

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 774

**UPRAVLJANJE GRIJANJEM I HLAĐENJEM
PROSTORIJE OBAVIJENE OVOJNICOM
KOJA UKLJUČUJE NAPREDNE
MATERIJALE**

Paolo Marenzi

Zagreb, lipanj 2013.

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Mariu Vašku na pomoći, strpljenju, prenesenom znanju i korisnim savjetima tijekom izrade rada. Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji i djevojci na podršci tijekom studiranja i korisnim životnim savjetima.

Sadržaj

Uvod.....	1
1. Solar Decathlon Europe.....	2
1.1. Team UniZG	3
1.2. Koncept MemBrain	4
2. Model kuće	6
2.1. PCM.....	9
3. Modeliranje u Matlabu	14
3.1. Toplinski procesi	14
3.2. Primjer modeliranja jednostavne sobe.....	17
3.2.1. Modeliranje zida	17
3.2.2. Modeliranje prozora.....	19
3.2.3. Sunčeva doza.....	20
3.2.4. Spajanje zidova.....	21
3.3. Model kuće u Matlabu	22
3.4. Modeliranje PCM-a	25
3.4.1. Hibridni model.....	25
3.5. Rezultati simulacije modela kuće.....	27
4. Sustav upravljanja grijanjem i hlađenjem kuće	30
4.1. Modelsko prediktivno upravljanje.....	30
4.2. Optimizacija sustava upravljanja.....	30
4.3. Rezultati sustava upravljanja.....	32
Zaključak	35
Literatura	36
Sažetak	37
Summary	38

Uvod

Jedan od najzahtjevnijih energetske izazova s kojima se svijet susreće danas je potreba za realizacijom masovnih ušteda energije. Zgrade sudjeluju s oko 40 % u ukupnoj potrošnji energije u svijetu, što čini zgradarstvo najvećim potrošačem u kojem se troši više energije nego u prometu i industriji. Prvi korak prema manjoj potrošnji energije je podizanje svijesti ljudi i poticanje razvoja tehnologije u zgradarstvu. Upravo to je glavna misija međunarodnog sveučilišnog natjecanja *Solar Decathlon Europe 2014* (SDE). Ideja natjecanja je razvoj samoodržive kuće koja svoje potrebe za energijom zadovoljava iz obnovljivih izvora energije, te izgradnja iste kuće na mjestu održavanja natjecanja. Po prvi puta, Republika Hrvatska ima svog predstavnika na natjecanju, Sveučilište u Zagrebu.

Natjecanje je ujedno i glavni motiv za izradu ovog rada. Pošto su sustavi za grijanje, ventilaciju i klimatizaciju, tzv. HVAC sustavi, među najvećim potrošačima energije u stambenim objektima, energetske efikasno upravljanje toplinskim procesima može imati veliki doprinos u uštedi energije. Zbog toga će se u sklopu ovog rada modelirati toplinsko ponašanje modela kuće koja se planira izgraditi u sklopu natjecanja, te će na temelju razvijenog modela dizajnirati sustav upravljanja grijanjem/hlađenjem kuće. Upravljanje će se temeljiti na modelskom prediktivnom upravljanju.

1. Solar Decathlon Europe

Solar Decathlon Europe (SDE) je dvogodišnje međunarodno natjecanje sveučilišta koje se temelji na izgradnji samoodržive montažne kuće, koja svoje potrebe za energijom zadovoljava iz obnovljivih izvora energije, prvenstveno Sunca. Posebnost natjecanja je poticanje interdisciplinarnog rada, koji studentima daje priliku steći, ne samo tehničke i projektantske vještine, već i vještine važne za njihovu buduću profesionalnu karijeru. Cilj natjecanja je podići svijest javnosti o obnovljivim izvorima energije i važnosti održivog razvoja, kao i pronalazak inovativnih rješenja unutar svih struka [1].



Slika 1.1 Logo natjecanja

Natjecanje se sastoji od dva dijela. Tijekom prve faze, koja traje nepuna dva mjeseca, potrebno je napraviti idejno rješenje te dokazati da natjecateljski tim ima znanja, mogućnosti i ambicije dovesti projekt do završetka, tj. izgraditi kuću, pri tome se kao najvažniji kriterij nameće financijska i organizacijska mogućnost završetka projekta. Osim toga, integracija projekta u nastavni program Sveučilišta i inovativnost važan su kriterij za odabir finalista. Nakon prolaska u drugu fazu natjecanja, ulaskom među 20 najboljih timova, sveučilišni timovi imaju 18 mjeseci za dovršetak izvedbenog projekta te samu izgradnju objekta. Vrhunac natjecanja je dvotjedno izlaganje svih objekata te njihovo ocjenjivanje u 10 kategorija. Kategorije ocjenjivanja su:

1. arhitektonska izvedba,
2. konstrukcije,
3. energetska učinkovitost,
4. ravnoteža proizvodnje i potrošnje električne energije,
5. ugodnost stanovanja,
6. funkcionalnost,

7. industrijalizacija,
8. inovativnost,
9. održivost,
10. društvena prihvatljivost.

Sljedeće natjecanje, SDE 2014 će se održati u suradnji s Republikom Francuskom u Parizu, u perivoju poznatog dvorca Versailles. Iz godine u godinu natjecanje privlači sve veću pozornost javnosti, čemu u prilog ide prošlogodišnji broj posjetitelja natjecanja od oko 250 000 [1].

1.1. Team UniZG

Do sada Republika Hrvatska nije imala svog predstavnika te se na ovo natjecanje po prvi puta prijavio naš predstavnik, Sveučilište u Zagrebu. Analizom prethodnih natjecanja, Sveučilište u Zagrebu je dalo odobrenje te iskazalo želju, interes i potrebu za sudjelovanjem na sljedećem natjecanju Solar Decathlon Europe 2014. Nakon uspješne prijave, Tim UNIZG je prošao u daljnji krug natjecanja te će svoje rješenje prikazati u finalu natjecanja u ljeto 2014.



Slika 1.2 Logo tima UniZG

Trenutno, hrvatski tim, koji se sastoji od 40-ak studenata i 10 mentora, aktivno radi na razradi konceptualnog rješenja te kontaktiranju potencijalnih pokrovitelja i partnera. Ovaj projekt veže se uz sveučilišni Kampus na Borongaju, tj. po završetku natjecanja, kuća će biti smještena u sklopu Kampusu. Uzevši u obzir činjenicu da je ovaj projekt jedan od

najvećih sveučilišnih projekata u Hrvatskoj, na kojemu u najvećem dijelu sudjeluju studenti, dodatno upućuje na njegov potencijal.

Primarni cilj tima Sveučilišta u Zagrebu jest projektirati i izgraditi građevinu koja će biti održiva, tj. osim za samo natjecanje, biti će ju moguće koristiti i u obliku informativnog centra, izložbenog prostora partnera, edukativnog materijala u nastavnim programima fakulteta te brojnih drugih primjena. Osim toga, od prvih faza projektiranja nastojalo se uključiti hrvatske tvrtke, proizvođače, sirovine te ostale čimbenike kojima sudjelovanje na ovakvom projektu može pomoći pri ulasku i/ili povećanju udjela na tržištu. Na taj način, vjeruje se da ovaj projekt može potaknuti razvijanje barem dijela hrvatskog gospodarstva, a sigurno će pomoći promidžbi samog Sveučilišta i Republike Hrvatske u Europskoj zajednici [2].

1.2. Koncept MemBrain

Počevši od same stanice, membrane su neophodne i nezaobilazne komponente svih živih organizama - moraju biti u neposrednom doticaju s okolinom, a tvari selektivno cirkuliraju iz izvanstaničnog u unutarstanični prostor i obrnuto, a to omogućuje membrana. Tako je sama kuća koncipirana pomoću visokotehnološke ovojnice/membrane. Sve potrebne instalacije nalaze se u njoj te služi kao utičnica u koju se uključuju sadržaji kuće. Ovojnica oslobađa prostor i prepušta ga korisniku i njegovim potrebama. Ona komunicira sa vanjskim svijetom, upija energiju i prenosi ju u unutrašnjost kuće te omogućuje ugodnu klimu interijera [2].



Slika 1.3 Logo koncepta MemBrain

Kako je glavna uloga membrane zaštita od vanjskih utjecaja i oštećenja, te prijenos tvari kroz nju iz okoline u stanicu tako i ova ovojnica služi kući na taj način:

- definira njezine granice,
- služi kao mjesto odvijanja specifičnih funkcija,
- sadrži instalacijski sloj koji omogućava i regulira život unutar same kuće,
- sadrži receptore za vanjske signale (fotonaponske ćelije),
- omogućava multiplikaciju i međusobnu komunikaciju sa drugim stambenim prostorima.

Oslobodjen prostor omogućava raznolike organizacije za različite dobne skupine te različite karaktere ljudi. Tako može biti korištena za potrebe studentskih kampusa (smještaj studenata), vikendice, radni prostor, komercijalni prostor, jedinica višestambene zgrade itd. Vezivanjem za druge takve jedinice može se stvoriti veći organizam istovrsnih jedinica koji tvori lamele, blokove, stambene nizove itd. [2].

