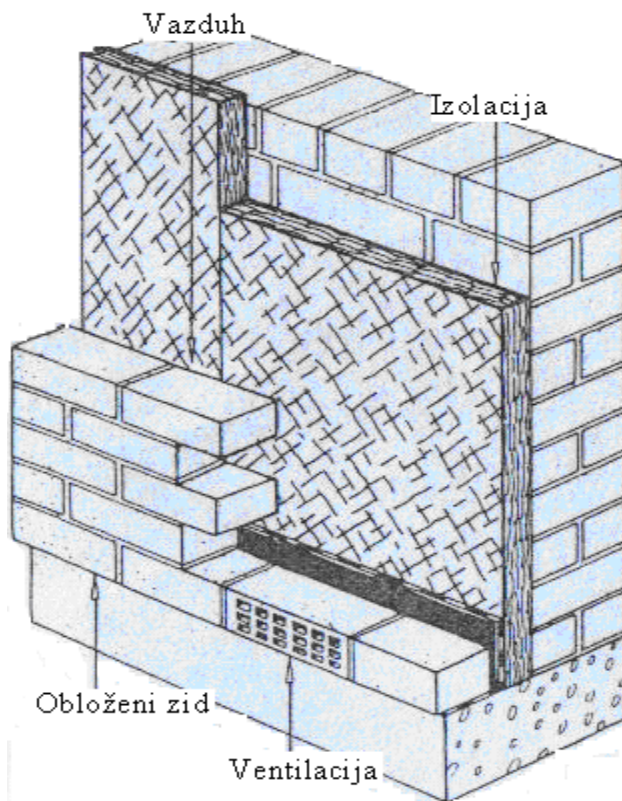
Razmotriće se i kombinacija sa zemljom kao izolacionim materijalom. Koristiće se zidovi od pune opeke, dok će se menjati debljina izolacionog sloja i računati ukupni koeficijent prolaza za te kombinacije.



"Slika 3.12. Konstrukcija "sendvič" zida sa naznačenim parametrima

Iz Tabele 8. se vidi da minimalna debljina zemlje koja zadovoljava uslove I građevinske klimatske zone iznosi 53 cm. Međutim, da bi se zadovoljili uslovi II građevinske klimatske zone neophodna je debljina izolacionog sloja 35 cm, čime se dobija ukupna debljina zida od 73 cm. Ova kombinacija je primamljiva zbog vrste izolacionog materijala, ali je ogroman nedostatak debljina zida. Iz Tabele 6. se vidi da se korišćenjem drugih izolacionih materijala u ovakvoj kombinaciji, može dobiti približno ista izolacija, već sa ukupnom debljinom zida od 42 cm.

Interesantan način odvođenje vodene pare je kombinacija "sendvič" zida sa vazдушnim slojem (slika 3.13.).

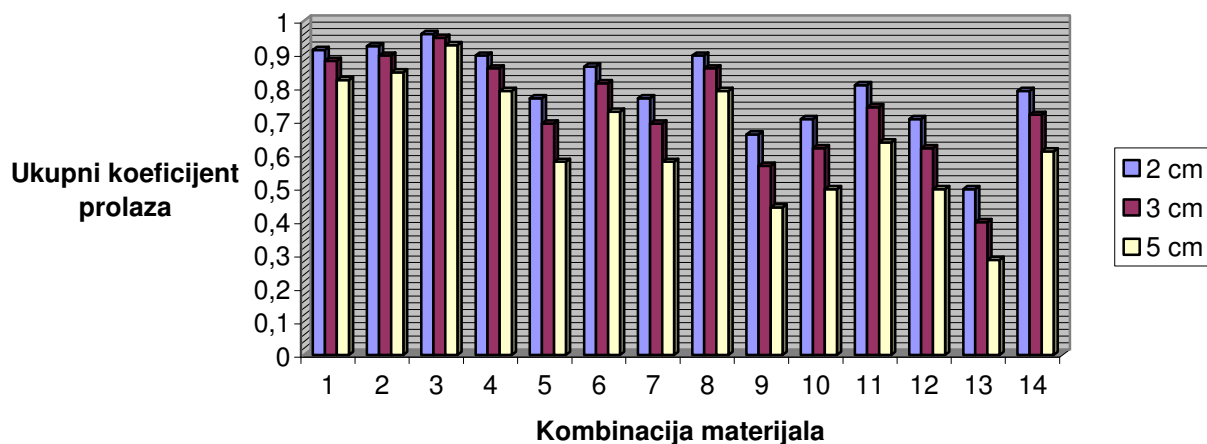


Slika 3.13. "Sendvič" zid sa vazдушnim slojem

Za ovaj način izgradnje potrebno je podnožje na koje se stavljaju ventilacione opeke. Ventilacione opeke na podnožju odvede vodenu paru kroz šuplje prostore poroznih ploča. Izolacija je spoljena sa nosećim zidom (unutrašnjim). Prilikom zidanja zaštitnog zida (spoljašnjeg) treba paziti da u šupljine ne upadne malter i time uništi dejstvo ventilacije. Termoizolacione ploče mogu se pričvrstiti ili zalepiti na noseći zid; međutim, malo je teže povezati zaštitni zid sa nosećim zidom.

Iz Tabele 9. se vidi da je ovakav sklop materijala neverovatan. Svaka kombinacija spada u neku od klimatskih zona. Maksimalna debljina zida 43 cm, ali već sa debljinom od 40 cm se dobija dobra toplotna izolacija za određenu kombinaciju. Najbolju izolaciju pruža kombinacija sa sačastom plastičnom masom kao termoizolacionim materijalom debljine 5 cm, a najslabiju kombinacija sa jednozrno-kaveroznim betonom debljine 2 cm. Približno istu izolaciju daje kombinacija sa durisolom debljine 5 cm, gasobetonom, mineralnom vunom, tvrdim lesonitom i pločom od prošivene slame iste debljine, kao i kombinacija sa ekspanziranim perlitom debljine 2 cm i 3 cm. Takođe, ploča od plute i prošivene trske debljine 2 cm i 3 cm, kao i ekspanzirani perlit ili penoplast debljine 2 cm i 3 cm dalju istu izolaciju kao i predhodne kombinacije. I u ovom slučaju je velik izbor mogućih kombinacija, u zavisnosti od željenog efekta i pristupačnosti materijala i finansijskih mogućnosti.

"Sendvič" zid sa vazдушnim slojem



Slika 3.14. Grafički prikaz vrednosti koeficijenata U , u zavisnosti od kombinacija slojeva (Tabela 9.) i debljine termoizolacionog materijala (dato u legendi)

Grafički prikaz tabelarih vrednosti je dat na slici 3.14.. Uočava se da najbolju zaštitu pruža kombinacija 13, dok najslabiju kombinacija 3. Svi spojevi ipunjavaju uslove jedne od građevinskih klimatskih zona. Slika je data da bi se lakše pratila tabelarna analiza za Tabelu 9., prema tome detaljnija razrada grafičkog prikaza se neće dati.

Tabela 8. Ukupni koeficijent prolaza U kombinacije sa zemljom kao termoizolacionim malterijalom. Računa se U spoja od pune fasadne opeke, termoizolacionog materijala, parne brane i pune opeke. Debljina termoizolacionog materijala se menja, ostale veličine su stalne.

Materijal	Debljina izolacionog sloja	Toplotna provodljivost	Koeficijent prolaza K		$1/K$		Suma	Ukupni koeficijent prolaza U [$W / m^2 \cdot ^\circ C$]
			$K = \lambda / x$				$\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \dots + \frac{1}{K_n} = \frac{1}{U}$	
Puna fasadna opeka 12cm		0,7		5,83		0,17		
Zemlja	x=0,05m	0,7	14		0,07		0,68	1,48
	x=0,10m		7		0,14		0,75	1,34
	x=0,15m		4,67		0,21		0,82	1,22
	x=0,20m		3,5		0,29		0,89	1,12
	x=0,25m		2,8		0,36		0,96	1,04
	x=0,30m		2,33		0,43		1,03	0,97
	x=0,35		2		0,5		1,11	0,90
	x=0,40		1,75		0,57		1,18	0,85
Parna brana 0,5cm		0,21		42		0,02		
Puna opeka 25 cm		0,61		2,44		0,41		

Sa različitim bojama su predstavljene vrednosti koeficijenta U , koja odgovara određenoj klimatskoj zoni.

Žuta: klimatska zona I

Zelena: klimatska zona II

Crvena: klimatska zona III

Tabela 9. Ukupni koeficijent prolaza toplote za razne kombinacije. Računa se U za spoj od dva sloja pune opeke, vazduha i termoizolacionog sloja. U kombinaciji se menja debljina i vrsta termoizolacionog matrijala.

Broj kombinacije	Materijal		Toplotna provodljivost	Koeficijent prolaza $K = \lambda / x$			1/K			Suma $\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \dots + \frac{1}{K_n} = \frac{1}{U}$			Ukupni koeficijent prolaza $U [W / m^2 \text{ } ^\circ C]$				
				Debljina izolacionog materijala			Debljina izolacionog materijala			Debljina izolacionog materijala			Debljina izolacionog materijala				
				x=0,02m	x=0,03m	x=0,05m	x=0,02m	x=0,03m	x=0,05m	x=0,02m	x=0,03m	x=0,05m	x=0,02m	x=0,03m	x=0,05m		
	Puna fasadna opeka 12cm		0,7				5,83				0,17						
	Vazduh 1cm		0,023				2,3				0,43						
1	Termoizolacioni sloj debljine x	Durisol	0,25	12,5	8,33	5		0,08	0,12	0,2		1,10	1,14	1,22	0,91	0,88	0,82
2		Taroklit i heraklit	0,3	15	10	6		0,07	0,1	0,17		1,08	1,12	1,18	0,92	0,90	0,85
3		Jednozrni-kaverozni betoni	0,8	40	26,67	16		0,025	0,04	0,06		1,04	1,05	1,08	0,96	0,95	0,93
4		Gasobetoni	0,2	10	6,67	4		0,1	0,15	0,25		1,12	1,17	1,27	0,90	0,86	0,79
5		Ekspandirani perlit	0,07	3,5	2,33	1,4		0,29	0,43	0,71		1,30	1,45	1,73	0,77	0,69	0,58
6		Mineralna vuna	0,14	7	4,67	2,8		0,14	0,21	0,36		1,16	1,23	1,37	0,87	0,81	0,73
7		Meki lesomit	0,07	3,5	2,33	1,4		0,29	0,43	0,71		1,30	1,45	1,73	0,77	0,69	0,58
8		Tvrđi lesomit	0,2	10	6,67	4		0,1	0,15	0,25		1,12	1,17	1,27	0,90	0,86	0,79
9		Ploče od plute	0,04	2	1,33	0,8		0,5	0,75	1,25		1,52	1,77	2,27	0,66	0,57	0,44
10		Ploče od prošivene trske	0,05	2,5	1,67	1		0,4	0,6	1		1,42	1,62	2,02	0,71	0,62	0,50
11		Ploče od prošiene slame	0,09	4,5	3	1,8		0,22	0,33	0,56		1,24	1,35	1,57	0,81	0,74	0,64
12		Stiropor-ekspandirani polistirol	0,05	2,5	1,67	1		0,4	0,6	1		1,42	1,62	2,02	0,71	0,62	0,50
13		Saćaste plastične mase	0,02	1	0,67	0,4		1	1,5	2,5		2,02	2,52	3,52	0,50	0,40	0,28
14		Penoplasti	0,08	4	2,67	1,6		0,25	0,38	0,62		1,27	1,39	1,64	0,79	0,72	0,61
	Puna opeka 25cm		0,61				2,44				0,41						

Sa različitim bojama su predstavljene vrednosti koeficijenta U, koja odgovara određenoj klimatskoj zoni.

Žuta: klimatka zona I

Zelena: klimatska zona II

Crvena: klimatska zona III

Treba skrenuti pažnju na to da se kod izvođenja mnogoslojnih fasadnih konstrukcija dobija kompozitni presek heterogenih materijala, sa različitim fizičko-mehaničkim svojstvima:

- počev od različitih koeficijenata širenja i skupljanja,
- preko različitih čvrstoća na pritisak i zatezanje,
- različito ponašanje na dejstvo ultravioletnih zraka,
- različite deformacije pri značajnim temperaturnim razlikama zidova koji se sučeljavaju pri istoj spoljnoj temperaturi vazduha, zavisno od njihove osunčanosti i boje završnog fasadnog premaza,
- različitih karakteristika starenja tokom eksploatacije svakog od kompozita posebno,
- pa sve do različitih koeficijenata vazduhopropustljivosti i paropropustljivosti.

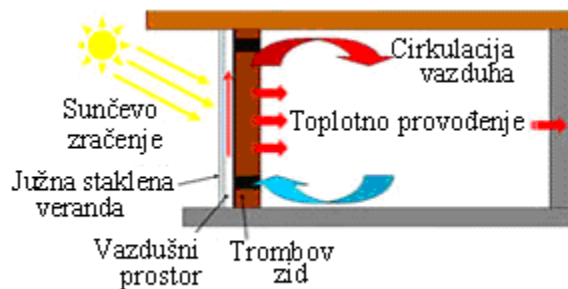
Posebno treba istaći da vazduhopropustljivost i paropropustljivost nisu samo fizičko-mehanički uslovi kvaliteta, pa i dugovečnosti fasadnih konstrukcija, nego su važni za štednju energije i stvaranje uslova za komforno stanovanje i boravak u takvim prostorima. Ukoliko u objektima nije predviđen sistem prinudne ventilacije u svim zatvorenim celinama, fasadne konstrukcije moraju posedovati dobru vazduhopropustljivost i paropropustljivost. Naime, svaki čovek troši 25-30m³ vazduha na čas i izdiše 20-30 litara ugljendioksida. Stoga, prilikom upotrebe paronepropusne i vazduhonepropusne fasadne izolacije, da bi se obezbedila dovoljna količina svežeg vazduha, neophodna je stalna ventilacija ili često provetravanje prostora, što sa sobom neizbežno povlači i znatne gubitke toplote iz objekta.

Glava 4

4 Model aktivne izolacije

U prethodnom poglavlju je dat primer pasivne izolacije. Detaljan opis mogućih kombinacija za dva načina toplotne izolacije (spoljašnja i "sendvič" zid) i opširna analiza dobijenih tabelarnih rezultata daju jasniju sliku uloge i efektivnosti termizolacionih materijala. Uočava se da vrsta i debljina termoizolacionog materijala utiče na ukupni koeficijent toplotnog provođenja i u zavisnosti od željenog efekta bira se određena vrsta i debljina termoizolacionog materijala. Međutim, nakon instalirane toplotne izolacije priča je završena. Za tu kombinaciju dobija se određena vrednost ukupnog koeficijenta prolaza toplote i moguće je menjati samo menjanjem spoja materijala.

Interesantan pristup unapređenja toplotne izolacije kuće jeste Trombov zid [7], koji je deo pasivne solarne arhitekture. Dati izum pripada francuskom inženjeru Feliks Tromba. Ovaj koncept radi na principu akumulacije sunčeve toplote i njenog emitovanja u unutrašnjost objekta u toku noći. Na osunčanoj strani objekta postavlja se zid načinjen od materijala koji može da se ponaša kao termička masa - kamen, metal, beton, opeka ili rezervoar za vodu. Sa spoljašnje strane tog masivnog zida, poput staklene fasade postavlja se dobro izolovana staklena površina, dok između ova dva zida, masivnog i staklenog, ostaje prazan vazdušni prostor. Zajedno sa ventilacionim sistemom ovaj kompletan sistem se ponaša kao veliki solarni kolektor. Tokom dana, sunce sija kroz zastakljenu površinu i zagreva masivni zid. Noću bi ovako sakupljena toplota masivnog zida bila emitovana, većinom ka spoljašnjosti objekta, ali staklena opna ovo ne dozvoljava.



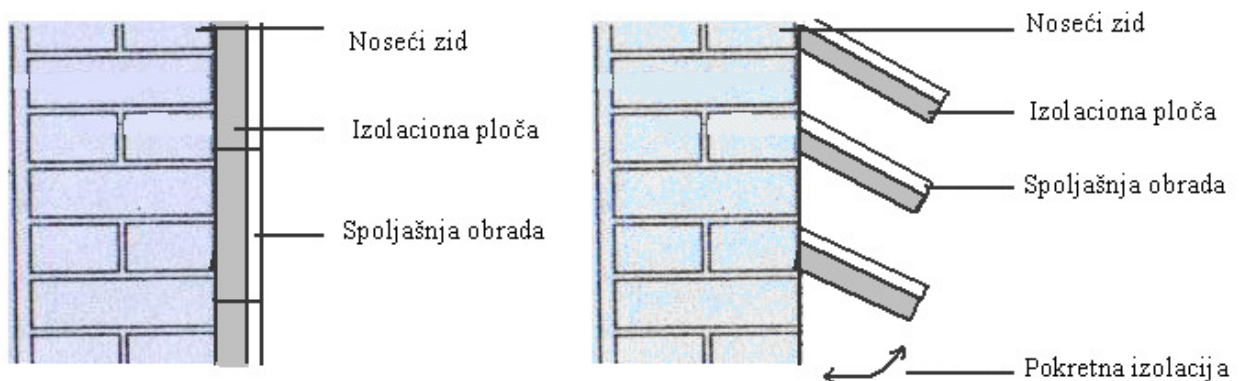
Slika 4.1. Modifikovan model Trombovog zida

Originalna ideja je danas malo modifikovana. Dodati su otvori na dno i na vrh vazdušne komore između staklenog i masivnog zida (slika 4.1.). Tako zagrejani vazduh konvekcijom ulazi u unutrašnjost objekta. Otvori imaju poklopce koji se otvaraju samo na jednu stranu pa sprečavaju konvekciju tokom noći, uspevajući da održe smer protoka jednakim. Naravno, tokom leta, kada nije poželjno zagrevanje prostora, ovi otvori ostaju zatvoreni. Ipak, ovaj dizajn i dalje ima velike gubitke toplote pa je i danas predmet brojnih istraživanja.

Neophodno je naći rešenje izolacije koja bi bila efektivna tokom letnjih vrućina, kao i tokom hladnih zima. Vodeći se modifikovanom idejom Trombovog zida, predstavice se model izolacije, gde će se moći ukupni koeficijent toplotne provodljivosti menjati po potrebi. Takva izolacija će dobiti ime: Aktivna izolacija. Aktivna izolacija predstavlja kontrolisanu, odnosno pametnu izolaciju. Ovom metodom bi se u željenom temperaturnom intervalu favorizovalo grejanje ili hlađenje.

Moguće je izvesti kontrolisanu izolaciju:

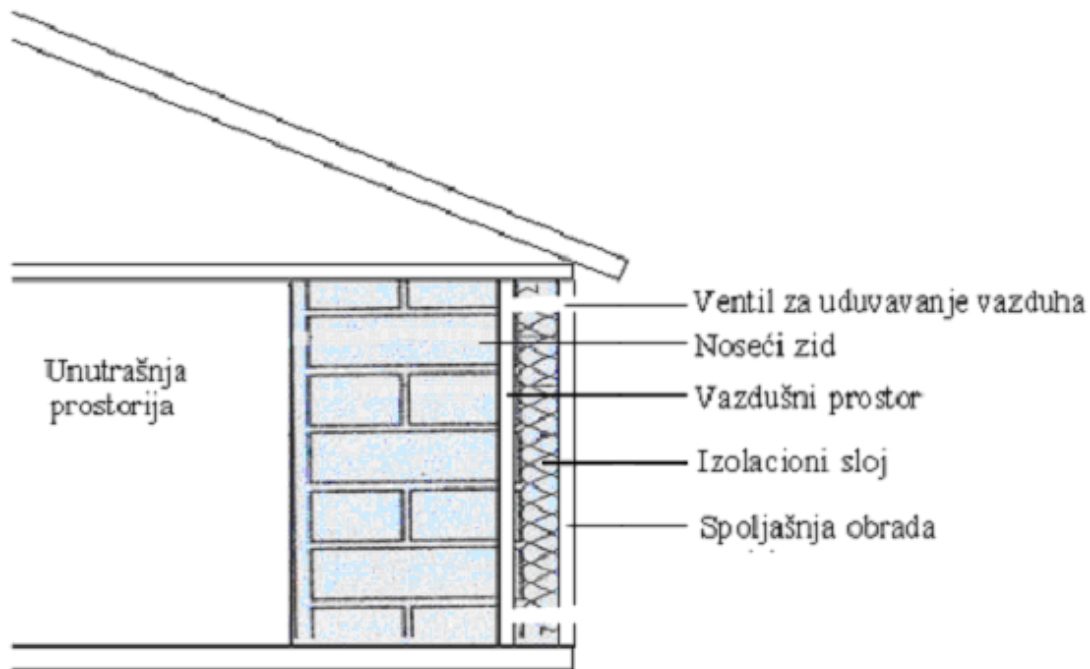
- premošćenjem
 - otklanjanjem
- Otklanjanjem termizolacionog sloja bi se menjao dati spoj materijala, i najverovatnije bi se ovim postupkom smanjio vek trajanja date konstrukcije. Izolacija se može potpuno otkloniti sa nosećeg zida ili samo privremeno u željenom vremenskom i temperaturnom intervalu (slika 4.2.). Ovakva konstrukcija zahteva poseban mehanizam za pokretanje izolacionih ploča. Koriste se specijalne višeslojne izolacione ploče, koje sadrže i spoljašnju obradu. Bez obzira na mogućnost kontrolisanja toplotne provodljivosti, ovakva izolacija i dalje spada u vrstu pasivne izolacije.



Slika 4.2. Prikaz konstrukcije spoljašnje izolacije zida sa pokretnom izolacijom

- Premošćenjem u principu premeštamo spoljašnju temperaturu na noseći (unutrašnji) zid, tj. iza izolacije, kao da se izolacija privremeno kratko spoji. Konstruisanje ovakvog zida zahteva, između nosećeg zida i spoljne izolacije, ostavljen prazan prostor. Kroz taj prostor se omogućava strujanje vazduha pomoću dva otvora koja se nalaze u podnožju i na gornjem delu zida.

Kada su dati otvori zatvoreni, dobija se svima poznata, pasivna izolacija. Kroz date otvore se uduvava vazduh u željenom temperaturnom i vremenskom intervalu, čime je omogućena cirkulacija vazduha, koja utiče na promenu temperature nosećeg zida, a samim tim i unutrašnje prostorije. Vreme potrebno da cirkulacija utiče na promenu temperature zavisi od klimatskih uslova i temperaturne razlike između nosećeg zida i okoline. Kada se dostigne željena temperatura, uduvanje vazduha se prekida, čime se ukida cirkulacija vazduha i stvara se vazdušni sloj, koji doprinosi pasivnoj izolaciji zida.



Slika 4.3. Prikaz modela izolacije sa premošćenjem

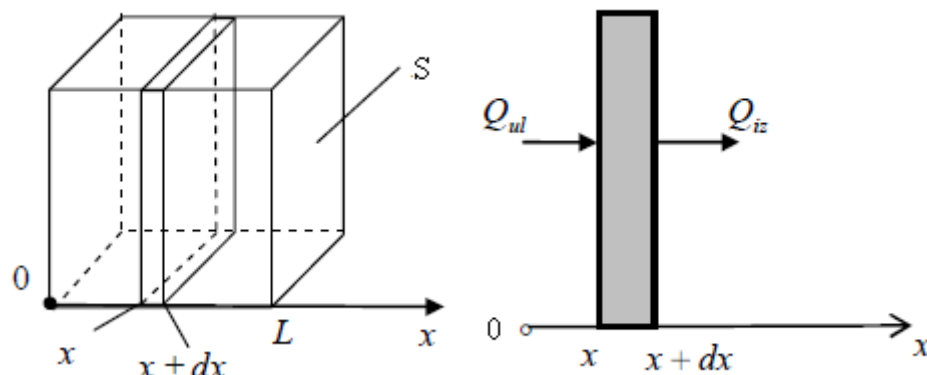
U daljem tekstu će se razmatrati samo model izolacije sa premošćenjem.

4.1. Model aktivne izolacije sa premošćenjem

Ovde se radi o nestacionarnom provođenju toplote, jer je priroda takva, da se temperatura u spoljašnjoj okolini menja sa vremenom. Zna se da je temperaturno polje određeno prostorom i vremenom, znači da temperatura ima prostornu dimenziju, što se može prikazati kao $T = f(x, y, z, t)$. Matematički modeli nestacionarnog prenosa toplote u sistemu, čijim se rešavanjem dobija temperaturno polje, imaju oblik parcijalnih diferencijalnih jednačina. Oni se mogu izvesti formulisanjem bilansa energije u zidu, čija je opšta forma data jednačinom:

$$\text{Ulaz-Izlaz+generisanje u sistemu=Akumulacija u sistemu}$$

Jednačina je data za element (deo) sistema čije su dimenzije beskonačno male u onim pravcima duž kojih se temperatura menja, a u ostalim pravcima element se prostire do granica sistema.



Slika 4.4. Prikaz toplotnog provođenja kroz ravan zid

Najjednostavniji slučaj nestacionarnog prenosa toplote je da se temperatura menja samo u jednom od pravaca koordinatnog sistema i on se naziva jednodimenzioni prenos (slika 4.4.). Radi izvođenja jednačine prenosa, sloj beskonačno male debljine dx , normalan na pravac prenosa toplote, posmatra se kao element tela. Pretpostavljajući da nema generisanja toplote i uzimajući da su fizička svojstva medijuma: gustina, tj. zapreminska masa γ [kg/m^3], specifična toplota c [$J/kg^{\circ}C$] i koeficijent toplotne provodljivosti λ [$W/m^{\circ}C$] konstantna (zanemarujemo uticaj promene temperature).

Za takav proces članovi u energetskom bilansu, posmatranog elementa čija je zapremina: $dV = Sdx$, su:

- ulazna količina toplote:

$$Q_{ul} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} S \quad (4.1)$$

- količina toplote koja prođe kroz debljinu dx :

$$Q_{iz} = Q_{ul} + dQ \quad (4.2)$$

gde je dQ promena količine toplote tokom prolaza kroz debljinu dx :

$$-dQ = d\left(-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} S\right) = -\lambda d\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right) S = -\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dx S \quad (4.3)$$

- akumulisana toplota u sistemu je data jednačinom :

$$\frac{dmc\Delta T}{\Delta t} = \gamma c \frac{\partial T}{\partial t} dV = \gamma c \frac{\partial T}{\partial t} S dx \quad (4.4)$$

Tako je energetski bilans:

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} S dx = \gamma c \frac{\partial T}{\partial t} S dx \quad (4.5.)$$

i očigledno je da se može podeliti sa $S dx$ (zapremina elementa), pa je konačna jednačina:

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \gamma c \frac{\partial T}{\partial t} \quad [W / m^3] \quad (4.6.)$$

Prethodna jednačina se može napisati na sledeći način:

$$a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad [^{\circ}C / s] \quad (4.7.)$$

gde je $a = \lambda / c\gamma$, toplotna difuzivnost.

Za dobijanje temperaturnog polja (tj. partikularnog rešenja dif. jednačine prenosa toplote) neophodni su i granični uslovi. U jednačini figuriše prvi izvod po vremenu i drugi izvod po koordinati, prema tome potrebna su dva granična uslova po prostornoj koordinati i jedan granični uslov po vremenu (početni uslov).

Početni uslovi su neophodni da bi mogli predvideti temperaturnu promenu tokom vremena u posmatranom telu. Za to je potrebno znati početno stanje, tj. početni temperaturni profil u telu (u posmatranom slučaju kroz ravan zid):

$$t = 0 \quad T(x, 0) = f(x).$$

Da bi se predvidele promene temperature u telu, neophodno je da se zna kako okolina deluje, tj. uslove na graničnoj površini tela sa okolinom. Oni su opisani grančnim uslovima. Tako, u slučaju ravnog zida, u pitanju su dve granične površine, pa se moraju definisati uslovi na granicama $x=0$ i $x=L$.

U radu se navodi nekoliko razloga zašto spoljašnja izolacija puža najkompletniju i najefikasniju izolaciju. Zbog datih razloga je odlučeno, da će se uraditi nekoliko simulacija razmatrajući model aktivne izolacije sa premošćenjem baš za tu konstrukciju. Izvrši će se niz simulacija u "prirodnim" uslovima. Spoljašnja temperatura će biti data sinusoidom, jer se temperatura u "prirodnim" uslovima može opisati kvazi sinusoidalnom funkcijom.

U daljem izlaganju će se dati kratak opis simulacije, i biće dat detaljan opis i analiza izvršenih simulacija.

4.1.1. Opis simulacije

Izvodi se niz simulacija radi dobijanja temperaturnog profila u različitim momentima i u različitim uslovima kroz ravan zid. Za račun i simulacije se koristi program MATLAB R2007b.

Prostor (unutrašnja prostorija + višeslojni zid) je podeljen na 50 pixela⁴ i uzima se da je 1 pixel = 1 cm, tj. radi se diskretizacija dužine i uzima se najmanja dužina od 1 cm. Pretpostavlja se da je ta dužina dovoljno mala i da se može zanemariti nehomogenost materijala u posmatranom deliću, tj. uzima se da su delovi homogeni. Eventualna nehomogenost se javlja na granici između piksela, ali se uzima da tu dolazi do skoka tokom prelaza. Programskom iteracijom se simuliraju vreme, gde se uzima vremenski interval od 30 min. kao vremenski korak. Jedna iteracija predstavlja temperaturu u svim tačkama u datom trenutku. Koraci iteracije su iste.

Za veću preciznost moguće je smanjiti vremenski i prostorni korak, ali to zahteva više programskog vremena i simulacija postaje dugotrajnija. Kako nas ovde interesuje prvenstveno kvalitativni efekat uticaja pojedinih faktora na promenu temperaturnog polja, ovakvi vremenski i prostorni koraci su zadovoljavajući.

Temperaturni profil kroz ravan zid dobijamo rešavanjem diferencijalne jednačine (4.7.) uz zadate početne i granične uslove. U datoj jednačini figuriše drugi izvod po koordinati i prvi izvod po vremenu. Izvod po vremenu je razlika temperature u istoj tački između dve iteracije, tj. promena temperature u jedinici vremena. Izvod po koordinati je razlika temperature u različitim tačkama, u istom trenutku, po jedinici dužine.

Rečeno je da će spoljašnja temperatura biti aproksimirana sinusoidom, sa periodom od 24h. Potrebno je da se definiše i početna temperatura i amplituda spoljašnje temperature. Temperatura na početku u svim tačkama prostora iznosi 15 °C, i uzima se da je amplituda 20 °C. Definiše se i trajanje simulacije u satima. Pogodno je uzeti duži vremenski interval trajanja simulacije od 24h, da bi se mogle uočiti trendovi nekih temperaturnih promena tokom simulacije. Ovde se uzima 96h interval.

U ovim simulacijama će se posmatrati efekat grejanja, tj. uduvavaće se vazduh (čija je temperatura veća nego temperatura unutrašnje prostorije) u vazdušni prostor. Taj topao vazduh predaje određenu količinu toplote nosećem zidu, gde se ona dalje prenosi provođenjem do unutrašnje prostorije. Znači premostiće se spoljašnja temperatura na noseći zid i posmatraće se promena unutrašnje temperature u odnosu na spoljašnje temperaturne promene. Biće dat i primer simulacija, gde se vrši efekat hlađenja, da bi se dokazalo da se dati model izolacije može primeniti u oba slučaja.

Za svaku simulaciju se posebno određuje broj kombinacija materijala, tj. broj slojeva u datoj konstrukciji, kao i debljine tih slojeva. Takođe se zadaje i toplotna difuzivnost svakog sloja.

⁴ U ovoj simulaciji pixel predstavlja izotermnu ploču debljine dx.