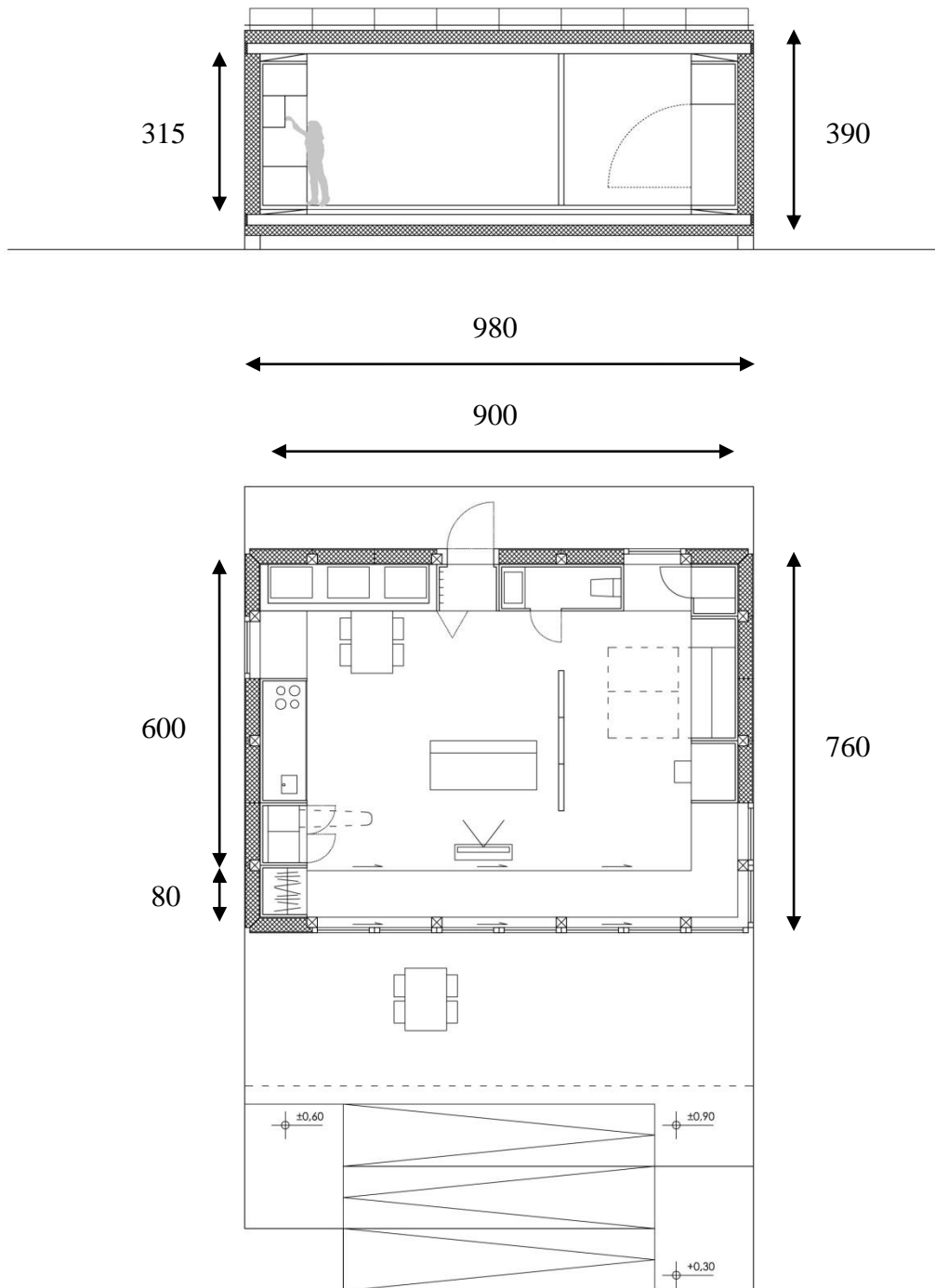
2. Model kuće

Model kuće koja se koristi za potrebe ovog rada prikazana je na slici 2.1. Kuća je osmišljena i dizajnirana od strane projektnog tima UniZG-a, a temelji se na prethodno navedenom konceptu MemBrain.



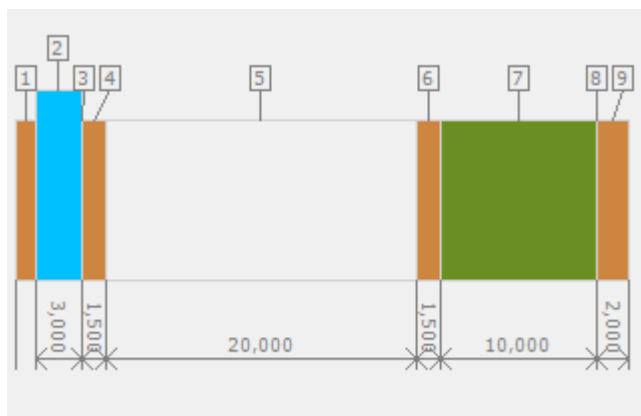
Slika 2.1 3D prikaz kuće

Detaljniji prikaz modela kuće je prikazan na slici 2.2. Kuća se sastoji od glavne prostorije, površine 56 m², i zimskog vrta na južnoj strani, površine 9 m². Ukupna vanjska površina kuće iznosi 74.5 m². Sustav grijanja i hlađenja koji će se projektirati u sklopu ovog rada je predviđen samo u glavnoj prostoriji.



Slika 2.2 Tlocrt i bokoct kuće (dimenzije izražene u cm)

Sastav bočnih zidova u kući prikazan je na slici 2.3, a detaljnja svojstva svih materijala korištenih u strukturi zida su dana u tablici 1. U sastavu poda i stropa kuće se ne nalazi sloj neprovjetranog zraka, dok su ostali dijelovi istog rasporeda i debljine kao kod bočnih zidova. Dodatna posebnost stropa je u tome što će sloj gipskartonskih ploča biti debljine 3 cm, te će u njemu biti implementirana posebna vrsta materijala pod nazivom *phase change material* (PCM). Detaljniji opis navedenog materijala je dan u sljedećem poglavlju.



Slika 2.3 Presjek kroz zid (od unutarnjeg prema vanjskom prostoru)

Tablica 1 Svojstva materijala korištenih u strukturi zida

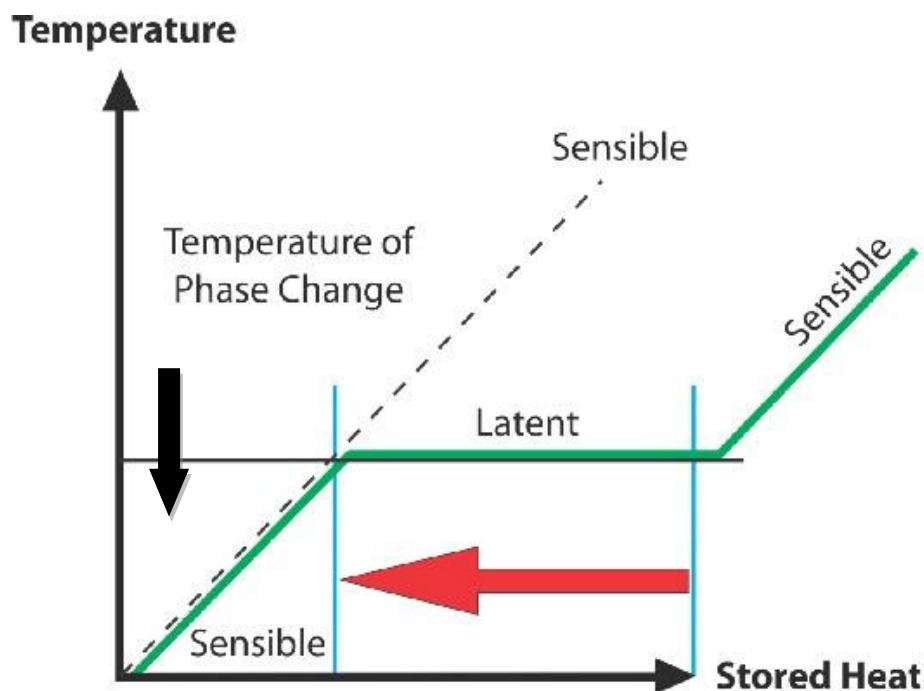
Rbr.	Materijal	Debljina (m)	Gustoća (kg/m ³)	Toplinska provodljivost (W/mK)	Specifični toplinski kapacitet (J/kgK)
1	Gipskartonske ploče	0.0125	980	0.25	900
2	Neprovjetran sloj zraka	0.03	1.2	-	1004
3	KNAUF parna brana LDS 100	0.00015	980	0.5	1800
4,6	OSB ploče	0.015	650	0.13	1700
5	Ovčja vuna	0.2	50	0.04	1030
7	KNAUF FKL	0.1	90	0.041	1000
8	KNAUF folija LDS 0.04	0.0015	900	0.2	1000
9	Drvo	0.02	550	0.15	2000

2.1. PCM

Phase change material (PCM) je materijal s velikom količinom latentne topline koji, otapanjem i skrućivanjem na određenoj temperaturi, je sposoban za pohranu i ispuštanje velike količine energije. Toplina se skuplja ili otpušta pri promjeni agregatnog stanja materijala, te je stoga PCM klasificiran kao spremnik latentne topline (engl. latent heat storage, LHS).

Spremnik latentne topline može biti izveden sa sljedećim načinima promjene agregatnog stanja: kruto - tekuće, kruto – plinovito i tekuće – plinovito. Međutim, jedini od navedenih način koji se koristi je promjena iz krutog u tekuće agregatno stanje. Iako se pri promjeni iz tekućeg u plinovito stanje oslobađaju veće količine topline, takvi oblici skladištenja energije nisu praktični za upotrebu jer zahtijevaju skladištenje materijala pod velikim tlakom kada se nalazi u plinovitom agregatnom stanju.

PCM se u načelu ponaša kao spremnik senzibilne topline (engl. sensible heat storage, SHS), tj. njihova temperatura raste linearno sa upijanjem topline. Međutim, kada PCM dostigne temperaturu na kojoj se događa promjena agregatnog stanja, temperaturu taljenja, tada apsorbira velike količine topline na gotovo konstantnoj temperaturi. PCM upija toplinu bez značajnog porasta temperature sve dok se sav materijal ne pretvori u tekuće stanje. Pri suprotnom procesu, kada temperatura okoline oko tekućeg PCM-a padne na prethodno navedenu temperaturu, PCM se skrućuje, te otpušta svoju pohranjenu latentnu toplinu [3] [4].



Slika 2.4 Usporedba spremnika latentne i senzibilne topline

Dostupne su razne vrste PCM-ova u bilo kojem potrebnom rasponu temperatura, od -5 do 190 ° C. U rasponu temperatura ljudske udobnosti, od 20 do 30 ° C, PCM-ovi su vrlo učinkoviti jer pohranjuju 5 do 14 puta više topline po jedinici volumena od konvencionalnih spremnika topline, kao što su voda, zid ili kamen.

Kriteriji pri odabiru PCM-a su sljedeći [3]:

- Termodinamička svojstva. PCM treba posjedovati:
 1. temperaturu taljenja u željenom rasponu temperatura;
 2. veliku količinu latentne topline po jedinici volumena;
 3. veliki specifični toplinski kapacitet, veliku gustoću i visoku toplinsku provodljivost;
 4. male promjene obujma pri promjeni agregatnog stanja i mali tlak pare na radnoj temperaturi kako bi se smanjila mogućnost zaraze;
 5. Kongruentno otapanje – materijal u tekućem stanju zadržava isti oblik kao u krutom stanju.
- Kinetička svojstva:
 1. visoka stopa nukleacije kako bi se izbjegao *supercooling* u tekućem stanju;
 2. visoka stopa rasta kristala, tako da sustav može zadovoljiti zahtjeve povrata topline iz sustava za pohranu energije.

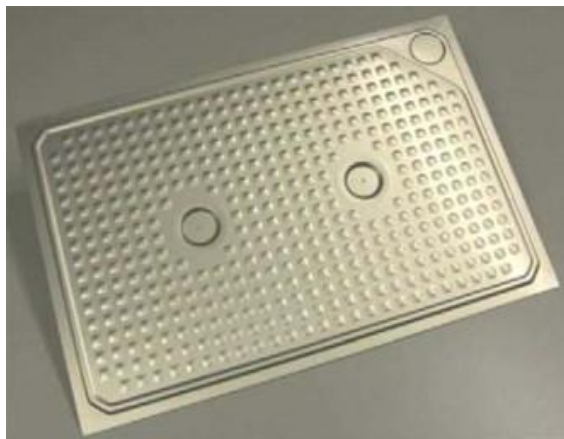
- Kemijska svojstva:
 1. kemijska stabilnost;
 2. potpuno reverzibilni ciklus skrućivanja/otapanja;
 3. minimalna degradacija nakon velikog broja ciklusa skrućivanja/otapanja;
 4. nekorozivni, neotrovni, nezapaljivi i ne-eksplozivni materijal;
- Financijska svojstva:
 1. mala cijena;
 2. dostupnost.

Najčešće korišteni materijali kao PCM-ovi su hidrati soli, masne kiseline i esteri, te razni parafini. Pošto na većinu organskih rješenja ne utječe voda, PCM-ovi temeljeni na organskim materijalima mogu biti izloženi zraku, jedino PCM rješenja temeljena na soli se moraju pakirati u posebne spremnike kako bi se spriječilo isparavanje ili upijanje vode. Obje vrste nude određene prednosti i nedostatke, a ako se pravilno primjenjuju, neki od nedostataka postaje prednost za određene aplikacije.

Raspon temperature koji nudi PCM tehnologija otvara nove mogućnosti za zgradarstvo, posebno za pohranu energije pri srednjim i visokim temperaturama, npr. solarno grijanje ili skladištenje tople vode.

Načini spremanja PCM-a [4]:

- makro-enkapsulacija (ovojnica): rani razvoj spremnika velikog volumena nije uspio zbog loše toplinske vodljivosti većine PCM-ova. PCM je imao tendenciju da se zgusne na rubovima posude čime se sprečavao učinkovit prijenos topline.



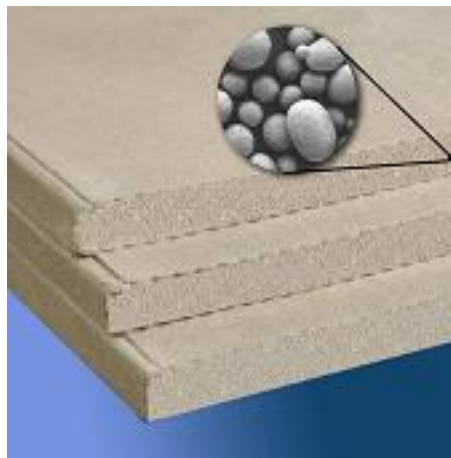
Slika 2.5 Primjer makro-enkapsulacije

- mikro-enkapsulacija: omogućuje jednostavnu i jeftinu ugradnju PCM-a u građevinske materijale. Mikroenkapsulacija također omogućuje izvedbu prijenosnog sustava za pohranu topline.



Slika 2.6 Primjeri mikro-enkapsulacije

- molekularna enkapsulacija: razvijena od strane Dupont de Nemoursa, omogućava vrlo visoku koncentraciju PCM-a unutar polimerne smjese. Omogućava pohranu kapaciteta do 515 kJ/m^2 u ploči debljine 5 mm (103 MJ/m^3). Molekularna ovojnica omogućuje bušenje i rezanje materijala u kojem se nalazi PCM bez curenja PCM-a.



Slika 2.7 Primjer molekularne enkapsulacije

Materijal koji se koristi za pakiranje PCM-a treba dobro voditi toplinu i treba biti dovoljno izdržljiv da izdrži česte promjene volumena PCM-a. Također bi se trebao ograničiti protok vode kroz zidove, tako da se PCM ne isuši. Ambalaža također mora biti otporna na curenje i koroziju. Uobičajeni materijali koji zadovoljavaju navedene zahtjeve za pakiranje PCM-a su od nehrđajućeg čelika, polipropilena i halogenih elemenata.

Nakon pregleda vrsta PCM-ova koje se nude trenutno na tržištu, projektni tim je odlučio da će koristiti PCM u molekularnoj enkapsulaciji. Sukladno tome, u sklopu ovog rada biti će

modeliran takav oblik PCM-a, tj. za modeliranje će se koristiti svojstva proizvoda tvrtke *BASF, Micronal*[®] PCM, koja su dana u tablici 2 [5].

Tablica 2 Svojstva proizvoda *Micronal*[®] PCM

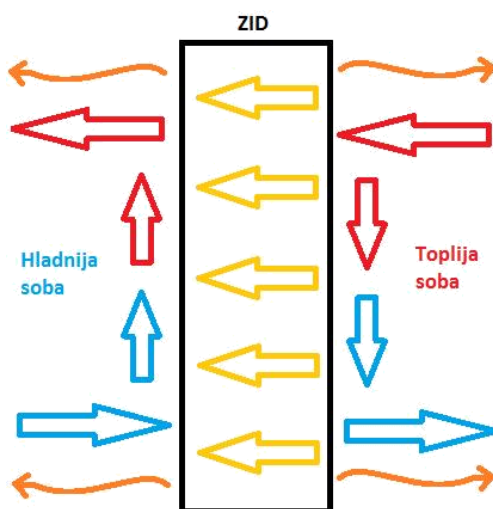
Temperatura taljenja	Temperaturni raspon rada	Kapacitet latentne topline (kJ/kg)	Ukupni toplinski kapacitet (kJ/kg)	Postotak PCM-a u materijalu (%)	Gustoća materijala (kg/m³)
23	10-30	55	41	42	980

3. Modeliranje u Matlabu

3.1. Toplinski procesi

Kod modeliranja prolaza topline kroz zidove moramo u obzir uzeti konvekciju, kondukciju i radijaciju [6].

Kondukcija je prijenos toplinske energije s jedne molekule na drugu zbog različitih temperatura. Do konvekcije dolazi zbog zagrijavanja fluida na nekoj površini. Zagrijani fluid se diže, a hladniji pada na tlo. Radijacija je zračenje nekog tijela koje je zagrijano na određenoj temperaturi. Primjer svega toga vidi se na slici 3.1. Slika predstavlja izmjenu toplinske energije između dvije sobe. Zrak u toplijoj sobi predaje svoju toplinu zidu kondukcijom (nije ucrtano na slici), hladi se i pada na pod, time dolazi do konvekcije, to jest toka toplinske energije zbog gibanja fluida. Crvene strelice označavaju topli, a plave ohlađeni zrak. Toplinska energija predana zidu prolazi kroz zid zbog razlike temperatura. To je kondukcija i označena je žutim strelicama. U hladnijoj sobi zid predaje energiju zraku. Zrak se na tom zidu zagrijava te se izdiže, a na njegovo mjesto dolazi hladniji zrak sa poda. Zbog toga opet dolazi do konvekcije. I na kraju, svako tijelo zagrijano na određenu temperaturu zrači što je ilustrirano narančastim strelicama.



Slika 3.1 Toplinski tokovi na jednom zidu

Jednodimenzionalni toplinski tok zbog kondukcije računa se pomoću [6]:

$$H = -\lambda \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial x}$$

gdje su:

- H – toplinski tok [W],
- λ – toplinska vodljivost [$\frac{W}{mK}$],
- A – površina kroz koju se prenosi toplina [m^2],
- $\frac{\partial T}{\partial x}$ – temperaturni gradijent duž osi x .

Ako se radi o kondukciji između krutog tijela i fluida gornja se formula zamjenjuje s [6]:

$$H = h \cdot A \cdot \Delta T,$$

gdje su:

- h – provodljivost, označava brzinu izmjene topline između medija u neposrednom kontaktu [$\frac{W}{mK}$],
- ΔT – temperaturna razlika među medijima koji izmjenjuju toplinu [K],
- A – kontaktna površina između krutog tijela i fluida [m^2].

Za računanje toplinskog toka koji je posljedica konvekcije, to jest prijenosa topline strujanjem nekog medija, koristi se sljedeća formula [6]:

$$H = \rho \cdot c \cdot T \cdot Q,$$

gdje su:

- ρ – gustoća medija [$\frac{kg}{m^3}$],
- c – specifični toplinski kapacitet medija [$\frac{J}{kgK}$],
- T – temperatura medija [K],
- Q – volumni protok medija [$\frac{m^3}{s}$].

Toplinski tok zračenjem tijela računa se pomoću [6]:

$$H = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4,$$

gdje su :

- σ – Stefan-Boltzmannova konstanta, iznosi $5.6704 \cdot 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 T^4} \right]$,
- ε – emisijski faktor tijela.

Toplinska energija pohranjena u nekom tijelu jednaka je:

$$E = m \cdot c \cdot T,$$

gdje su:

- m – masa tijela [kg],,
- T – temperatura tijela [K].