Rečeno je da se na kraju simulacije dobija temperaturna promena unutrašnje prostorije u odnosu na spoljašnje temperaturne promene. Grafički prikaz date promene omogućava da se jasno vidi efekat zagrevanja unutrašnje prostorije, i može se posmatrati kako se menja temperatura kroz zid u odnosu na spoljašnje temperaturne promene.

4.1.2. Simulacije i analiza simulacija

U daljem izlaganju će se uraditi simulacija za neizolovan zid i nekoliko simulacija za konstrukciju sa spoljašnjom izolacijom. Razmotriće se uticaj izolacije, uticaj vrste i debljine izolacionog sloja kao i uticaj debljine zida na temperaturu unutrašnje prostorije.

4.1.2.1. Neizolovan zid

Upoređene su tri kombinacije neizolovanog zida i analizirana je sposobnost provođenja toplote tih zidova.

Biće prikazane i detaljno razmatrane tri karakteristična vremenska trenutka jedne simulacije, da bi se lakše razumele simulacije. Posmatraće se temperaturne promene kroz zid za te slučajeve. Analiziraće se ta promena kada spoljašnja temperatura dostiže maksimum, kada se poklapa sa početnom temperaturom i kada ima minimum. Slikoviti prikazi spomenutih slučajeva će biti dati na slikama 4.5., 4.6., 4.7..

Ovako detaljan opis neće se dati kod ostalih simulacija (zato što je analiza slična), ali se ista analiza može uraditi kod svake simulacije.

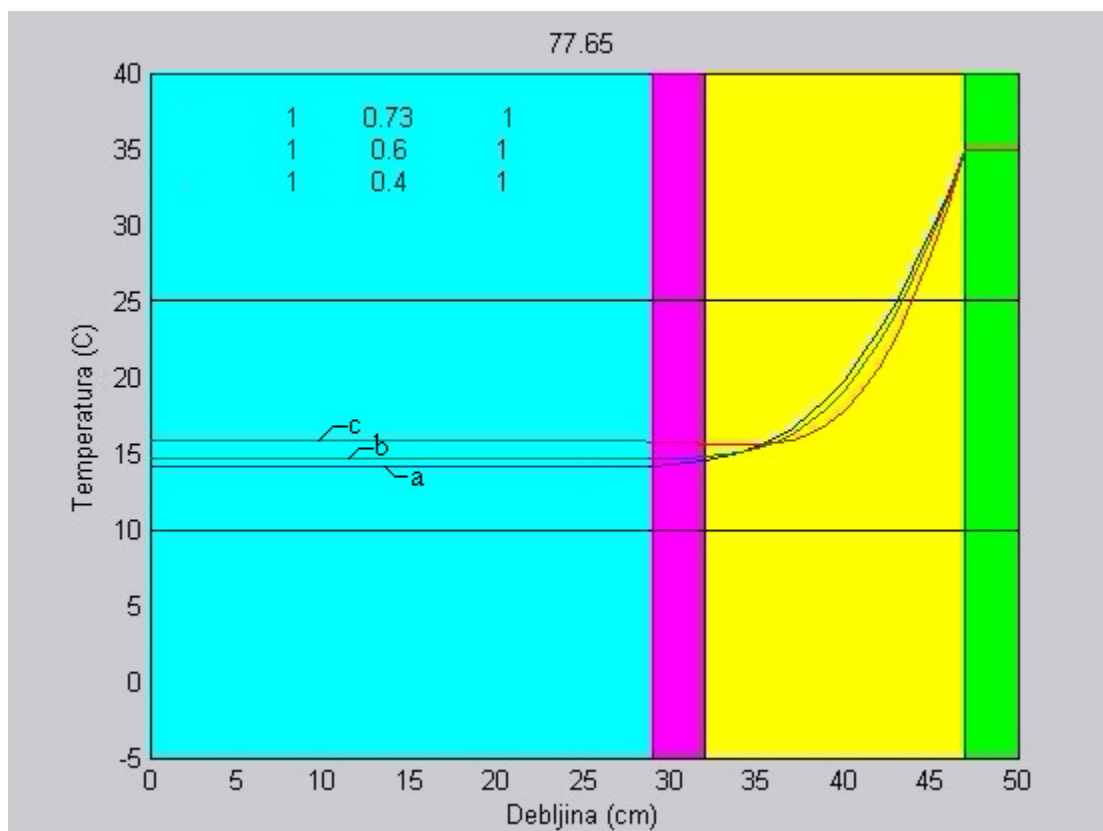
Na slici 4.5. je dat prikaz ravnog homogenog višeslojnog zida. Upoređuju se tri kombinacije, poređani jedan ispod drugog, što je uočljivo na datom prikazu jer je prostor podeljen sa dvema vodoravnim crtama na tri dela, gde svaki deo predstavlja jednu kombinaciju. Slojevi u kombinacijama su označeni različitim bojama, i oni ustvari prikazuju apsolutni raspored slojeva i debljinu istih na datom prikazu. Može se primetiti jedinstven koordinatni sistem na prikazu. Vidi se da je temperaturna skala ista za sva tri dela, tj. postoje tri kombinacije ravnog zida, ali samo jedna temperaturna skala. Temperaturni profil kroz ravan zid za datu kombinaciju je označen krivom određene boje. Prema tome, postoje tri krive, jer se prikazuju tri kombinacije. Zbog mogućnosti promene debljine i vrste slojeva u kombinaciji, prostor se ispunjava vazduhom (taj deo označava unutrašnju prostoriju i na prikazu je označen plavom bojom), gde se uzima da je temperatura vazduha u svakom trenutku jednaka temperaturi unutrašnjeg zida. Na prikazu se vidi i relativna difuzivnost datih slojeva, i to po redosledu koji odgovara datom sloju u datoj kombinaciji.

Pri svakoj simulaciji se definiše broj slojeva u datom spoju, kao i debljine slojeva i njihova toplotna difuzivnost. U ovom slučaju se razmatra neizolovan zid, gde se date kombinacije sastoje od dva sloja krečnog maltera (spoljašnja fasadna obrada i unutrašnja obrada zida) i nosećeg zida. Upoređuju se noseći zidovi od pune opeke, šuplje opeke i giter bloka ([snimak 1](#)). Toplotna difuzivnost i relativna difuzivnost materijala korišćenih u simulacijama je dat u Tabeli 10.

Tabela 10. Toplotna difuzivnost i relativna difuzivnost materijala koji se koriste u simulacijama.

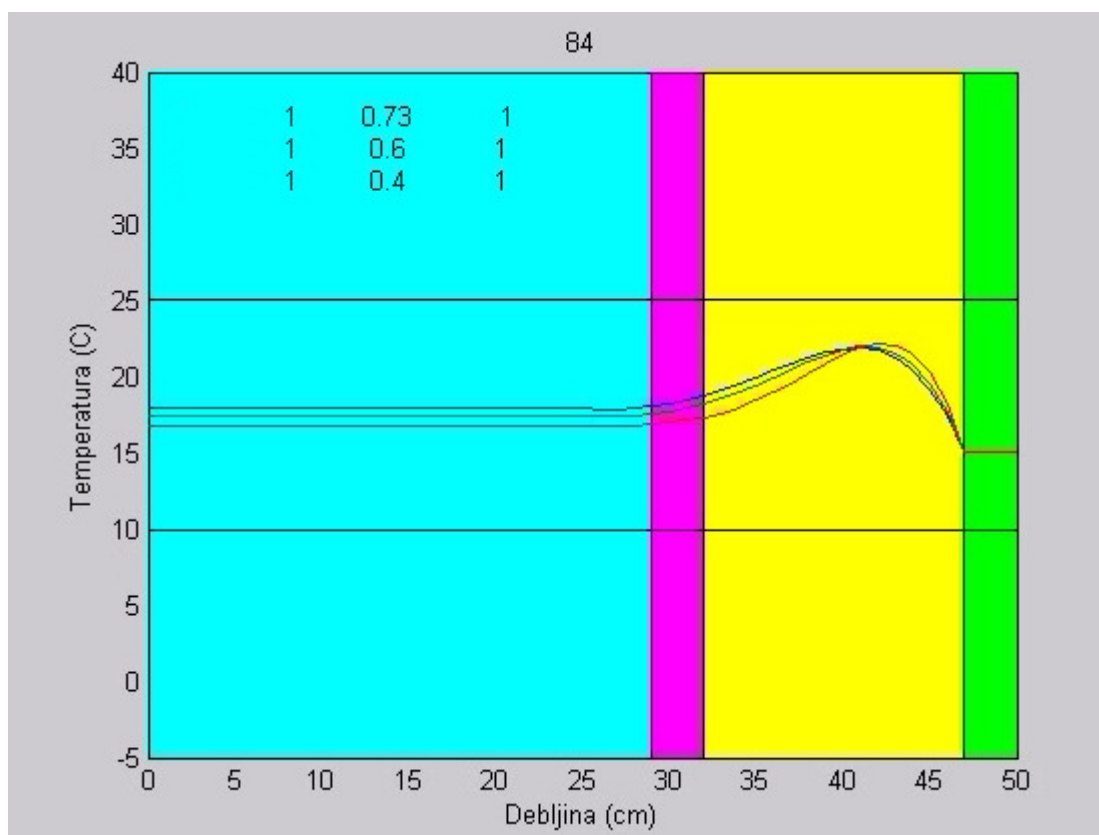
Materijal	Koeficijent toplotne provodljivosti λ [$W / m^0 C$]	Zapreminska masa γ [kg / m^3]	Specifična toplota c [$J / kg^0 C$]	Toplotna difuzivnost $a = \frac{\lambda}{c\gamma}$ [$10^{-7} m^2 / s$]	Relativna difuzivnost
Krečni malter	0,85	1700	1050	4,76	1
Puna opeka	0,61	1900	920	3,49	0,73
Šuplja opeka	0,42	1600	920	2,85	0,60
Giter blok	0,22	1200	920	1,99	0,42
Durisol	0,25	800	2010	1,55	0,33
Saćaste plastične mase	0,06	120	1400	3,57	0,75
Ploče od trske	0,05	800	1260	0,50	0,10
Ploče od plute	0,04	200	1670	1,20	0,25

Relativna difuzivnost materijala koji figurišu u datoj kombinaciji je prikazan na slici 4.5. 1 odgovara krečnom malteru, 0.73 punoj opeci, 0.6 šupljoj opeci, a 0.4 giter bloku.



Slika 4.5. Prikaz temperaturnog profila kroz ravan zid u trenutku kada je spoljašnja temperatura maksimalna. Dat je primer tri kombinacije, gde je debljina slojeva krečnog maltera 3 cm, a nosećeg zida 15 cm. Slojevi krečnog maltera su označene ljubičastom i zelenom bojom, noseći zid žutom a vazduh u unutrašnjoj prostoriji plavom bojom.

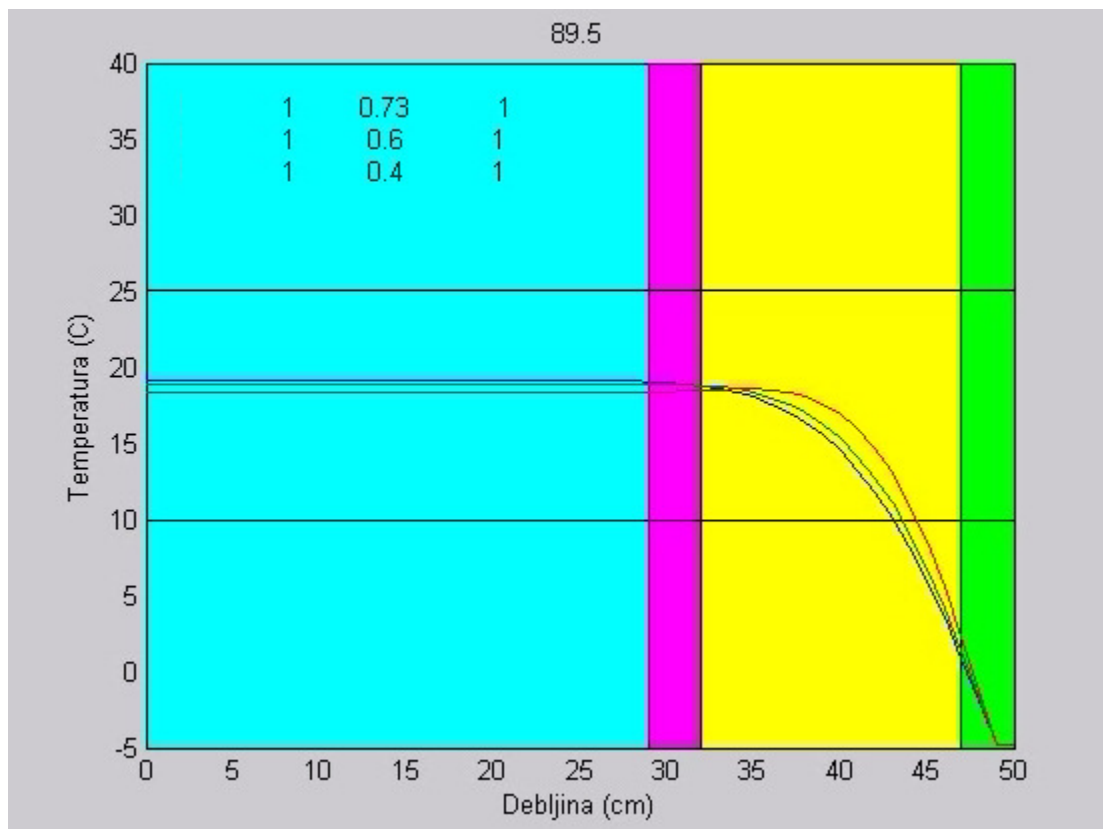
Na slici 4.5. je data raspodela temperature u zidu na kraju četvrtog dana i to trenutak kada je spoljašnja temperatura 35°C , tj. maksimalna moguća po uslovima simulacije. Ta temperatura se metodom premošćenja dovodi na noseći zid. Toplota se kroz noseći zid prenosi provođenjem. Posmatrajući sliku vidi se kakav je temperaturni profil kroz zid. Kriva c (označena je crvenom bojom) prikazuje temperaturni profil za kombinaciju sa materijalom nosećeg zida sa najmanjom vrednošću koeficijenta toplotne difuzivnosti (giter blok) tj. ona ima najbolje izolacione osobine. Kriva a prikazuje temperaturni profil za spoj sa materijalom nosećeg zida sa najvećom vrednošću koeficijenta toplotne difuzivnosti (puna opeka), dok kriva b prikazuje temperaturni profil za treću kombinaciju (šuplja opeka). Spoljašnja strana zida je na većoj temperaturi od unutrašnje strane, međutim uočava se da je temperatura zida veća nego unutrašnje prostorije. Posmatrajući koeficijent toplotne difuzivnosti i temperaturni profil, uočavamo da što je taj koeficijent veći, temperaturna funkcija kroz zid ima blaži pad.