Promjena toplinske energije jednaka je ukupnoj bilanci kondukcijskih, konvekcijskih i radijacijskih toplinskih tokova u tijelo i iz njega [1]:

$$m \cdot c \cdot \frac{dT}{dt} = \sum (H_{cd} + H_{cv} + H_r),$$

gdje su:

- H_{cd} – ukupni kondukcijski tok,
- H_{cv} – ukupni konvekcijski tok,
- H_r – ukupni radijacijski tok.

Toplinske procese može se prikazati pomoću električnih krugova, točnije pomoću RC kruga. Analogija je ovakva, struja u toplinskoj mreži predstavlja toplinski tok, kondenzator predstavlja toplinski kapacitet nekog tijela, a otpornik toplinski otpor. Napon u nekoj točki je analogija za temperaturu u toj točki.

Dakle, kod kondukcije između fluida i nekog tijela toplinski otpor iznosi:

$$H = h \cdot A \cdot \Delta T \rightarrow R = \frac{1}{h \cdot A}.$$

Kod kondukcije u tijelu toplinski otpor je jednak:

$$H = -K \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \approx -\lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \rightarrow R = \frac{\Delta x}{\lambda \cdot A}.$$

Toplinski kapacitet jednak je:

$$m \cdot c \cdot \frac{dT}{dt} = H_{uk} \rightarrow T = \frac{1}{m \cdot c} \int_0^\infty H_{uk} dt \rightarrow C = m \cdot c.$$

Kod toplinskih procesa ne postoji ništa što bi odgovaralo induktivitetu u električnim mrežama, budući da toplinski tok ne posjeduje inerciju.

3.2. Primjer modeliranja jednostavne sobe

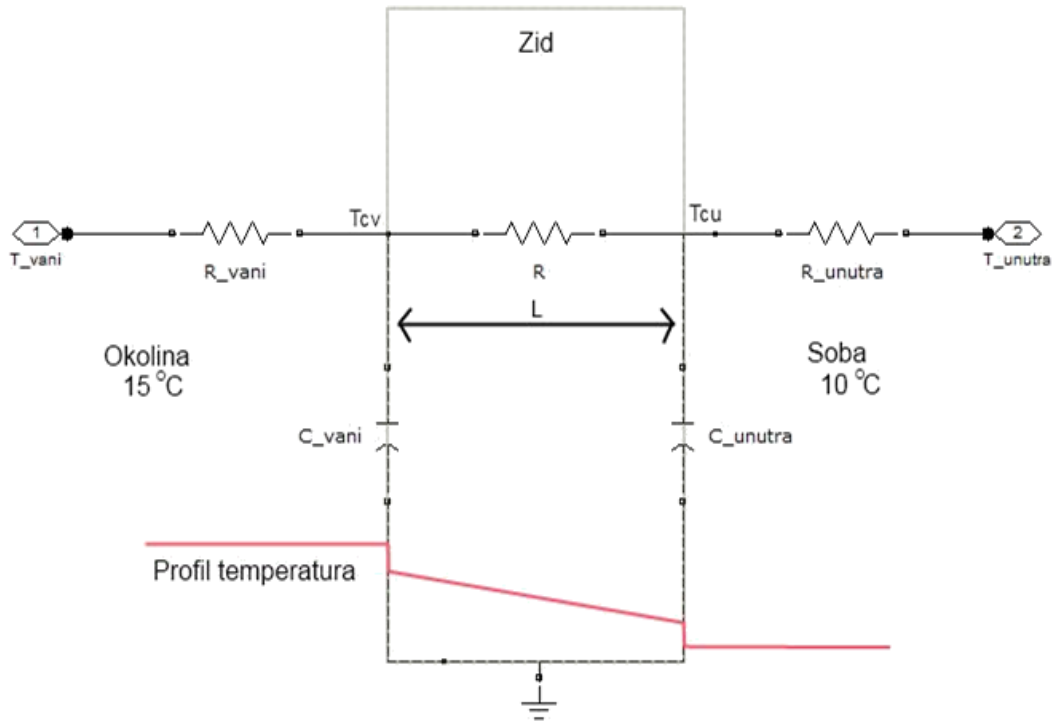
Ovdje će biti dan primjer modeliranja jednostavne sobe. Soba će imati dva jednaka zida koji se sastoje od samo jednog materijala. Iako takve sobe ne postoje, pošto soba mora biti zatvorena da bi je uopće zvali sobom, moguće je napraviti takav model i svrha ovog odjeljka je pojasniti modeliranje na jednostavnom modelu. Važno je napomenuti da se pri modeliranju temperatura u sobi ne modeliraju konvekcijski tokovi koji nastaju zbog hlađenja ili zagrijavanja zraka na zidovima sobe.

3.2.1. Modeliranje zida

Svaki zid sastoji se od nekih materijala. O tim materijalima i dimenzijama zida ovise svojstva zida koja će utjecati na temperaturu u sobi. Preciznije rečeno, o njima ovisi toplinski otpor zida te toplinski kapacitet zida.

Modeliranje prijenosa topline u zidu svodi se na konstruiranje RC mreže koja je analogija istog. Otpornik predstavlja toplinski otpor, a kondenzator predstavlja toplinski kapacitet. U prvoj aproksimaciji za jedan je zid dovoljno koristiti dva kondenzatora koji predstavljaju lica zida, te jedan otpornik koji predstavlja toplinski otpor, no povećanjem broja istih točnost modela se povećava. Povećanjem broja RC članova kojima aproksimiramo jedan zid, sve se više približavamo realnom modelu.

Jedan tako modelirani zid vidi se na Slici 3.2. Radi se o zidu kojem je jedno lice vani, a drugo unutar sobe. Otpornici R_{vani} , R_{unutra} i R predstavljaju toplinske otpore. Razlikuju se po tome što se kod R_{vani} i R_{unutra} radi o kondukciji između krutog tijela (zida) i fluida (zraka), a R ovisi samo o kondukciji kroz kruto tijelo (zid). Kondenzatori C_{vani} i C_{unutra} predstavljaju kapacitet zida i jednaki su po iznosu jer se zid sastoji od samo jednog materijala. Napon na njima predstavlja temperaturu lica zida. Kao što je već rečeno ovaj se zid mogao modelirati s puno više elemenata čime bi se povećala točnost modela. Crvenom bojom označen je profil temperature za slučaj da je vani veća temperatura nego u sobi. Vidi se da je vanjsko lice zida malo hladnije nego okolina, temperatura kroz zid linearno opada, te je unutrašnje lice zida malo toplije nego okolina.



Slika 3.2 Model zida

Otpornici i kondenzatori proračunavaju se na sljedeći način [2]:

$$R_{vani} = \frac{1}{h_{vani} \cdot A'}$$

$$R_{unutra} = \frac{1}{h_{unutra} \cdot A'}$$

$$C_{vani} = C_{unutra} = \frac{m \cdot c}{2} = \frac{\rho \cdot L \cdot A \cdot c}{2},$$

$$R = \frac{L}{\lambda \cdot A'}$$

gdje su:

- h_{vani} , h_{unutra} – provodljivost na vanjskom, odnosno unutarnjem licu zida $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$,
- A – površina zida $[m^2]$,
- m – masa zida $[kg]$,
- c – specifični toplinski kapacitet medija $\left[\frac{J}{kgK}\right]$,
- L – debljina zida $[m]$,
- ρ – gustoća zida $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$.

Zid je moguće opisati sustavom dviju diferencijalnih jednadžbi koje opisuju struje kroz kondenzatore:

$$C_{vani} \cdot \frac{dT_{CV}}{dt} = h_{vani} \cdot A \cdot (T_{vani} - T_{CV}) + \frac{T_{CU} - T_{CV}}{R},$$

$$C_{unutra} \cdot \frac{dT_{CU}}{dt} = h_{unutra} \cdot A \cdot (T_{unutra} - T_{CU}) + \frac{T_{CV} - T_{CU}}{R},$$

gdje su:

- T_{CV} , T_{CU} – vanjska, odnosno unutarnja temperatura [K].

Dane jednadžbe mogu se opisati s varijablama stanja. Stanja su spremnici energije, odnosno kondenzatori, a ulazi mogu biti vanjska i unutarnja temperatura čime je moguće provjeriti kako se ponaša tok toplinske energije u sobu.

Opis sustava varijablama stanja je:

$$\begin{bmatrix} \frac{dT_{CV}}{dt} \\ \frac{dT_{CU}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R \cdot C_{vani}} & -\frac{1}{R_{vani} \cdot C_{vani}} \\ \frac{1}{R \cdot C_{unutra}} & -\frac{1}{R \cdot C_{unutra}} - \frac{1}{R_{unutra} \cdot C_{unutra}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_{CV} \\ T_{CU} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{R_{vani} \cdot C_{vani}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{unutra} \cdot C_{unutra}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_{vani} \\ T_{unutra} \end{bmatrix}$$

$$[H] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{R_{unutra}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_{CV} \\ T_{CU} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{R_{unutra}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_{vani} \\ T_{unutra} \end{bmatrix}.$$

Ovakvim opisom na izlazu dobivamo informaciju o ukupnom toplinskom toku u sobu.

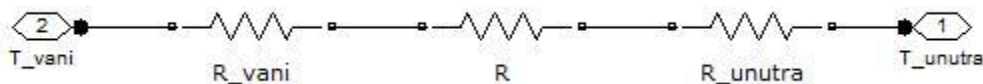
3.2.2. Modeliranje prozora

Prozori su poseban problem kod modeliranja kuće. I kod zidova i kod prozora se dio dozračenosti reflektira, ali za razliku od zidova kod kojih se ostatak troši na zagrijavanje lica zida, kod prozora ostatak ulazi u sobu. Postavlja se pitanje kako to modelirati. Da bi se zadržala jednostavnost, u ovom je modelu dozračenost koja ulazi kroz prozor modelirana kao dodatni tok, te je pomnožena s određenim koeficijentom. Taj koeficijent govori koliki se dio dozračenosti koja ulazi u sobu kroz prozor iskoristio za zagrijavanje sobe.

Prozori imaju još jednu karakteristiku koja ih bitno razlikuje od zidova, a to je mali

toplinski kapacitet. Zbog toga je u ovom modelu zanemaren kapacitet prozora. Toplinski otpor kod prozora ovisi o tome o kakvom se tipu prozora radi. Jednoslojna stakla imaju relativno mali toplinski otpor u usporedbi s dvoslojnim prozorom punjenim argonom koji je korišten u ovom modelu.

Na Slici 3.3 prikazan je prozor ostvaren serijom otpornika.

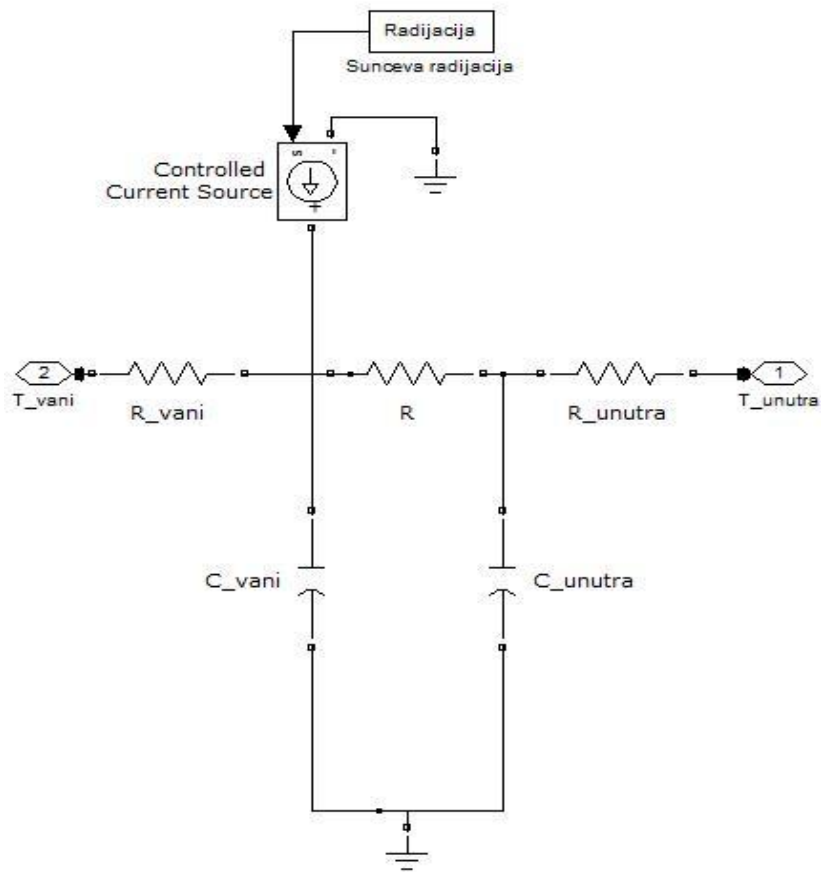


Slika 3.3 Primjer modeliranja prozora

Iznosi otpora se kod prozora računaju isto kao i kod zidova, samo treba poznavati vodljivost materijala od kojih je sastavljen.

3.2.3. Sunčeva dozračenost

Podaci o sunčevoj dozračenosti koje imamo na raspolaganju su dani za jediničnu površinu koja ima svoj nagib i orijentaciju. Taj se iznos množi s koeficijentom apsorpcije zida te površinom istog. Dobiveni iznosi predstavljaju dozračenost za taj zid koja je u model dodana kao dodatni toplinski tok koji ulazi na vanjski kapacitet zida. U Simulinku bi to izgledalo kao na Slici 3.4.



Slika 3.4 Primjer modeliranja sunčeve radijacije

3.2.4. Spajanje zidova

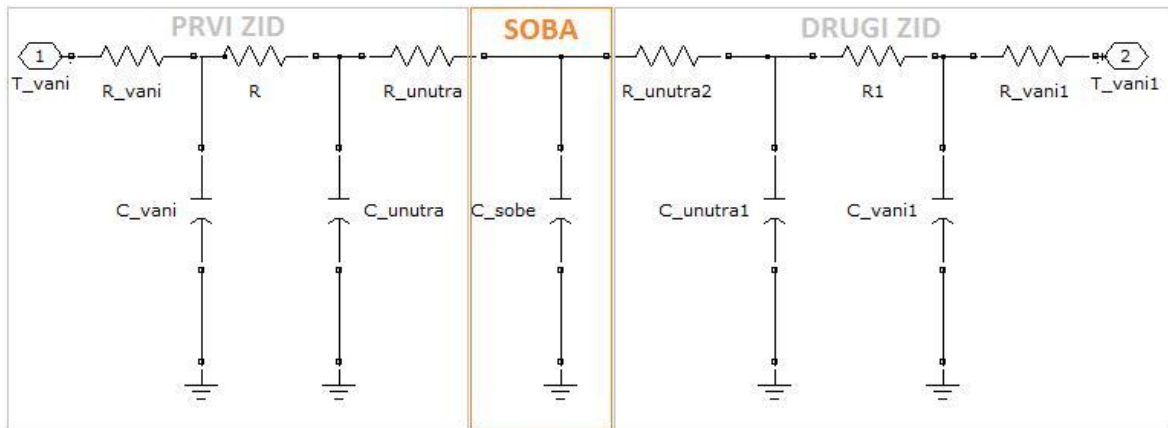
Sad kad imamo model zida treba napraviti model sobe. Sobi predstavlja jedan kondenzator čiji kapacitet iznosi:

$$C_{sobe} = m_{zraka} \cdot c_{zraka} = \rho_{zraka} \cdot V_{sobe} \cdot c_{zraka},$$

gdje su:

- m_{zraka} – masa zraka koji se nalazi u sobi [kg],
- ρ_{zraka} – gustoća zraka u sobi $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$,
- V_{sobe} – volumen sobe [m^3],,
- c_{zraka} – specifični toplinski kapacitet zraka $\left[\frac{J}{kgK}\right]$.

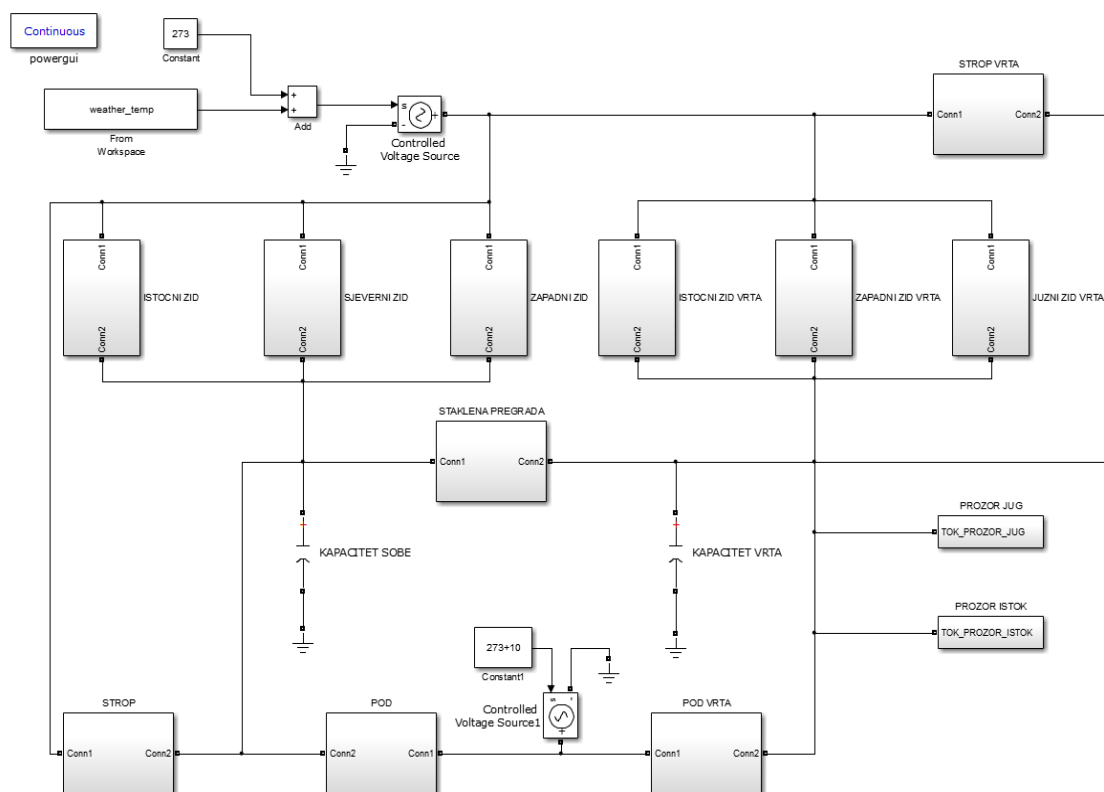
Na taj kondenzator spajaju se svi toplinski tokovi koji ulaze ili izlaze iz sobe. Ako imamo sobu koja ima dva zida, onda su toplinski tokovi kroz ta dva zida jedini. Dakle, model sobe s dva zida, uz zanemarivanje radijacijskog toplinskog toka među njima, izgledao bi kao na Slici 3.5.



Slika 3.5 Primjer modeliranja sobe

3.3. Model kuće u Matlabu

Koristeći prethodno opisane metode modeliranja dobiven je model kuće u obliku RC mreže, te model varijabli stanja za tu mrežu.