Slika 4.6. Prikaz temperaturnog profila kroz ravan zid u slučaju kada se spoljašnja temperatura poklapa sa početnom

Kada se spoljašnja temperatura poklapa sa početnom, temperatura spoljašnje strane nosećeg zida je manja, nego u zidu. Uočava se pik skoro na polovini zida, razlika između maksimuma temperaturne funkcije u zidu, u datom trenutku i spoljašnje temperature je oko 8°C . Prema tome, došlo je do akumulacije toplote. Ta akumulisana toplota se kroz zid prenosi provođenjem. Temperatura unutrašnje prostorije je sad viša nego u prethodnom slučaju. Primećuje se znatna razlika temperature, upoređujući slike 4.5. i 4.6., kod sve tri kombinacije. Vidi se, da se prostorija u slučaju kombinacije sa

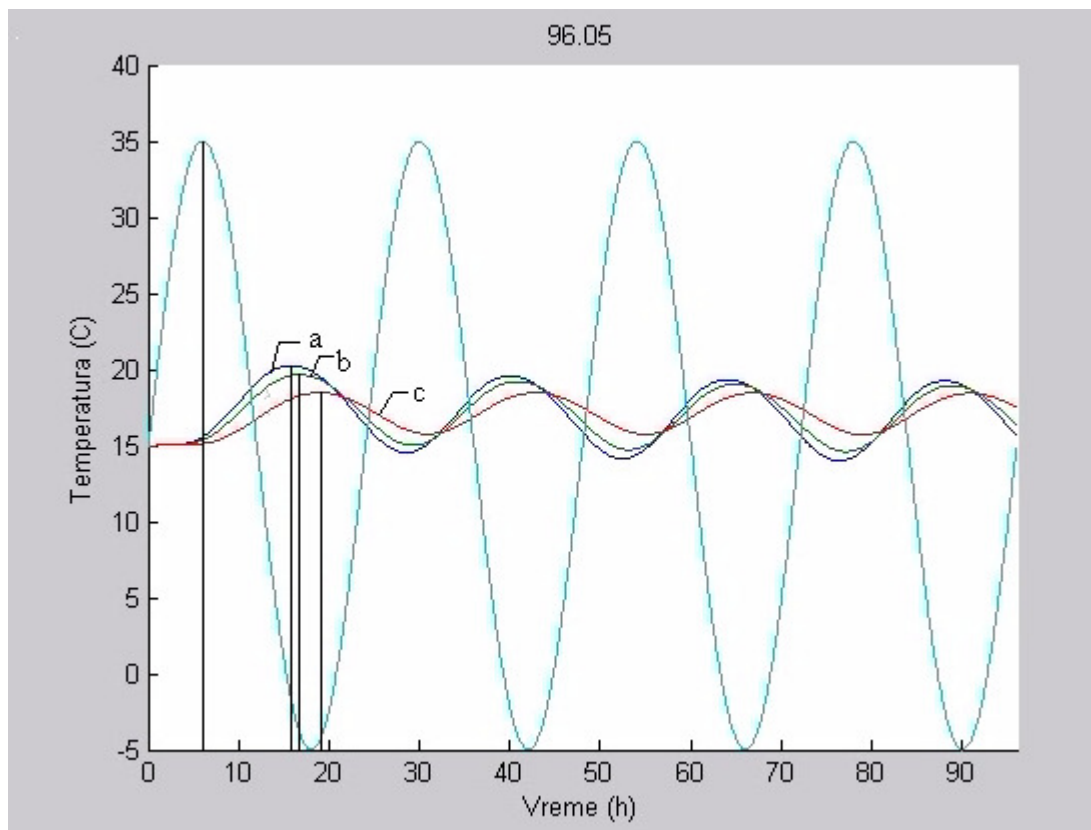
materijalom nosećeg zida čija je toplotna difuzivnost najveća, najviše zagrejala. Materijal koji ima najbolje izolacione osobine, pruža otpor prolazu toplote i zbog toga u tom slučaju i temperatura unutrašnje prostorije najmanje odstupa od početne.



Slika 4.7. Prikaz temperaturnog profila kroz ravan zid u slučaju kada spoljašnja temperatura dostiže minimum

U simulacijama se razmatra slučaj kada se vazduh (sa višom temperaturom od temperature unutrašnje prostorije) uduvava u vazdušni prostor i posmatra se efekat grejanja. U simulacijama je uzeto da, kada spoljašnja temperatura padne ispod zadate početne, uduvavanje vazduha se prekida. U praksi bi se moglo to izvesti tako, da kada spoljašnja temperatura padne ispod temperature unutrašnje prostorije, prekine se uduvavanje vazduha. Primećuje se da je temperatura spoljašnjeg dela zida veća nego spoljašnja temperatura. Temperaturna funkcija blago raste skoro do polovine zida, gde se kriva zakrivljuje. Materijal nosećeg zida koji ima najbolje izolacione osobine, pruža najveći otpor "odlaženju" toplote iz unutrašnje prostorije. Ta kriva je na slici 4.7. označena crvenom bojom i uočava se da je za taj materijal temperatura u zidu najveća. Korsteći materijale koji dopro provode toplotu, unutrašnja prostorija se lakše i više zagreje (na slici su te krive označene plavom i zelenom bojom). Međutim pošto se toplota u oba smera isto provodi, u slučaju kada je spoljašnja temperatura niža od unutrašnje, ove prostorije će se i najlakše razhladiti, što u ovim razmatranjima nije cilj.

Na slici 4.8. je dat grafički prikaz temperaturne promene unutrašnje prostorije u odnosu na spoljašnje temperaturne promene kroz neizolovan zid.

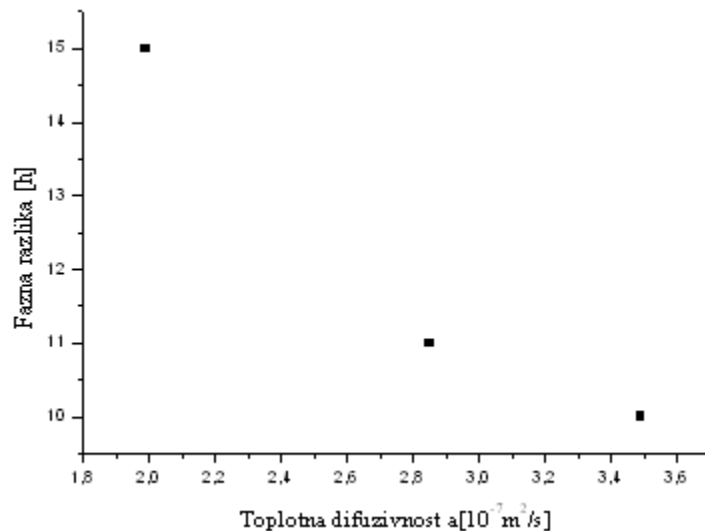


Slika 4.8. Temperaturna promena unutrašnje prostorije u odnosu na spoljašnje temperaturne promene kroz neizolovan zid

Na datom prikazu se vide četiri periode, koje prikazuju temperaturne promene u 96h vremenskom intervalu. Spoljašnja temperaturna promena je označena svetloplavom bojom.

Uočava se, da je fazna razlika između maksimuma spoljašnje temperature i maksimuma unutrašnje temperature, posmatrajući zid sa najvećom vrednošću toplotne difuzivnosti (na grafiku je označeno tamnoplavom bojom, ili zbog lakšeg uočavanja slovom a), približno 10h. Drugim rečima, maksimum unutrašnje temperature kasni 10h u odnosu na maksimum spoljašnje temperature. Posmatrajući zid od materijala srednjeg toplotnog provođenja (zid od šuplje opeke-na grafiku je označena zelenom bojom, kriva b), primećuje se da i tu postoji fazna razlika između maksimuma spoljašnje temperature i maksimuma temperature unutrašnje prostorije u iznosu od 11h, dok je kod kombinacije sa nosećim zidom od materijala sa najboljim izolacionim osobinama (zid od giter blokova-na grafiku je označeno crvenom bojom, kriva c) fazna razlika 15 h. Može se primetiti, da se fazna razlika menja u funkciji toplotne difuzivnosti (slika 4.9.). Sa slike se vidi, da fazna razlika opada sa povećanjem toplotne difuzivnosti

Amplituda oscilacije unutrašnje temperature koristeći kombinaciju sa punom opekom dostiže vrednost od 3°C , i ne menja se. U kombinaciji sa šupljom opekom amplituda oscilacije unutrašnje temperature je približno $2,5^{\circ}\text{C}$, dok koristeći spoj sa giter blokom ona dostiže vrednost od $1,5^{\circ}\text{C}$. I u ovim slučajima je amplituda oscilacije stalna.



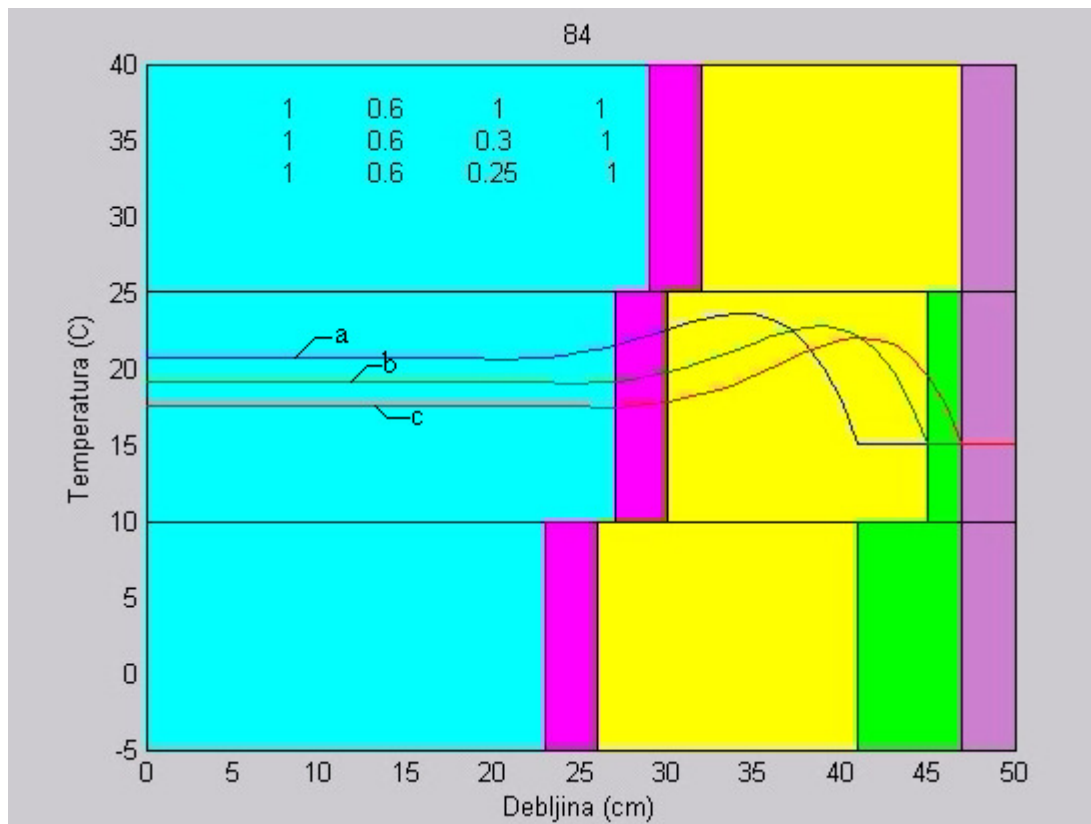
Sika 4.9. Funkcionalna zavisnost fazne razlike između maksimuma spoljašnje temperature i maksimuma unutrašnje temperature i toplotne difuzivnosti materijala korišćenih u datoj kombinaciji

Primećuje se da je amplituda oscilacije unutrašnje temperature najveća u slučaju korišćenja kombinacije sa nosećim zidom od materijala čija je toplotna difuzivnost najveća. Uočava se da ona opada sa opadanjem toplotne difuzivnosti. Zbog razloga da nijedna kombinacija nije dovela do značajnije promene srednje temperature unutrašnje prostorije, u daljim simulacijama će se koristiti spojevi sa nosećim zidom od šuplje opeke. Račun dobijen prilikom razmatranja pasivne izolacije pokazuje prednosti šuplje opeke, a dato je i opširnije objašnjenje prednosti korišćenja ove opeke, koje se ovde neće posebno navoditi.

4.1.2.2. Uticaj izolacije

Izvrši će se simulacija upoređujući neizolovan, loše i dobro izolovan zid, i posmatraće se uticaj izolacije na temperaturu unutrašnje prostorije ([snimak 2](#)). Prva kombinacija se sastoji od dva sloja krečnog maltera i nosećeg zida od šuplje opeke. U drugom spoju figurišu dva sloja krečnog maltera, noseći zid od šuplje opeke i termoizolacioni sloj od durisola, dok treća kombinacija sadrži iste slojeve kao i druga, samo što se kao termoizolacioni materijal koristi pluta. Toplotna difuzivnost i relativna difuzivnost ovih materijala je dat u Tabeli 10.

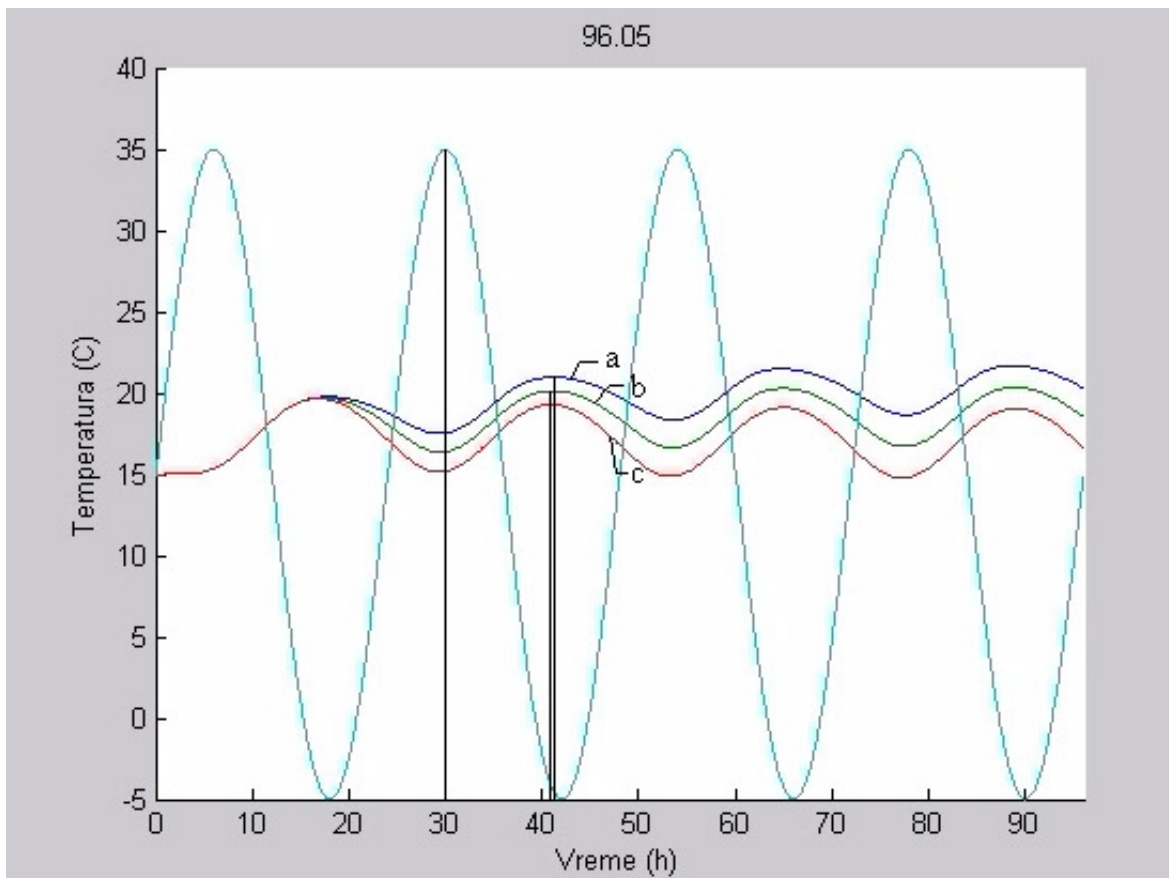
Na slici 4.10. je prikazan temperaturni profil za date kombinacije u određenom trenutku. Relativna difuzivnost ovih materijala se takođe vidi na datom prikazu. 1 odgovara krečnom malteru, 0.6 šupljoj opeci, 0.3 durisolu, a 0.25 pluti.



Slika 4.10. Prikaz temperaturnog profila kroz ravan zid. Dat je primer tri kombinacije. Debljina slojeva krećnog maltera je 3 cm (označeni su ljubičastom i rožom bojom), dok je debljina nosećeg zida (žuta boja) 15 cm. Druge dve kombinacije sadrže i termoizolacioni sloj (zelena boja) debljine 2 cm (temperaturni profil za ovu kombinaciju je označen krivom b) i 6 cm (temperaturni profil za ovaj spoj je označen krivom a).