Slika 3.6 RC model kuće

Na temelju RC mreže prikazanoj na slici 3.6, izveden je odgovarajući model varijabli stanja. Stanja modela su kondenzatori, a njihov poredak u matrici A je sljedeći:

1. sjeverni zid sobe, vanjski kondenzator,
2. sjeverni zid sobe, unutarnji kondenzator,
3. istočni zid sobe, vanjski kondenzator,
4. istočni zid sobe, unutarnji kondenzator,
5. zapadni zid sobe, vanjski kondenzator,
6. zapadni zid sobe, unutarnji kondenzator,
7. strop sobe, vanjski kondenzator,
8. strop sobe, unutarnji kondenzator,
9. gips na stropu sobe, kondenzator,
10. pod sobe, vanjski kondenzator,

11. pod sobe, unutarnji kondenzator,
12. gips na podu sobe, kondenzator,
13. zapadni zid vrta, vanjski kondenzator,
14. zapadni zid vrta, unutarnji kondenzator,
15. strop vrta, vanjski kondenzator,
16. strop vrta, unutarnji kondenzator,
17. pod vrta, vanjski kondenzator,
18. pod vrta, unutarnji kondenzator,
19. kapacitet sobe, kondenzator,
20. kapacitet vrta, kondenzator.

Ulazi u model su sljedeći:

1. vanjska temperatura,
2. dozaćenost sjevernog zida sobe,
3. dozaćenost istočnog zida sobe,
4. dozaćenost zapadnog zida sobe,
5. dozaćenost stropa sobe,
6. dozaćenost zapadnog zida vrta,
7. dozaćenost stropa vrta,
8. dozaćenost koja ulazi kroz prozor na istočnom dijelu vrta,
9. dozaćenost koja ulazi kroz prozor na južnom dijelu vrta,
10. temperatura zemlje.

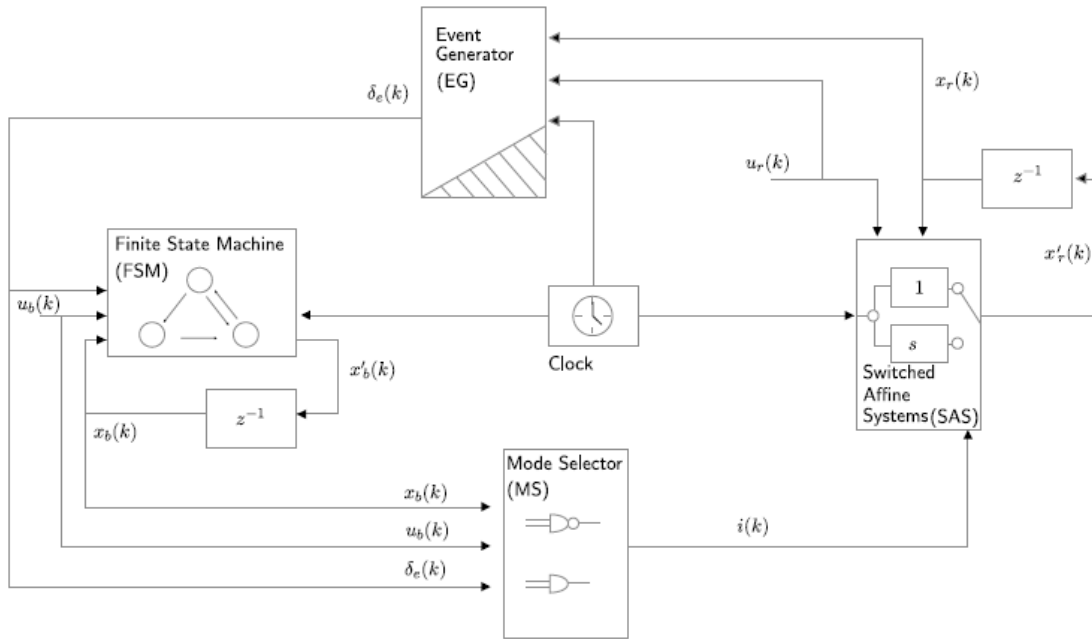
3.4. Modeliranje PCM-a

U modelu kuće navedenom u prethodnom poglavlju nije implementirana simulacija ponašanja PCM-a, iako je PCM sastavni dio ovojnice kuće, konkretno gipskartonskih ploča na stropu kuće. Razlog tome je izrazito nelinearno ponašanje PCM-a, koje je detaljno objašnjeno ranije u ovom radu. No, ako ponašanje PCM-a podijelimo na slučaj kada PCM djeluje kao spremnik senzibilne topline i slučaj kada se PCM skrućuje/otapa, tada dobivamo dva načina ponašanja PCM-a koja su linearna, a samim time lakša za modelirati. Implementaciju PCM-a na takav način u postojeći model kuće može se izvesti tako da postojeći model prebacimo u hibridni model. Preinake koje prije toga moramo napraviti su diskretizacija modela kuće i dodavanje 21. varijable stanja u model koja će predstavljati količinu latentne topline L spremljene unutar PCM-a. Kada je PCM u potpuno krutom stanju tada je L jednak L_{max} , odnosno kada je PCM u potpuno tekućem stanju tada je L jednak nuli.

3.4.1. Hibridni model

U posljednje vrijeme razvijeni su modeli koji omogućavaju interakciju između kontinuirane dinamike sustava opisane diferencijalnim jednadžbama ili jednadžbama diferencije, i logičkih komponenata opisanih strojem konačnih stanja (engl. *finite state machine*), if-then-else pravilima, ili propozicionalnom i vremenskom logikom. Takvi heterogeni modeli, označeni kao hibridni modeli, se prebacivaju među mnogim načinima rada, gdje je svaki način povezan s drukčijim dinamičkim zakonom. Prijelazi između različitih način rada su potaknuti određenim događajima [7].

U ovom radu korištena je verzija hibridnog modela pod nazivom diskretni hibridni automat (engl. *discrete hybrid automata*, DHA). DHA je rezultat spajanja stroja konačnih stanja (engl. *finite state state*, FSM), koji čini diskretni dio hibridnog sustava, uz *switched affine system* (SAS), koji čini kontinuirani dio hibridnog sustava. Interakcija između FSM-a i SAS-a se temelji na dvama spojnim elementima: generator događaja (engl. *event generator*, EG) i selektoru načina rada (engl. *mode selector*, MS). EG izvlači logičke signale iz kontinuiranog dijela. Logički događaji temeljeni na logičkim signalima i ostali vanjski logički ulazi aktiviraju odgovarajuće stanje FSM-a. MS koristi sve logičke varijable kako bi odabrao odgovarajući način rada SAS-a [7].



Slika 3.7 Shema rada hibridnog sustava

Model kuće koji se razvijen u sklopu ovog rada ima dva načina kontinuiranog rada. Sva stanja modela se ponašaju isto u oba načina rada, jedino stanje koje se odnosi na temperaturu PCM-a ima različito ponašanje, tj. PCM se ponaša kao:

1. obični spremnik senzibilne topline, ili kao
2. spremnik latentne topline, tj. PCM se skrućuje/otapa, odnosno prima/otpušta latentnu toplinu.

Uvjeti koji se moraju ispuniti da se način rada modela prebaci iz prvog u drugi su sljedeći:

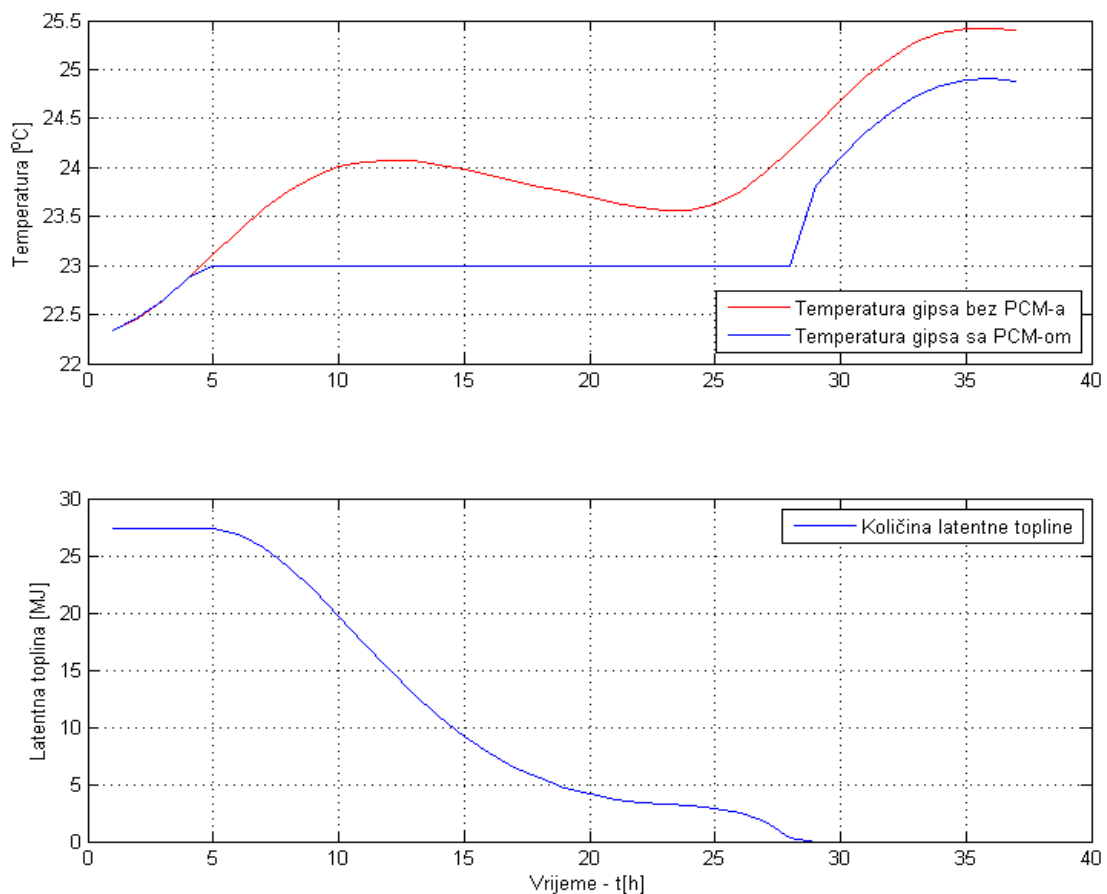
- u trenutku k temperatura PCM-a manja od temperature taljenja PCM-a (273 K), temperatura PCM-a u trenutku $k+1$ veća od temperature taljenja, te količina pohranjene latentne topline L u PCM-u, tj. 21. varijabla stanja modela je u zadanim ograničenjima ($0 - L_{max}$), ili
- u trenutku k temperatura PCM-a veća od temperature taljenja, temperatura PCM-a u trenutku $k+1$ manja od temperature taljenja te količina latentne topline L je u zadanim ograničenjima.

U tom trenutku temperatura PCM-a, tj. varijabla stanja modela koji predstavlja PCM se fiksira na vrijednost 273 K sve dok vrijedi uvjet da je količina latentne topline L u trenutku $k+1$ unutar zadanih ograničenja. Ako navedeni uvjet ne vrijedi, tada se način rada modela prebaci iz drugog u prvi način rada.

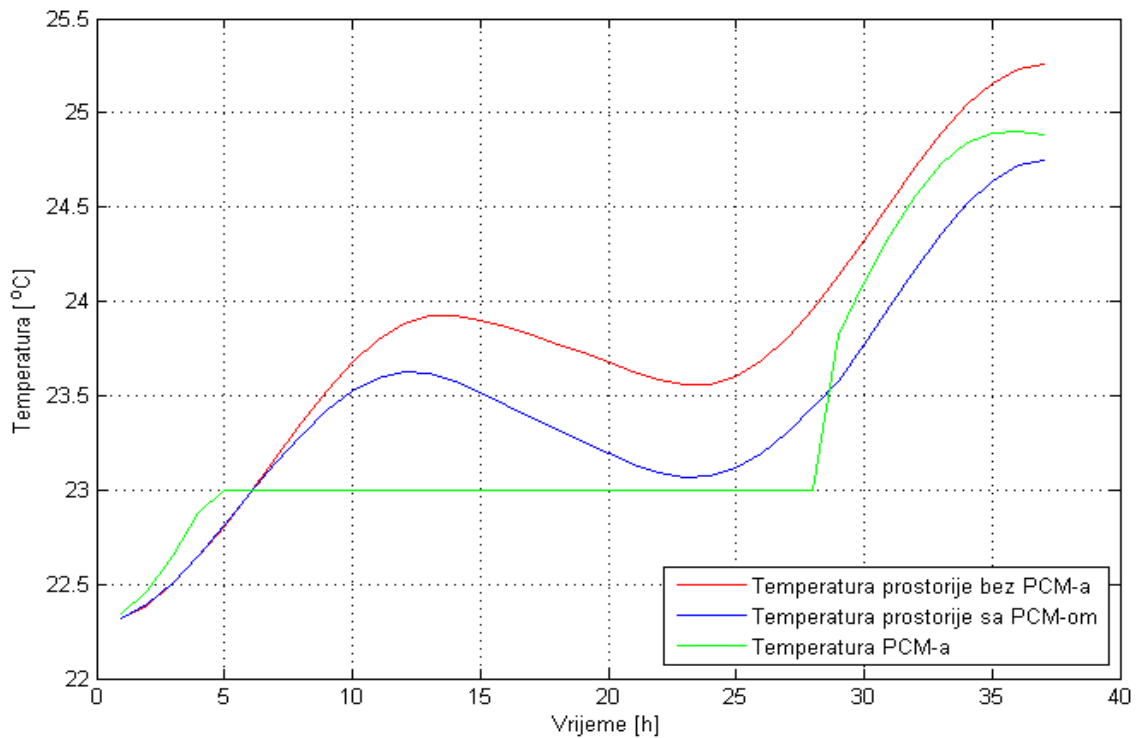
Hibridni model sa prethodno navedenim svojstvima je realiziran pomoću programskog jezika *HYSDEL* (HYbrid Systems DEscription Language) koji je sastavni dio *Hybrid Toolbox-a* implementiranog u *Matlab-u* [8].

3.5. Rezultati simulacije modela kuće

Pošto je modeliranje PCM-a bio glavni izazov pri modeliranju toplinskog modela kuće, prvo su prikazani rezultati temperatura gipskartonskih ploča bez i sa implementiranim PCM-om, te utjecaj PCM-a na temperaturu prostorije u kojoj se nalazi.



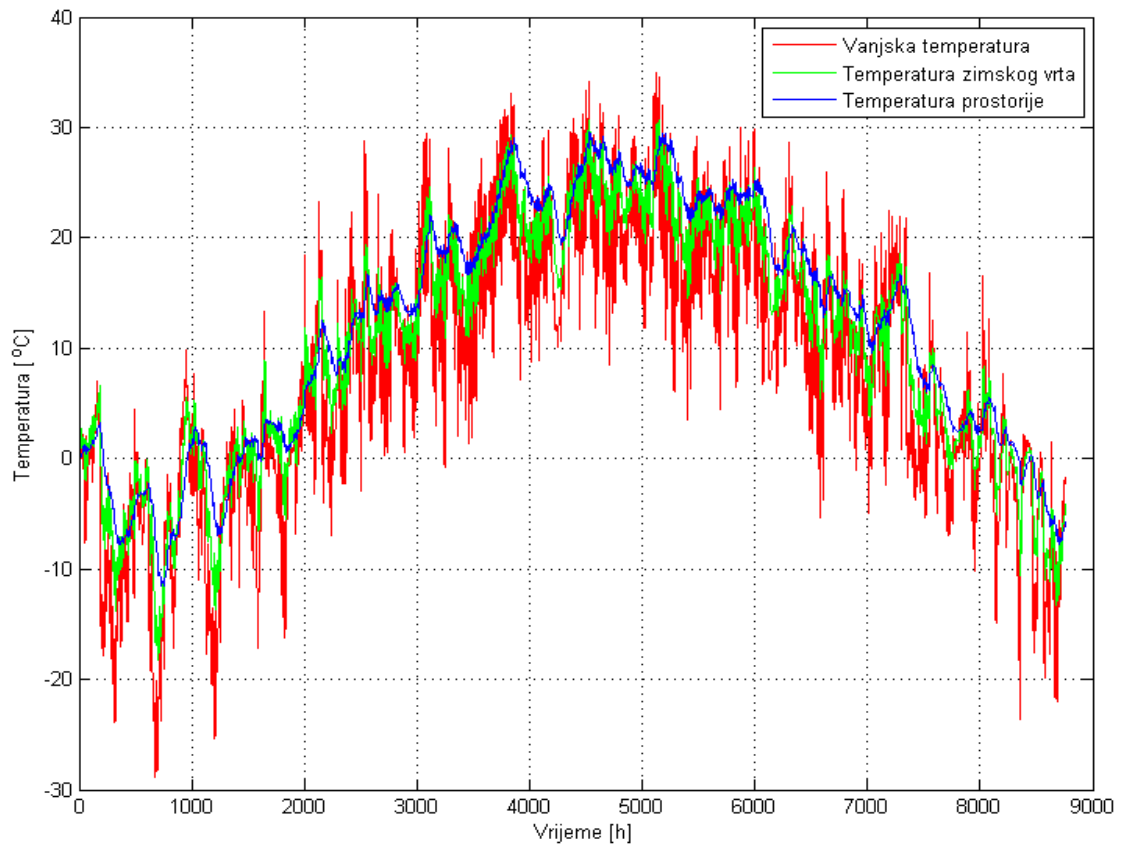
Slika 3.8 Temperature gipskartonskih ploča sa i bez PCM-a



Slika 3.9 Temperature glavne prostorije sa i bez korištenja PCM-a

Ponašanje PCM-a je dobro modelirano, što se može vidjeti na slici 3.8. Na slici 3.9 možemo vidjeti da otpuštena latentna toplina PCM-a pomaže da se temperatura prostorije održi u granicama ugodnosti u trajanju od skoro 24 sata, što je bolje od očekivanja projektnog tima. Ipak, mora se uzeti u obzir da u korištenom vremenskom intervalu vanjska temperatura nije bila posebno visoka, tako da možemo očekivati da PCM za vrijeme toplih ljetnih dana uspijeva manje vremena održati temperaturu u granicama ugodnosti. Ali i u tom slučaju PCM bi obavljao svoju funkciju, a to je da za vrijeme dana temperaturu drži temperaturu prostorije stabilnom. Naime, ideja projektnog tima je koristiti aktivno hlađenje/grijanje PCM-a koje bi preko noći pripremio PCM da obavlja svoju funkciju tijekom dana. Navedena ideja izlazi iz okvira ovog rada, te se u daljnjem tekstu neće obrađivati.

Na slici 3.10 su dani rezultati temperatura glavne prostorije i zimskog vrta kroz cijelu godinu. Iz slike se može zaključiti da se razvijeni model kuće ponaša u skladu s očekivanjima.



Slika 3.10 Temperature prostorija u kući kroz cijelu godinu

4. Sustav upravljanja grijanjem i hlađenjem kuće

Na temelju razvijenog toplinskog hibridnog modela kuće potrebno je koncipirati i dizajnirati sustav upravljanja grijanjem/hlađenjem glavne prostorije u kući. Sustav upravljanja je temeljen na modelskom prediktivnom upravljanju.

4.1. Modelsko prediktivno upravljanje

Modelsko prediktivno upravljanje (engl. Model Predictive Control, MPC) se naširoko koristi kao sredstvo za rješavanje velikih multivarijabilnih problema upravljanja u industriji. Regulator temeljen na MPC-u koristi model procesa za predikciju ponašanja sustava u budućnosti i trenutna mjerenja sustava za izračun upravljačke veličine koja će zadovoljiti sve zadane zahtjeve korisnika i eventualna ograničenja samog sustava.

MPC koristi matematički model procesa za predviđanje ponašanja sustava. Ta predviđanja se koriste za optimizaciju procesa kroz određeno vremensko razdoblje. Opći algoritam rada MPC-a je sljedeći:

1. Određuje se veličina predikcijskog horizonta N i vremenski interval T .
2. U trenutku kT , prethodni ulazi i izlazi procesa zajedno s modelom procesa se koriste za predviđanje budućih izlaza procesa kroz zadani predikcijski horizont.
3. Određuju se upravljački signali koji osiguravaju željeno ponašanje sustava.
4. Upravljački signal se provodi tijekom zadanog vremenskog intervala.
5. Nakon isteka vremenskog intervala, postupak se ponavlja od 2. koraka.