Sa slike 4.10. se uočava da koristeći termoizolacioni materijal dostižu se veće vrednosti temperature unutrašnje prostorije, nego u slučaju neizolovanog zida. Primećuje se da izolacioni materijal, sa najmanjom vrednošću koeficijenta toplotne difuzivnosti (kriva a), pruža najveći otpor "odlaženju" toplote iz unutrašnje prostorije. Vidi se, da se za ovu kombinaciju dostiže najviša vrednost temperature unutrašnje prostorije. Za kombinaciju sa termoizolacionim slojem od materijala sa većom vrednošću koeficijenta toplotne difuzivnosti (kriva b) dobija se niža vrednost temperature unutrašnje prostorije, dok se najniža vrednost dobija za neizolovan zid (kriva c). Rečeno je da koristeći aktivnu izolaciju u željenim vremenskim i temperaturnim intervalima, uduvavajući vazduh (sa većom temperaturom nego temperatura unutrašnje prostorije, tj. topao vazduh) u vazdušni prostor, nosećem zidu se predaje određena količina toplote, koji se provođenjem dovodi do unutrašnje prostorije. Kao i kod drugih simulacija, kada se spoljašnja temperatura smanji ispod zadate početne temperature, cirkulacija vazduha se prekida, tj. uduvavanje vazduha se ukida, a termoizolacija nam služi da spreči da ta dovedena toplota napusti dati spoj.

Grafički prikaz promene temperature unutrašnje prostorije u odnosu na spoljašnje temperaturne promene za ove kombinacije dat je na slici 4.11..



Slika 4.11. Promena temperature unutrašnje prostorije za date kombinacije

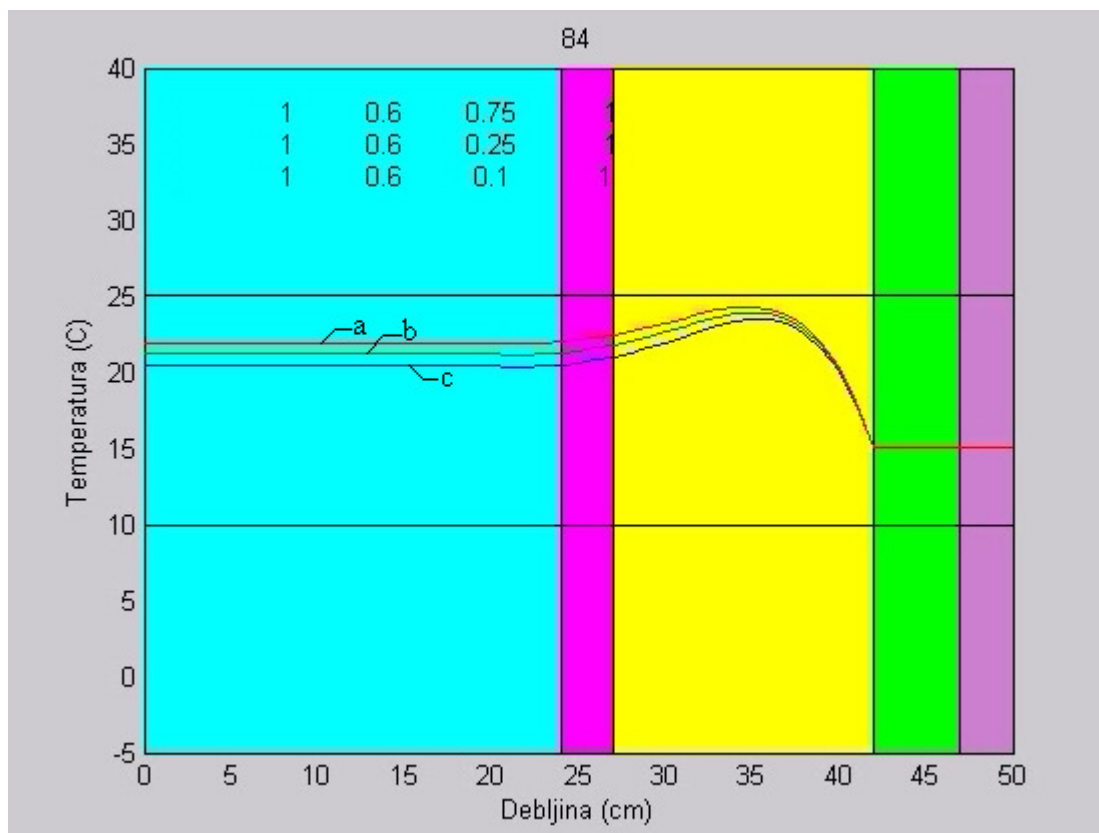
Temperaturna promena neizolovanog zida je na grafičkom prikazu označena crvenom bojom (kriva c). Koristeći izolaciju uočava se da je temperatura unutrašnje prostorije veća nego posmatrajući neizolovan zid. Najviša temperatura se postiže koristeći dobar termoizolacioni materijal, tj. materijal čija je toplotna provodljivost mala. Na slici je tamnoplavom bojom (kriva a) prikazana temperaturna promena unutrašnje prostorije za kombinaciju sa dobrim izolacionim materijalom.

Primećuje se fazna razlika između maksimuma spoljašnje temperature i maksimuma unutrašnje temperature oko 11h za te kombinacije. Prema tome može se zaključiti, da fazna razlika ne zavisi od izolacije, tj. postavljanjem izolacionog sloja dobija se skoro ista fazna razlika kao i u slučaju neizolovanog zida.

Amplituda oscilovanja unutrašnje temperature za kombinaciju materijala sa dobrim izolacionim slojem je oko $1,75^{\circ}\text{C}$ i opada. Funkcija ima tendenciju rasta, tj. temperatura unutrašnje prostorije se povećava. U slučaju spoja materijala sa izolacionim slojem, koji ima veću toplotnu difuzivnost, amplituda oscilovanja unutrašnje temperature iznosi isto $1,75^{\circ}\text{C}$ i opada. Funkcija tendenciozno raste i u ovom slučaju. Amplituda oscilovanja unutrašnje temperature je najveća u slučaju neizolovanog zida i iznosi oko 2°C . Temperatura unutrašnje prostorije osciluje oko neke srednje temperature, ali se ne povećava sa vremenom.

4.1.2.3. Uticaj vrste izolacionog materijala

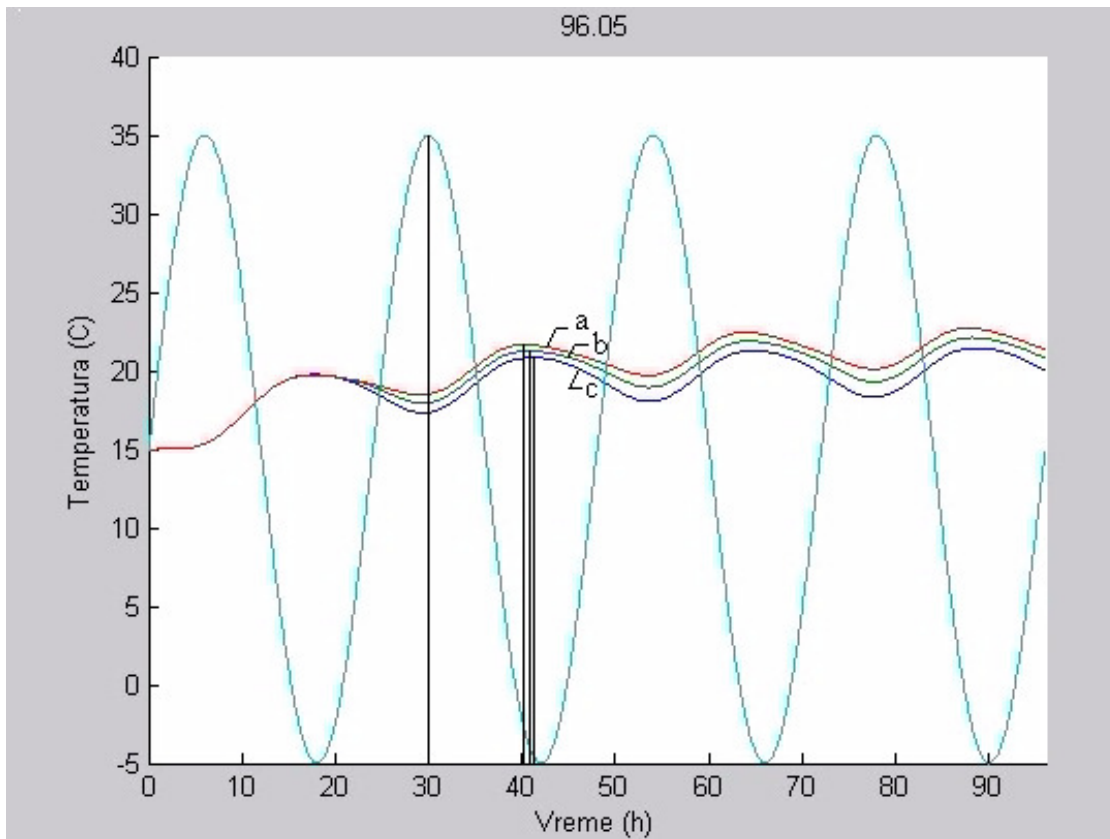
Posmatraće se uticaj vrste termoizolacionog materijala na promenu unutrašnje temperature, jer se može zaključiti iz prethodne simulacije da, korišćenjem izolacije dobija se veća unutrašnja temperatura. Uporediće se tri kombinacije ([snimak 3](#)). Prva kombinacija se sastoji od dva sloja krečnog maltera, nosećeg zida od šuplje opeke i termoizolacionog sloja od saćaste plastične mase. Druge dve kombinacije se razlikuju od ove samo po vrsti termoizolacionog sloja. U drugoj kombinaciji se koristi pluta, a u trećem spoju trska kao izolacioni materijal. Toplotna difuzivnost i relativna difuzivnost ovih materijala je dat u Tabeli 10, a poslednja se može uočiti i na slici 4.12.. I u ovom slučaju 1 odgovara krečnom malteru, 0.6 šupljoj opeci, 0.75 saćastoj plastičnoj masi, 0.25 pluti, a 0.1 trski.



Slika 4.12. Prikaz temperaturnog profila kroz ravan zid. Dat je primer tri kombinacije. Svaka kombinacija sadrži dva sloja krečnog maltera debljine 3 cm (označeni su ljubičastom i rozom bojom), noseći zid od šuplje opeke (žuta boja) debljine 15 cm i termoizolacioni sloj (zeleno boja) debljine 6cm.

Sa slike 4.12. se vidi da se najviša unutrašnja temperatura postiže koristeći materijal sa najboljim izolacionim osobinama. Najbolju izolaciju pruža materijal koji ima najmanju toplotnu difuzivnost. Na prikazu je ta promena temperature prikazana krivom crvene boje (kriva a). Termoizolacioni materijal sa najvećom vrednošću toplotne difuzivnosti najbolje provodi toplotu i pokazuje se u simulaciji da se za tu kombinaciju dobija najmanja vrednost temperature unutrašnje prostorije (kriva c).

Temperaturna promena unutrašnje prostorije u odnosu na spoljašnju temperaturnu promenu je data na slici 4.13.. Svakoј kombinaciji odgovara jedna kriva i na grafičkom prikazu se uočavaju tri krive za tri kombinacije koje se upoređuju.



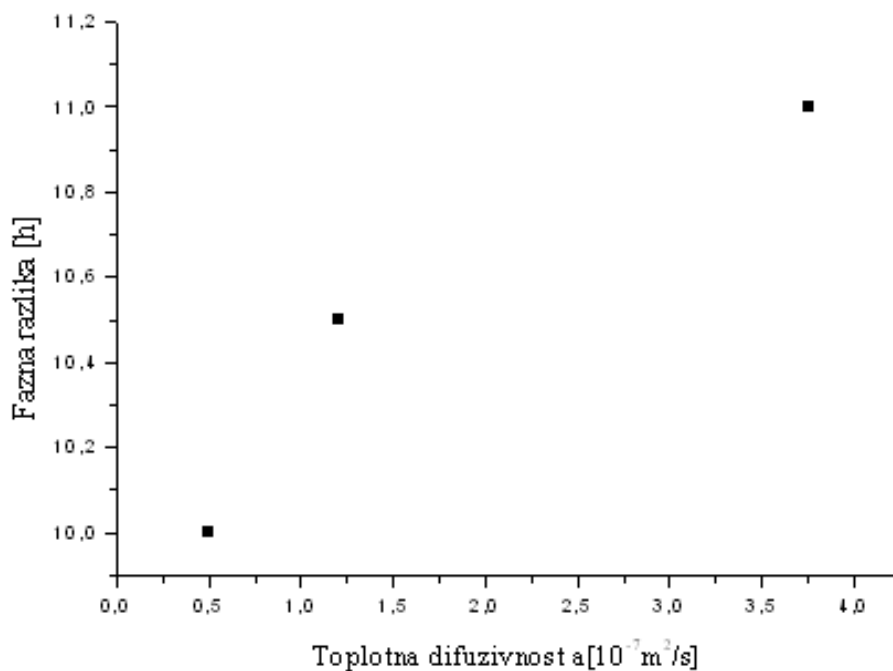
Slika 4.13. Temperaturna promena unutrašnje prostorije u odnosu na spoljašnje temperaturne promene, posmatrajući uticaj vrste izolacionog materijala na date promene.

Uočava se, da koristeći termoizolacioni materijal sa najboljim izolacionim svojstvima, dobija se najviša unutrašnja temperatura. Temperaturna promena unutrašnje prostorije za tu kombinaciju je označena crvenom bojom (kriva a) na grafičkom prikazu. Temperatura do koje se može zagrejati unutrašnja prostorija, za dati interval vremena, je sve niža, što su izolacione osobine termoizolacionih materijala sve slabije. To se jasno vidi na slici 4.13.. Zelenom bojom (kriva b) je prikazana unutrašnja temperaturna promena za spoj sa termoizolacionim slojem od materijala čija je vrednost toplotne difuzivnosti veća, dok tamnoplavom bojom (kriva c) kombinacija sa termoizolacionim slojem od materijala sa najvećom vrednošću toplotne difuzivnosti.

Fazna razlika između maksimuma spoljašnje temperature i maksimuma unutrašnje temperature iznosi oko 10h. Tačnije za kombinaciju sa najboljim izolacionim materijalom fazna razlika je 10h, za kombinaciju sa zaštitinim slojem od materijala srednjih izolacionih osobina iznosi 10,5h, dok za spoj materijala sa najslabijim izolacionim svojstvima ta fazna razlika je 11h.

Uočava se, da je amplituda oscilacije unutrašnje temperature oko $1,7^{\circ}\text{C}$ za krivu a i b, dok za krivu c ona iznosi oko $1,9^{\circ}\text{C}$ i u opada za sve tri kombinacije. Temperaturna funkcija kroz izolovan zid ima tendenciju rasta, što znači da se temperatura unutrašnje prostorije povećava sa vremenom kod sve tri kombinacije.

Takođe je uočljivo da se fazna razlika menja u funkciji toplotne difuzivnosti (slika 4.14.). Sa povećanjem toplotne difuzivnosti i fazna razlika se povećava.



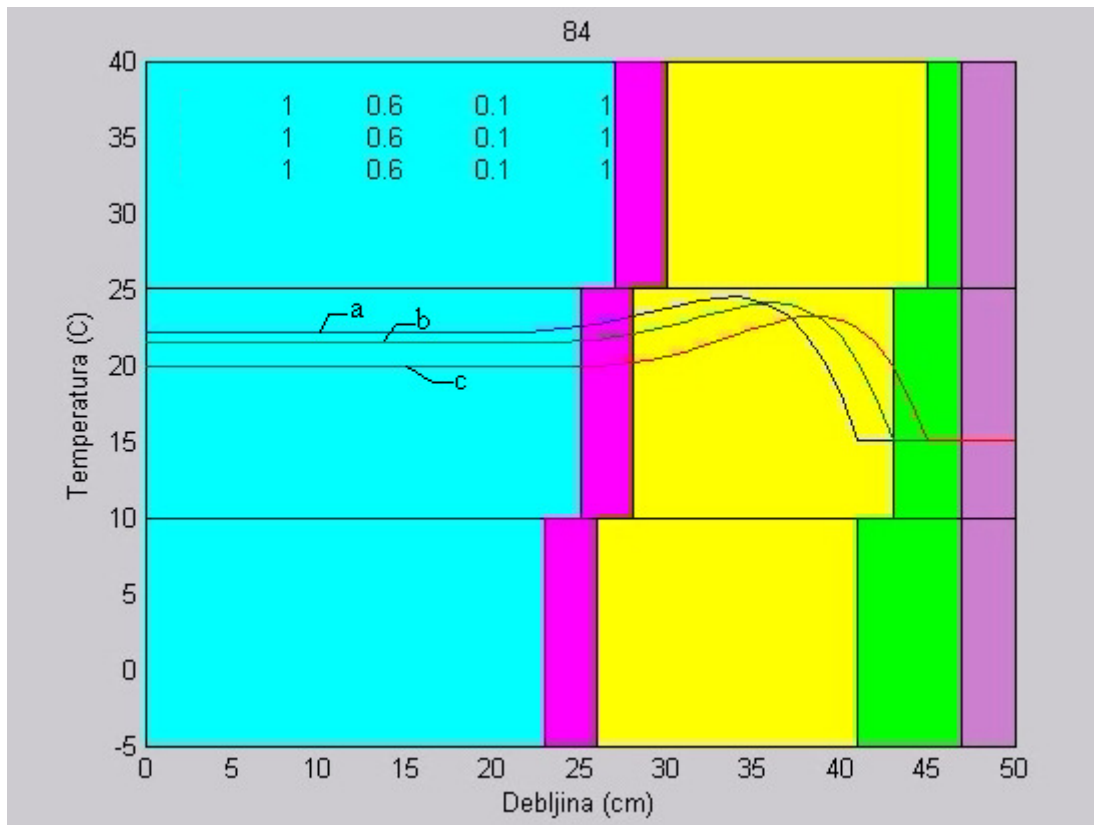
Slika 4.14. Funkcionalna zavisnost fazne razlike između maksimuma spoljašnje temperature i maksimuma unutrašnje temperature i toplotne difuzivnosti materijala korišćenih u datoj kombinaciji.

Iz ove simulacije se primećuje da se najviša temperatura unutrašnje prostorije dobija korišćenjem termoizolacione materijale sa dobrim izolacionim osobinama. Prema tome, vidi se da vrsta termoizolacionih materijala ima uticaj na kranji efekat zagrevanja unutrašnje prostorije. Za dat primer kombinacija sa različitim termoizolacionim materijalima zaključuje se da je najbolje rezultate davala kombinacija sa pločama od trske.

4.1.2.4. Uticaj debljine izolacionog materijala

Uradiće se simulacija posmatrajući uticaj debljine termoizolacionog sloja na temperaturne promene unutrašnje prostorije kroz izolovan zid ([snimak 4](#)). Uzeće se kombinacija koja je dala najbolje rezultate u prethodnoj simulaciji, tj. spoj sa termoizolacionim materijalom od trske. Kombinacija sadrži dva sloja krečnog maltera, noseći zid od šuplje opeke i sloj termoizolacionog materijala. Toplotna difuzivnost i relativna difuzivnost ovih materijala je dat u Tabeli 10. Na slici 4.15. se takođe uočava

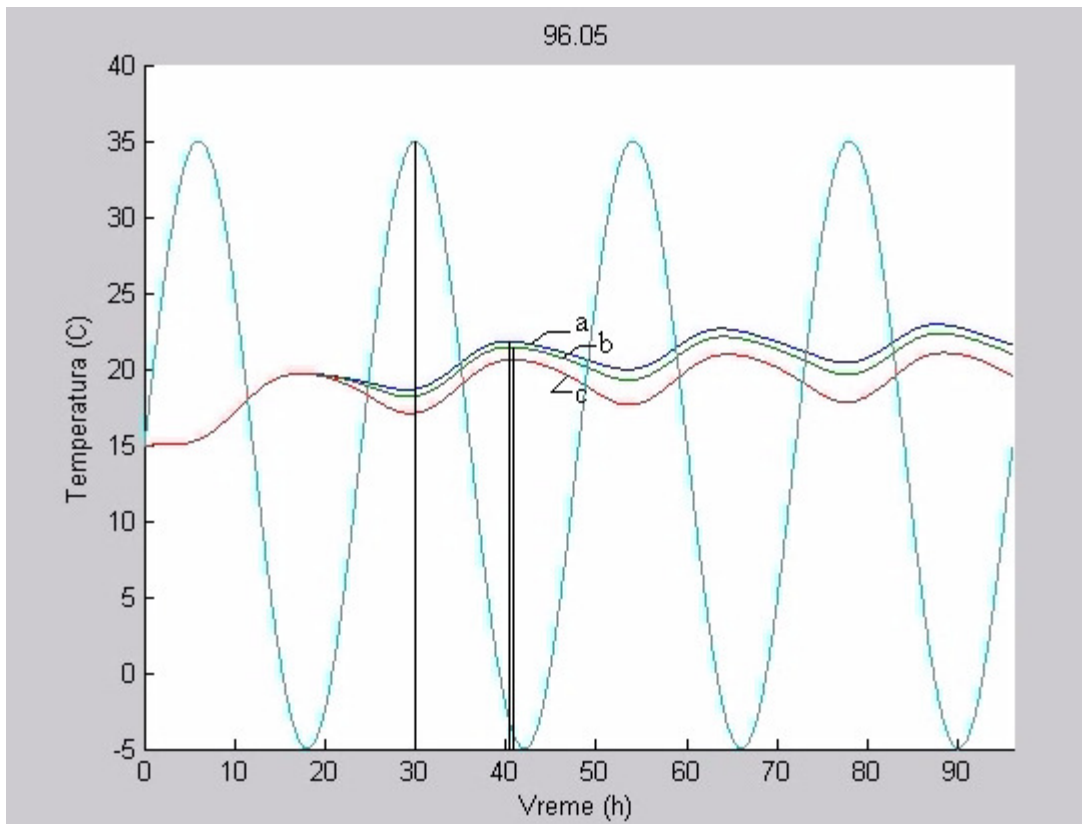
relativna difuzivnost materijala koji figurišu u kombinaciji. 1 odgovara krečnom malteru, 0.6 šupljoj opeci , 0.1 termoizolacionom materijalu od trske.



Slika 4.15. Prikaz temperaturnog profila kroz ravan zid. Dat je primer tri kombinacije. Svaka kombinacija sadrži dva sloja krečnog maltera debljine 3 cm (označeni su ljubičastom i rozom bojom), noseći zid od šuplje opeke (žuta boja) debljine 15 cm i termoizolacioni sloj (zelena boja). Debljina termoizolacionog sloja se menja. U prvoj kombinaciji iznosi 2 cm, u drugoj 4 cm, a u trećoj 6 cm.

Sa slike 4.15. se jasno vidi uticaj debljine termoizolacionog sloja. Uočava se da u slučaju kada je debljina sloja 6 cm (kriva a), pruža se najveći otpor "odlaženju" toplote. Za taj slučaj se dobija najviša unutrašnja temperatura. Sa krivom b je označena temperaturna promena kroz spoj materijala sa termoizolacionim slojem debljine 4 cm, dok krivom c kombinacija sa termoizolacionim slojem debljine 2 cm. Primećuje se jasna razlika i između temperaturnih promena unutar zida datih kombinacija.

Na slici 4.16. je dat grafički prikaz promene unutrašnje temperature u odnosu na spoljašnje temperaturne promene.



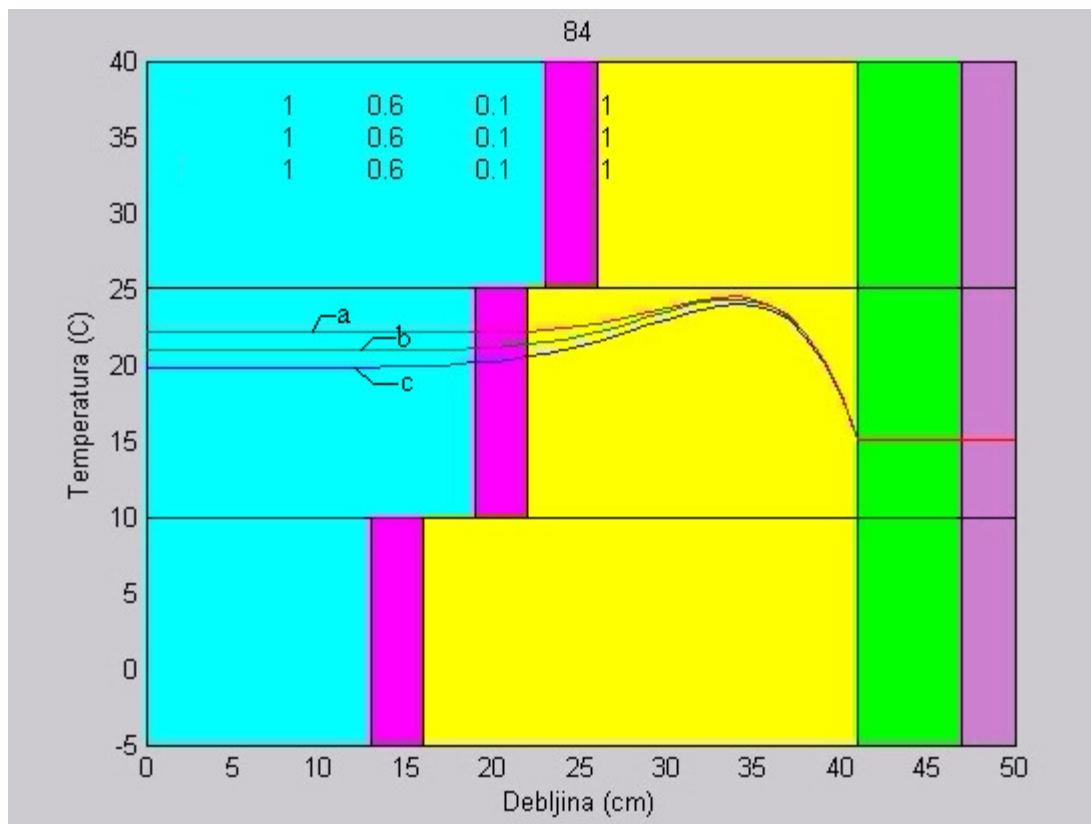
Slika 4.16. Temperaturna promena unutrašnje prostorije u odnosu na spoljašnju temperaturnu promenu

Uočava se fazna razlika između maksimuma unutrašnje temperature i maksimuma spoljašnje temperature u iznosu od 10h. Uticaj debljine termoizolacionog sloja je mali, ali se vidi razlika. Najviša unutrašnja temperatura se dobija sa termoizolacionim slojem najveće debljine, na prikazu je označena tamnoplavom bojom (kriva a). Kako se debljina termoizolacionog sloja smanjuje, tako se smanjuje i maksimalna temperatura zagrevanja unutrašnje prostorije.

Amplituda oscilovanja unutrašnje temperature je, za krivu a, oko $1,7^{\circ}\text{C}$. Za kombinaciju sa termoizolacionim materijalom srednje debljine (kriva b) amplituda oscilovanja unutrašnje temperature je oko $1,1^{\circ}\text{C}$, dok za krivu c ona iznosi oko $1,8^{\circ}\text{C}$. Temperaturna funkcija kroz izolovan zid tendenciozno raste, tj. temperatura unutrašnje prostorije se povećava u funkciji sa vremenom za sve tri kombinacije.

4.1.2.5. Uticaj debljine nosećeg zida

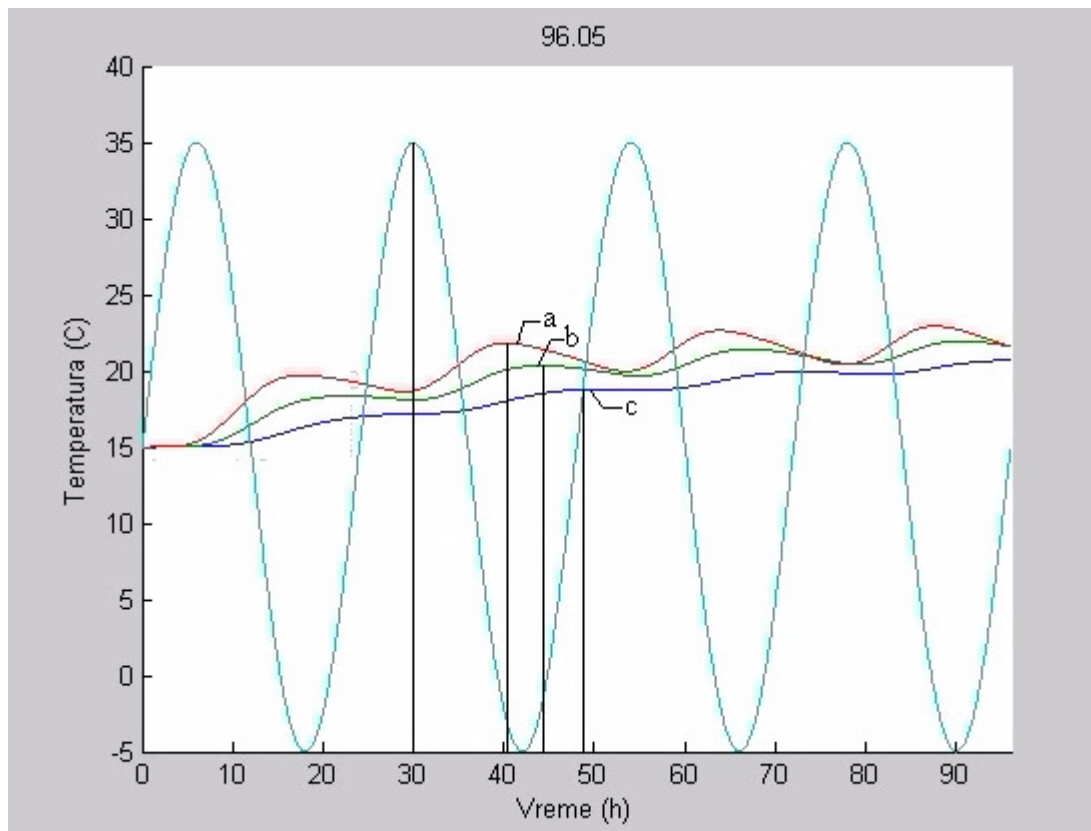
U ovoj simulaciji će se ispitati uticaj debljine zida na temperaturne promene unutrašnje prostorije ([snimak 5](#)). Posmatraće se tri kombinacije. Svaki spoj će sadržati iste materijale, samo će se debljina zida menjati. Spojevi se sastoje od dva sloja krečnog maltera, nosećeg zida od šuplje opeke i termoizolacionog sloja od trske. Toplotna difuzivnost i relativna difuzivnost ovih materijala je dat u Tabeli 10, a za datu kombinaciju je poslednja prikazana i slici 4.17. 1 odgovara krečnom malteru, 0.6 šupljoj opeci, a 0.1 termoizolacionom materijalu od trske.



Slika 4.17. Prikaz temperatunog profila kroz ravan zid. Dat je primer tri kombinacije. Svaka kombinacija sadrži dva sloja krečnog maltera debljine 3 cm (označeni su ljubičastom i rožom bojom), noseći zid od šuplje opeke (žuta boja) i termoizolacioni sloj (zelena boja) debljine 6 cm. Debljina nosećeg zida se menja. Kod prve kombinacije iznosi 25 cm, kod druge 19 cm, i 15 cm kod treće.

Najviša unutrašnja temperatura se dobija kod kombinacije sa najtanjim nosećim zidom. Temperaturna promena kroz spomenutu kombinaciju se može pratiti posmatrajući krivu a na slici 4.17.. Najmanja unutrašnja temperatura se dobija kod spoja materijala sa najvećom debljinom nosećeg zida (kriva c), što je i bilo za očekivati, jer se koeficijent prolaza toplote $K [W / m^2 \cdot ^\circ C]$ smanjuje sa povećanjem debljine materijala kroz koji se toplota provodi.

Na slici 4.18. je dat grafički prikaz temperaturne promene unutrašnje prostorije u odnosu na spoljašnje temperaturne promene.



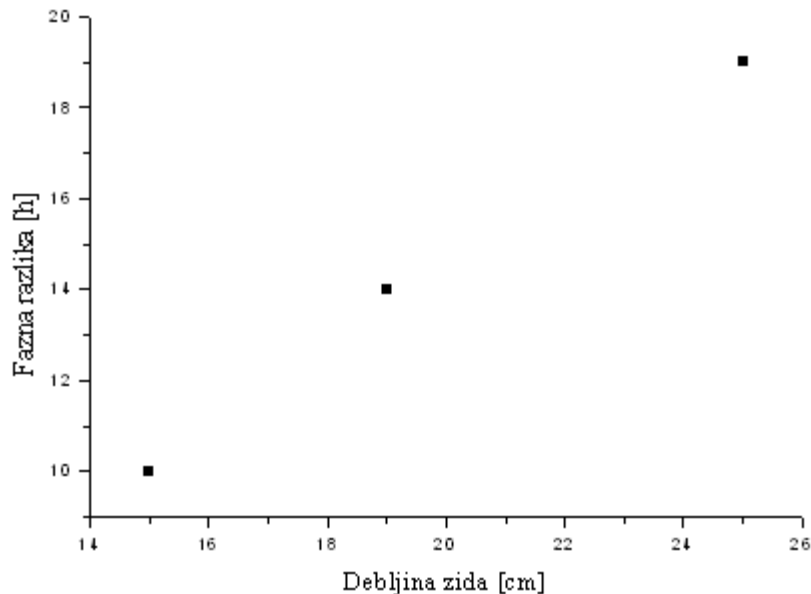
Slika 4.18. Temperaturna promene unutrašnje prostorije u odnosu na spoljašnje temperaturne promene

Primećuje se da u slučaju velike debljine nosećeg zida dobija se najniža unutrašnja temperatura (predstavljena je tamnoplavom bojom, kriva c). Fazna razlika između maksimuma spoljašnje temperature i maksimuma unutrašnje temperature iznosi 19h. Amplituda oscilovanja temperature je u ovom slučaju zanemarljiva. Funkcija ima tendenciju rasta, tj. unutašnja temperatura se povećava skoro linearno.

Najbolji efekat se dobija u slučaju kada je debljina nosećeg zida najmanja (na grafiku je ta promena predstavljena crvenom bojom, kriva a). Amplituda oscilovanja unutrašnje temperature iznosi oko $1,5^{\circ}\text{C}$ i ima tendenciju rasta kao i sama funkcija. Vidi se, da je fazna razlika između maksimuma spoljašnje temperature i maksimuma unutrašnje temperature oko 10h.

Kod kombinacije sa srednjom debljinom zida (temperaturna promena unutrašnje prostorije za tu kombinaciju je označen zelenom bojom na grafičkom prikazu, kriva b) se primećuje 14h fazna razlika. Amplituda oscilovanja unutrašnje temperature je oko $1,1^{\circ}\text{C}$, i smanjuje se. Temperaturna funkcija i kod ove kombinacije tendenciozno raste.

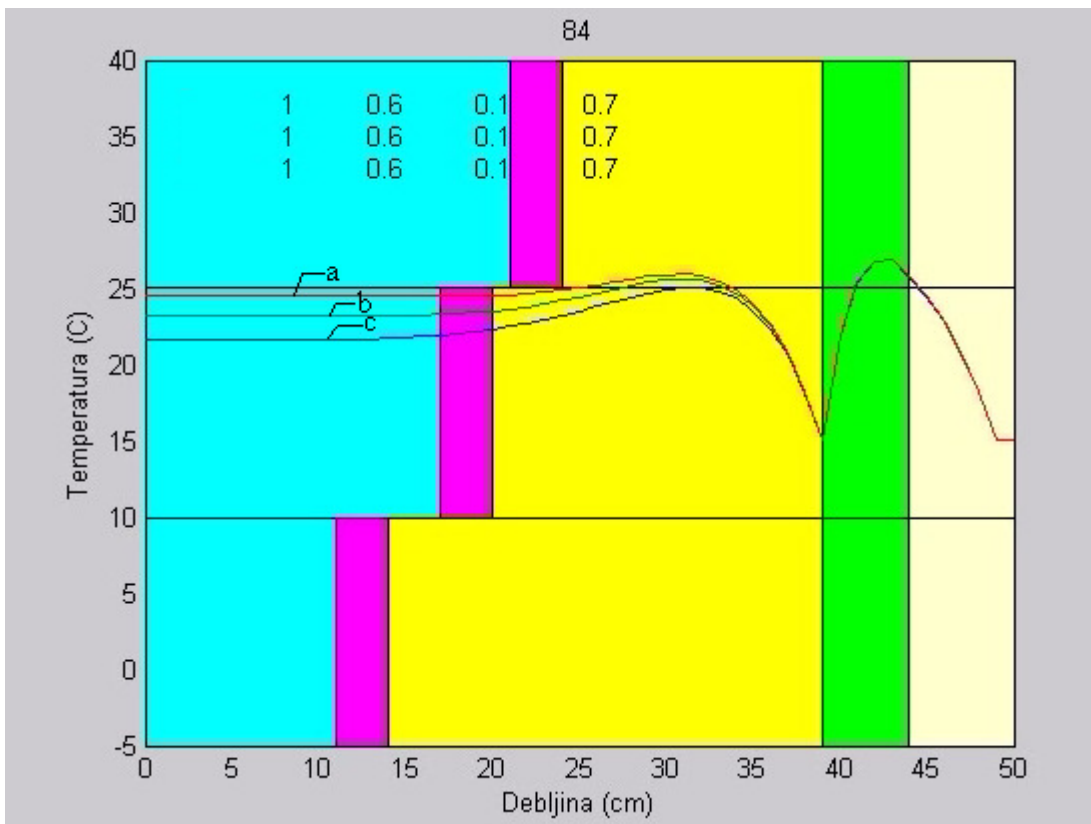
Može se primetiti da fazana razlika raste sa debljinom zida (slika 4.19.).



Slika 4.19. Fazna razlika između maksimuma spoljašnje temperature i maksimuma unutrašnje temperature u zavisnosti od debljine nosećeg zida

4.1.2.6. Uticaj debljine nosećeg zida u konstrukciji "sendvič" zida

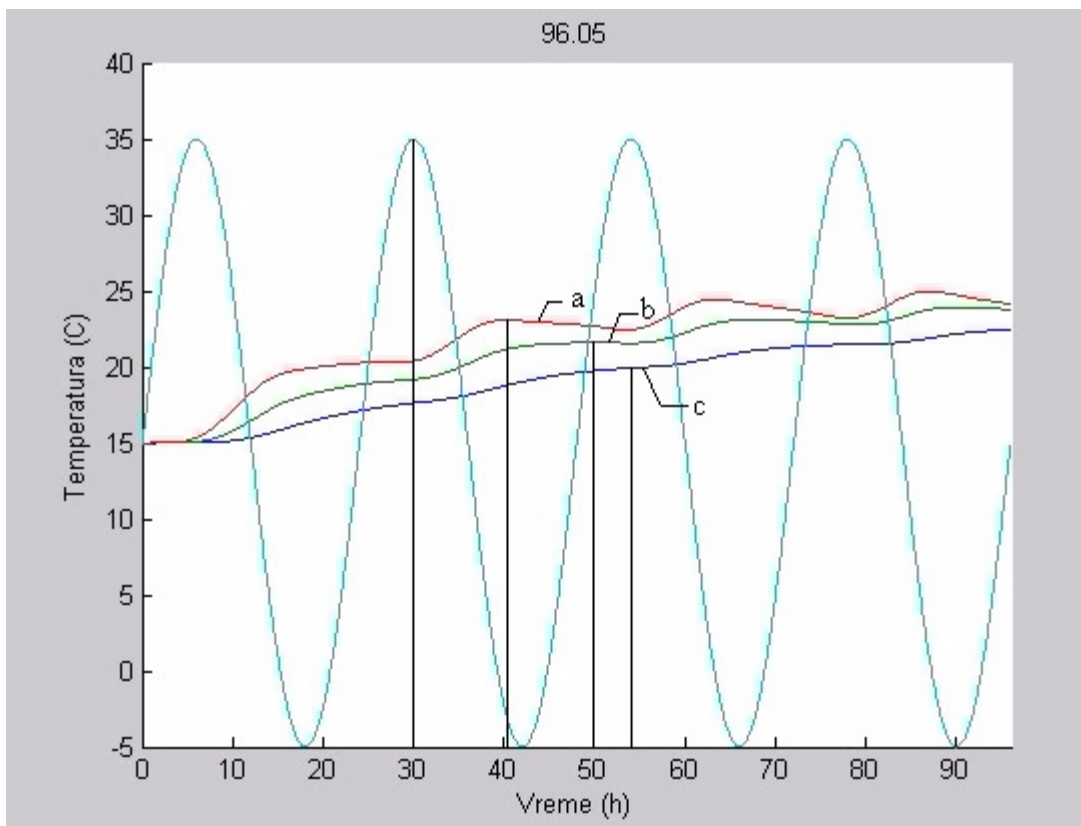
Uradiće se simulacija za tri kombinacije "sendvič" zida. Videlo se, da debljina nosećeg zida ima veći uticaj na krajnji efekat grejanja, nego debljina i vrsta termoizolacionog materijala. Zato će se tu uraditi simulacija, razmatrajući uticaj debljine nosećeg zida u konstrukciji "sendvič" zida na unutrašnje temperaturne promene ([snimak 6](#)). Kombinacije će sadržati sloj krečnog maltera, šuplju opeku, termoizolacioni sloj od trske i zaštitni zid od pune opeke. Debljina sloja krečnog maltera je 3 cm, termoizolacionog sloja je 6 cm i debljina zaštitnog zida je takođe 6 cm. Toplotna difuzivnost i relativna difuzivnost ovih materijala je dat u Tabeli 10, ali se uočava i na prikazu 4.20.. 1 odgovara krečnom malteru, 0.6 šupljoj opeci, 0.1 termoizolacionom sloju od trske, a 0.7 punoj opeci.



Slika 4.20. Prikaz temperaturnog profila kroz "sendvič" zid. Dat je primer tri kombinacije. Svaka kombinacija sadrži sloj krečnog maltera debljine 3 cm (označen je rozom bojom), noseći zid od šuplje opeke (žuta boja), termoizolacioni sloj (zeleni boja) debljine 6 cm, i zaštitni zid od pune opeke (bela boja) debljine 6 cm. Debljina nosećeg zida se menja. U prvoj kombinaciji je 15 cm, u drugoj 19 cm, a u trećoj 25 cm.

Ovde se takođe posmatra efekat grejanja. Vazduh, sa temperaturom većom od unutrašnje prostorije, se uduvava u vazdušni prostor i dolazi do cirkulacije vazduha. Vazdušni prostor i u ovom slučaju, se nalazi između nosećeg zida i termoizolacionog sloja. Strujanjem toplijeg spoljašnjeg vazduha nosećem zidu dovodi određena količina toplote, koja se provođenjem dovodi do unutrašnje prostorije. Rečeno je, da posle dostizanja željenog efekta, cirkulacija se prekida, čime se dobija obična pasivna zaštita. Termoizolacioni sloj pruža otpor "odlaženju" toplote iz date konstrukcije. Uočava se da je temperatura unutrašnje prostorije najveća za kombinaciju sa najtanjim zidom, a najmanja kod spoja materijala gde je noseći zid najdeblji.

Na slici 4.21. je dat grafički prikaz promene unutrašnje temperature u odnosu na spoljašnje temperaturne promene za ovu konstrukciju.



Slika 4.21. Temperaturna promene unutrašnje prostorije u odnosu na spoljašnje temperaturne promene

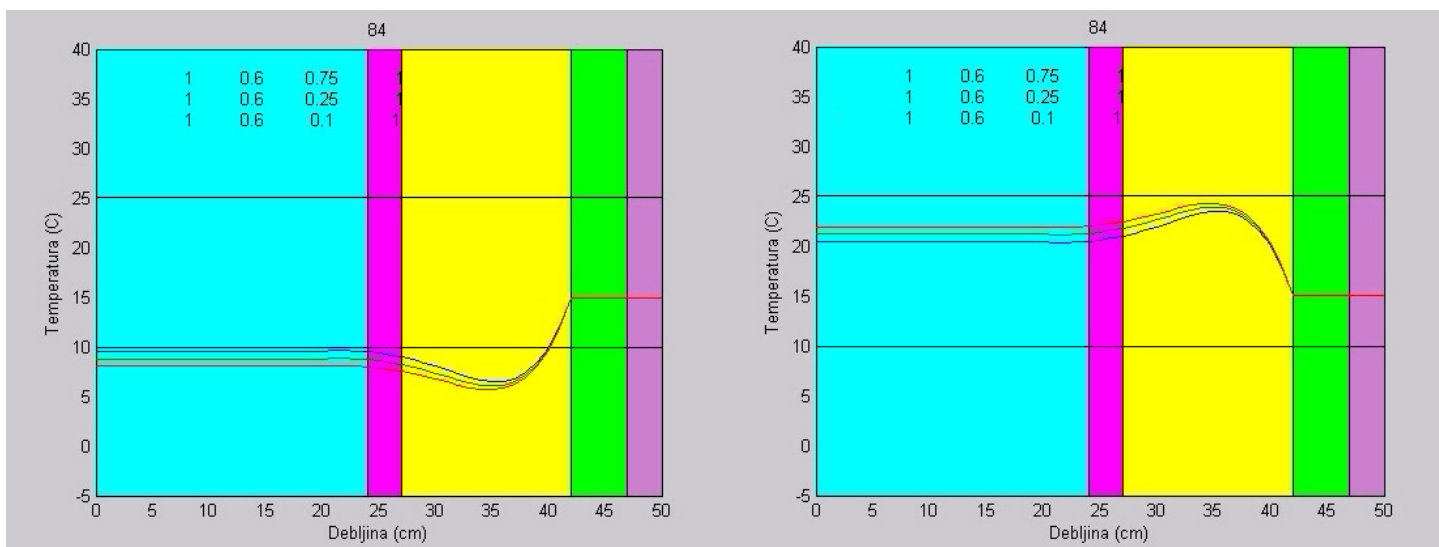
Primećuje se da je efekat grejanja najbolji za kombinaciju sa najtanjim zidom (crvena kriva, kriva a). Amplituda oscilacije unutrašnje temperature je oko $1,2^{\circ}\text{C}$ i smanjuje se. Uočava se fazna razlika između maksimuma spoljašnje temperature i maksimuma unutrašnje temperature oko 10h. Funkcija ima tendenciju rasta, tj. unutrašnja prostorija se zagreva. Razmatrajući drugu kombinaciju, tj. kombinaciju sa zidom srednje debljine (zeleno kriva, kriva b), vidi se da je amplituda oscilovanja unutrašnje temperature takođe oko $1,2^{\circ}\text{C}$ i smanjuje se. Uočava se fazna razlika između maksimuma unutrašnje i spoljašnje temperature u iznosu od 20h. Funkcija i u ovom slučaju ima tendenciju rasta. Kod kombinacije sa najdebljim zidom, efekat zagrevanja je najslabiji, ali je i dalje uočljiv. Fazna razlika između maksimuma spoljašnje temperature i unutrašnje je 24h. Amplituda oscilovanja unutrašnje temperature je zanemarljiva, temperaturna funkcija ima tendenciju rasta, i može se reći da temperatura unutrašnje prostorije skoro linearno raste sa vremenom.

Može se zaključiti da debljina nosećeg zida najviše utiče na efekat zagrevanja. Međutim, iako je efekat grejanja najbolji za kombinaciju sa najtanjim zidom, mora se uzeti u obzir i to da se toplota u oba smera isto prenosi. To znači, da kada se prekine cirkulacija, toplota će najlakše "napustiti" prostoriju kroz najtanji zid.

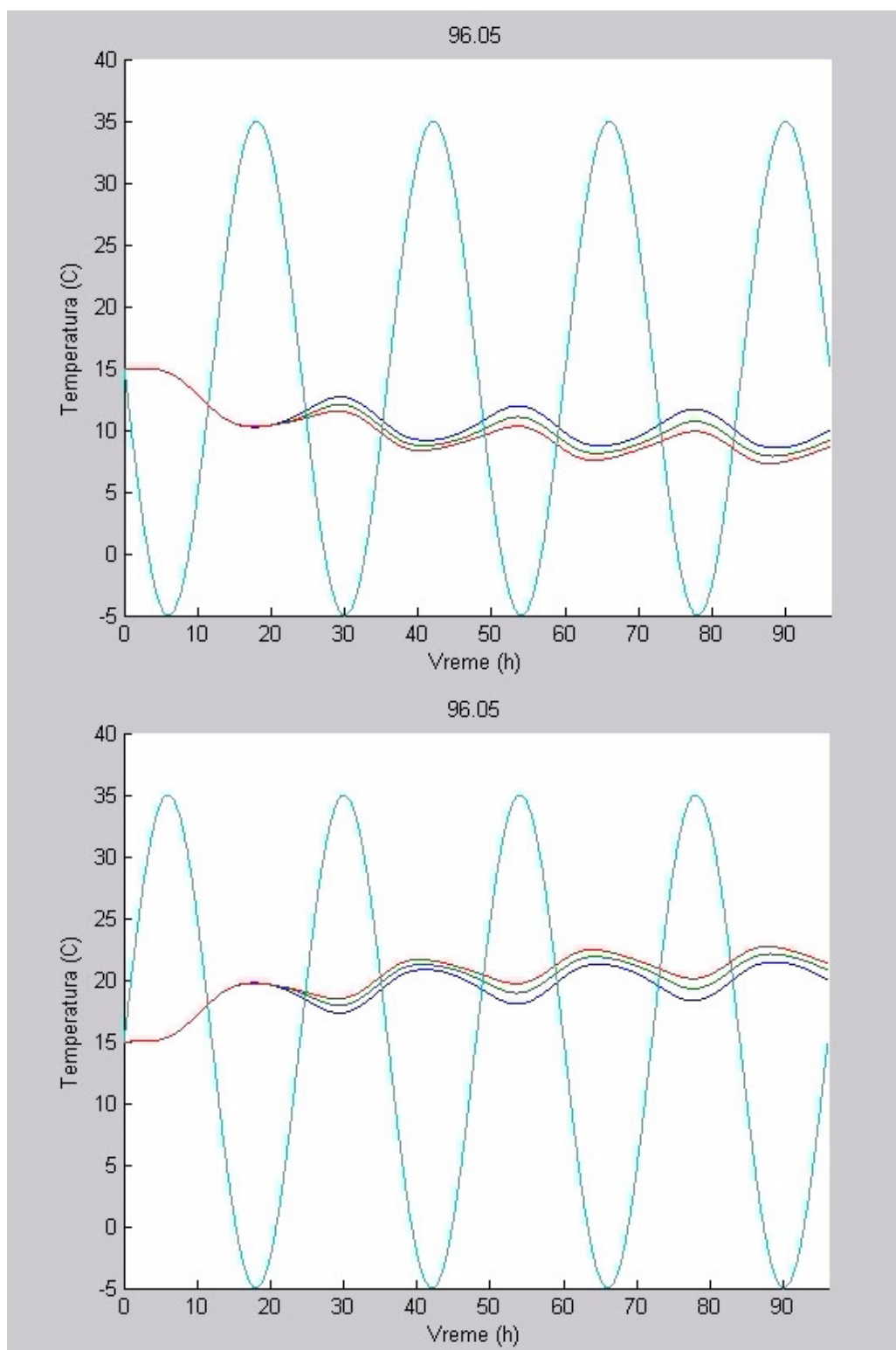
4.1.2.7. Efekat hlađenja

Da bi se pokazalo da ovaj model izolacije funkcioniše i kad je u pitanju efekat hlađenja, izvedena je simulacija u kojoj se vrši "hlađenje" nosećeg zida u željenom vremenskom i temperaturnom intervalu ([snimak 7](#)). Uslovi simulacije nisu menjani. I u ovom slučaju se navodi debljina i vrsta slojeva u datoj kombinaciji kao i kod prethodnih simulacija. Znači, u ovom slučaju se uduvava vazduh u vazdušni prostor (temperatura vazduha je manja nego temperatura unutrašnje prostorije, tj. hladan vazduh). Zbog razloga da je sada temperatura unutrašnje prostorije, prema tome i nosećeg zida veća nego temperatura vazduha, pa se određena količina toplote predaje vazduhu, koji cirkuliše u tom vazdušnom prostoru. Na taj način se toplota "odvodi" sa nosećeg zida, čime se smanjuje temperatura unutrašnje prostorije. Može se uočiti simetrija između hlađenja i grejanja. Da bi simetrija bila uočljiva, urađena je ista simulacija radi dobijanja temperaturnog profila kroz izolovanog zida u slučaju kada se menja vrsta izolacionog materijala, ali sad u režimu hlađenja. Na slikama 4.22. i 4.23. je dat primer istih kombinacija materijala u režimu grejanja i hlađenja.

Koristi se spoj materijala od dva sloja krečnog maltera, nosećeg zida i termoizolacionog materijala. Vrsta termoizolacionog materijala se menja i ispituje se uticaj izolacije na temperaturu unutrašnje prostorije. Relativna difuzivnost ovih materijala se nalaze na slici 4.22.. 1 odgovara krečnom malteru, 0.6 šupljoj opeci, 0.75 saćastoj plastičnoj masi, 0.25 pluti, a 0.1 trski.



Slika 4.22. Prikaz temperaturnog profila kroz ravan zid u režimu hlađenja (levo) i grejanja (desno). Dat je primer tri kombinacije. Svaka kombinacija sadrži dva sloja krečnog maltera debljine 3 cm (označeni su ljubičastom i rozom bojom), noseći zid od šuplje opeke (žuta boja) debljine 15 cm i termoizolacioni sloj (zeleno boja) debljine 6 cm.



Slika 4.23. Temperaturna promena unutrašnje prostorije u odnosu na spoljašnje temperaturne promene. Posmatra se uticaj vrste izolacionnog materijala u režimu hlađenja (gore) i grejanja (dole).

5 Zaključak

U ovom radu je razmatrano provođenje toplote kroz zid. Pored toga, dat je model izolacije i niz simulacija pomoću kojih se analizira efektivnost dinamičkog modela toplotne izolacije. Navedene su prednosti i neophodnost postavljanja termoizolacije i dati su i analizirani primeri nekoliko kombinacija za dva načina pasivne izolacije. Razmatrana je samo toplotna izolacija zida. Predstavljeni su brojni termoizolacioni materijali i data je vrednost ukupnog koeficijenta prolaza za velik broj kombinacija. Rečeno je da je pametnije postaviti spoljašnju izolaciju od unutrašnje, jer tada ne dolazi do prekidanja izolacionog omotača, čime se izbegava nastajanje "toplotnih mostova" i zaštita postaje kompletnija itd. Rezultati koji su dobijeni prilikom računanja ukupnog koeficijenta prolaza toplote govore sami za sebe. Jasno se vidi da ostavljanje vazdušnog sloja ne samo da reguliše odvođenje vodene pare iz termoizolacionih materijala, nego se dobija bolja zaštita. Pokazano je da korišćenje šuplje opeke u kombinaciji sa vazdušnim slojem daje najbolju izolaciju i dato je još nekoliko razloga zašto je zgodnije koristiti šuplju opeku umesto pune opeke. Kod izolacije "sendvič zida" uočeno je da se dobija veoma stabilna konstrukcija i da su izolacione osobine ovakvog spoja jako dobre. I ovde se pokazalo da kombinacija sa vazdušnim slojem pruža najbolju zaštitu. Nedostatak te konstrukcije u odnosu na spoljašnju izolaciju je to da se dobijaju zidovi velike debljine, npr. 45 cm ili 40 cm, mada se ta debljina može svesti i na 32 cm i da ispunjava uslove određene klimatske zone. Model aktivne izolacije predstavljen je u radu za dva načina toplotne izolacije - za spoljašnju izolaciju i za "sendvič zid", i simuliran je u režimu promenjive spoljašnje temperature, kao što je i u realnosti. Dat model daje mogućnost da se u određenom vremenskom i temperaturnom intervalu favorizuje grejanje ili hlađenje. Metodom premošćavanja je spoljašnja temperatura dovedena na noseći zid, kroz koji se toplota prenosi provođenjem do unutrašnje prostorije. Videlo se da postavljanje izolacionog sloja utiče na temperaturne promene unutrašnje prostorije na taj način da se ona povećava sa smanjenjem toplotne difuzivnosti izolacionih materijala. Izolacioni sloj pruža otpor "odlaženju" toplote iz konstrukcije. Međutim, ne utiče na faznu razliku između maksimuma spoljašnje i unutrašnje temperature, tj. dobija se približna vrednost fazne razlike kao kod neizolovanog zida. Takođe se može zaključiti da je značajniji uticaj debljine izolacionog sloja, nego vrste. Međutim, uticaj debljine nosećeg zida je najveći kako na temperaturu unutrašnje prostorije, tako i na faznu razliku između maksimuma spoljašnje i unutrašnje temperature. Videlo se da se dobija najveća temperatura unutrašnje prostorije sa najtanjim zidom. Međutim, kao što je i rečeno, kroz najtanji zid toplota najlakše "napušta" datu konstrukciju. Prema tome, treba tražiti najoptimalniju kombinaciju debljine zida kao i vrste i debljine izolacionog sloja. Svakako se uočava da se ovom metodom temperatura unutrašnje prostorije znatno povećava, tj. efekat pasivnog grejanja se jasno primećuje kod svake kombinacije. U radu je razmatran režim grejanja, ali je pokazano da se u slučaju režima hlađenja dobija ista efektivnost izolacije kao tokom grejanja.

Skrenula bih pažnju na termoizolacione materijale organskog porekla. Ne samo da pružaju veoma dobru izolaciju, već su i pristupačni, jeftini i sa adekvatnom zaštitom pokazalo se [7] da su i dugotrajni. Model aktivne izolacije me stvarno iznenađuje. Smatram da bi kombinacija izolacionih materijala organskog porekla sa aktivnom

izolacijom pružila potpuni komfor u datom objektu i manje bi se opteretio budžet njegovih korisnika.

6 Literatura

- [1] Građevinski materijali, Mihailo Muravljov, Beograd : Građevinska knjiga, 2007 (Zrenjanin: Budućnost)
- [2] Materijali u građevinarstvu, Branislav M. Živanović, U Novom Sadu: Fakultet tehničkih nauka, OOUR Naučno-obrazovani institut za industrijsku gradnju, 1981
- [3] Toplotna i zvučna izolacija u zgradama, Dietmar Lochner, Wolfgang Ploss (prevod Jasmina Rusov), Beograd: Građevinska knjiga, 1984
- [4] Arhitektonske konstrukcije, masivni konstruktivni sklop, Ranko Trbojević, Beograd: Orion-art, 2003 (Novi Sad: Stylos-print)
- [5] Conduction Heat Transfer (Notes for MECH 7210), Daniel W. Mackowski, Mechanical Engineering Department Auburn University
- [6] Engeneering heat transfer, William S. Janna, The University of Memphis, Memphis, Tennessee
- [7] Internet stranice:
- <http://www.casopis-gradjevinar.hr/>
 - <http://www.gradjevinarstvo.rs/>
 - <http://www.energysavingtrust.org.uk/>
 - http://www.gradjevinarstvo.rs/TekstDetaljiURL/Termoizolacija_-_gradite_pametno_izolujte_pametnije.aspx?ban=820&tekstid=296
 - http://geothermal.mas.bg.ac.rs/termodinamika/handouts/termoB/15.1_Provodjenje__kondukcija__toplote.pdf
 - http://www.vpps.edu.rs/vezbe_16_11_10.pdf
 - http://ocw.mit.edu/courses/aeronautics-and-astronautics/16-050-thermal-energy-fall-2002/lecture-notes/10_part3.pdf
 - <http://www.gradjevinarstvo.rs/TekstDetalji.aspx?tekstid=877>
 - <http://www.buildmagazin.com/index2.aspx?fld=tekstovi&ime=bm0736.htm>



Kristina Fodor je rođena u Novom Sadu, 29.04.1986. godine. Završila je Osnovnu školu „Jovan Jovanović Zmaj” u Srbobranu i Gimnaziju „Gimnazija Bečej” u Bečeju. Po završetku gimnazije, 2005. godine upisuje Prirodno-matematički fakultet u Novom Sadu, odsek fizika, smer diplomirani fizičar.

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije:

Monografska dokumentacija

TD

Tip zapisa:

Tekstualni štampani materijal

TZ

Vrsta rada:

Diplomski rad

VR

Autor:

Kristina Fodor

AU

Mentor:

dr Imre Gut, van.profesor

MN

Naslov rada:

Provođenje toplote kroz zid

NR

Jezik publikacije:

srpski (latinica)

JP

Jezik izvoda:

srpski/engleski

JI

Zemlja publikovanja:

Srbija

ZP

Uže geografsko područje:

Vojvodina

UGP

Godina:

2011

GO

Izdavač:

Autorski reprint

IZ

Mesto i adresa:

Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

MA

Fizički opis rada:

6 poglavlja/70 strana/ 7 literalnih citata/ 10 tabela/ 34 slika/ 12 grafika

FO

Naučna oblast:

Fizika

NO

Naučna disciplina:

Fizika materijala

1.2.1.6 ND

Predmetna odrednica/ ključne reči:

Toplotno provođenje, toplotna izolacija, izolacioni materijali, aktivna izolacija

PO

UDK

Čuva se:

Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu

ČU

Važna napomena:

nema

VN

Izvod:

Cilj ovog rada je da se prikaže toplotno provođenje kroz zid, i da se pokaže mogućnost toplotne izolacije zida. Takođe je predstavljen model aktivne izolacije, i izvršen niz simulacija datog modela. Rezultati simulacije i vizuelni prikazi u obliku slika su dati u radu, a simulacije u avi fajlu je priložen uz rad na cd-u.

IZ

Datum prihvatanja teme od NN veća:

DP

Datum odbrane:

DO

Članovi komisije:

KO

Predsednik:

dr Jovan Šetrajčić, redovni profesor

član:

dr Imre Gut, van.profsor

član:

dr Fedor Skuban, docent

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:

ANO

Identification number:

INO

Document type:

Monograph publication

DT

Type of record:

Textual printed material

TR

Content code:

Final paper

CC

Author:

Kristina Fodor

AU

Mentor/comentor:

Ph.D. Imre Gut, Associate profesor

MN

Title:

Heat conduction trough the wall

TI

Language of text:

Serbian (Latin)

LT

Language of abstract:

English

LA

Country of publication:

Serbia

CP

Locality of publication:

Vojvodina

LP

Publication year:

2011

PY

Publisher:

Author's reprint

PU

Publication place:

Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

PP

.2.1.6.1 Physical description:

6 chapters/ 70 pages/ 7 literature/ 10 tables/ 34 pictures/ 12 graphs

.2.1.6.2 PD

Scientific field:

Physics

SF

Scientific discipline:

Materials physics

SD

Subject/ Key words:

Heat conduction, thermal insulation, insulation materials, active isolation

SKW

UC

Holding data:

Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4

HD

Note:

none

N

Abstract:

The aim of this paper is to show the heat conduction through the wall, and to demonstrate the possibility of thermal insulation of the wall. It's also presented a model of active isolation, and executed a series of simulations of a given model. The results of the simulations and visual displays in the form of images are also given in the work. The simulation in avi fajl is attached to the work on CD.

AB

Accepted by the Scientific Board:

ASB

Defended on:

DE

Thesis defend board:

DB

President:

Ph.D. Jovan Šetrajčić, full prof.

Member:

Ph.D. Imre Gut, Associate profesor

Member:

Ph.D. Fedor Skuban, docent