4.2. Optimizacija sustava upravljanja

Ideja upravljanja je minimizirati snagu potrebnu za održavanje temperature glavne prostorije u željenim granicama.

Jednadžbe modela kuće koje koristimo pri sintezi MPC-a su sljedeće:

$$u(k+1) = Ax(k) + B_1u(k) + B_d d(k) + B_2\delta(k) + B_3z(k)$$

$$E_2\delta(k) + E_3z(k) \leq E_1u(k) + E_d d(k) + E_4x(k) + E_5$$

Radi jednostavnosti sustava upravljanja, ograničenja isporuke snage aktuatora su zanemarena, tako da imamo samo ograničenja postavljena na temperaturu u prostoriji:

$$\mathbb{X}^N = \{X: \varepsilon_x X \leq \xi_x\}$$

Matrice ε_x, ξ_x definiraju se prema zahtjevima na ograničenja. U ovom radu ograničenja predstavljaju gornju, odnosno donju granicu temperature u prostoriji:

$$T_{min} \leq T \leq T_{max}$$

gdje su :

- $T_{min} = 293 [K]$,
- $T_{max} = 299 [K]$.

Da bi energija utrošena na grijanje i hlađenje bila što manja, što je i glavni zadatak optimizacije upravljanja, potrebno je minimizirati snage, tj. upravljačke signale aktuatora u svakom koraku na horizontu, iz čega slijedi:

$$\min_U \|U\| = \min_U \sum_{k=0}^{N-1} |u_k|$$

Pošto navedeni problem nije linearan jer sadrži apsolutnu vrijednost, uvedena je pomoćna varijabla ε , tako da dobijemo sljedeći linearni problem:

$$|u_k| \leq \varepsilon \rightarrow -\varepsilon \leq u_k \leq \varepsilon$$

Kada sakupimo sve zahtjeve koje smo postavili za naš sustav upravljanja, dobijemo da sustav mora zadovoljiti sljedećih 5 nejednadžbi:

$$\begin{aligned} B_1 u(k) + B_2 \delta(k) + B_3 z(k) &\leq X_{high} - Ax(k) - B_d d(k), \\ -B_1 u(k) - B_2 \delta(k) - B_3 z(k) &\leq -X_{low} + Ax(k) + B_d d(k), \\ -E_1 u(k) + E_2 \delta(k) + E_3 z(k) &\leq E_5 - E_4 x(k) - E_d d(k), \\ u(k) - \varepsilon &\leq 0, \\ -u(k) - \varepsilon &\leq 0. \end{aligned}$$

Zadani problem se može riješiti korištenjem *mixed integer linear programming-a (MILP)*, koji je postavljen sa sljedećim jednadžbama [9]:

$$\begin{aligned} \min \varepsilon &= \min S_2 V, \\ F_1 V &= F_2 + F_3 x(k) + F_d d(k). \end{aligned}$$

U našem slučaju matrice su sljedeće:

- $S_2 = [0 \ 1]$,
- $V = [u(k) \ \delta(k) \ z(k) \ \varepsilon(k)]^T$,
- $F_1 = \begin{bmatrix} B_1 & B_2 & B_3 & 0 \\ -B_1 & -B_2 & -B_3 & 0 \\ -E_1 & E_2 & E_3 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$, $F_2 = \begin{bmatrix} X_{high} \\ X_{low} \\ E_5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$, $F_3 = \begin{bmatrix} -A \\ A \\ E_4 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$, $F_d = \begin{bmatrix} -B_d \\ B_d \\ E_d \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$.

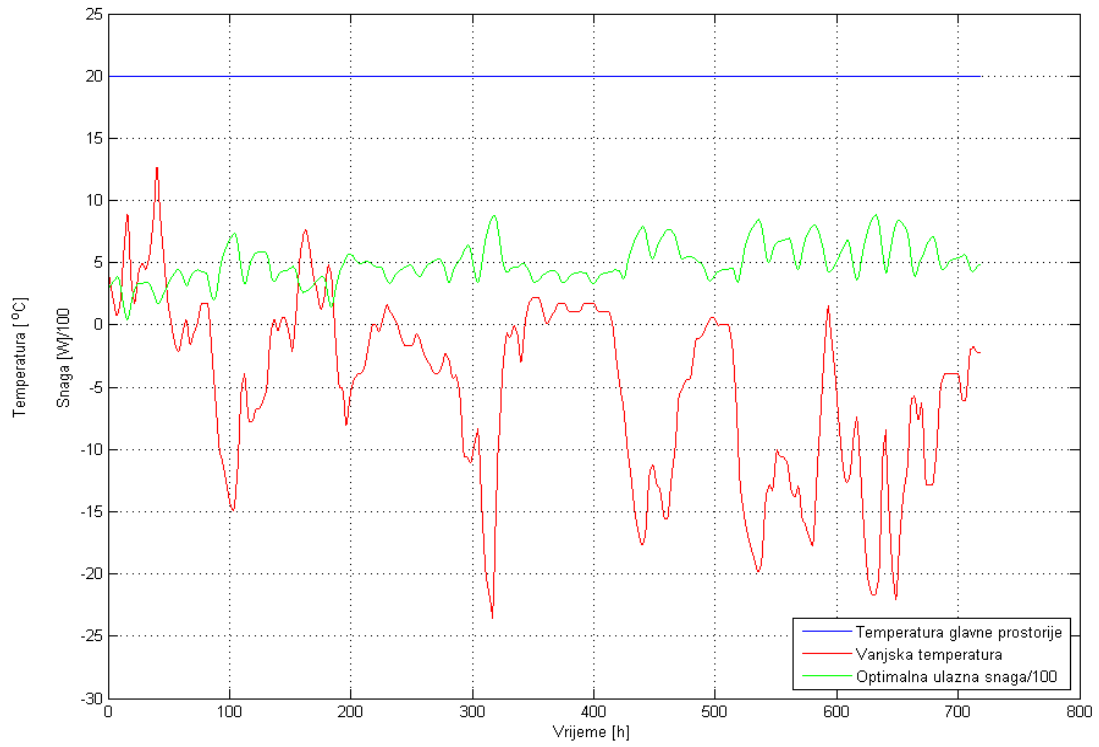
Navedene matrice predaju se Matlab funkciji *MPT_solveMILP* [10] ili *cplexmilp* [11] koja generira upravljački signal koji zadovoljava zadane zahtjeve.

Navedeni problem je postavljen pri predikcijskom horizontu $N = 1$. Pri svakom povećanju predikcijskog horizonta za jedan, u problem se dodaje dodatnih 5 nejednadžbi koje sustav upravljanja mora zadovoljiti, tj. broj nejednadžbi iznosi $5 \cdot N$. Sukladno tome, matrice koje se predaju prethodno navedenoj funkciji za generiranje upravljačkog signala se moraju prilagoditi, odnosno dimenzionirati za zadani N .

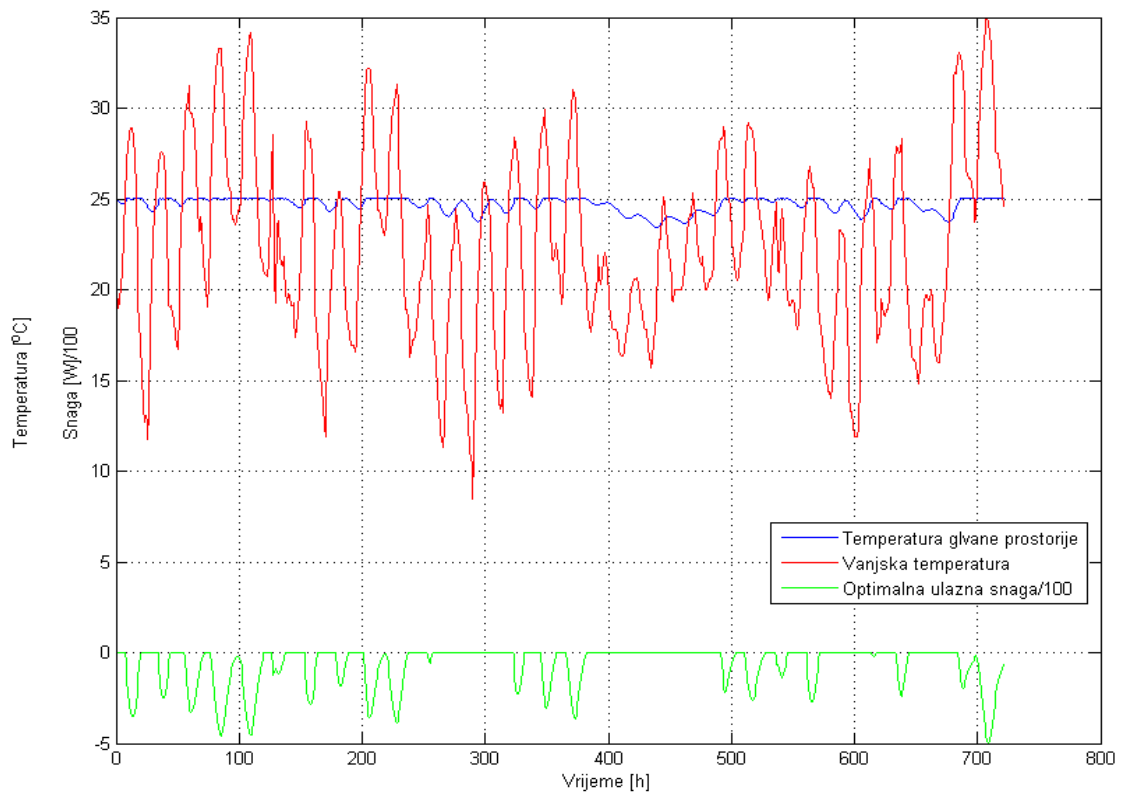
4.3. Rezultati sustava upravljanja

Rezultati dani u nastavku su dobiveni korištenjem razvijenog sustava upravljanja sa predikcijskim horizontom $N = 4$, te sa granicama od 273 do 278 K za temperaturu glavne prostorije u kući. Iako je prvotno bilo planirano optimalno upravljanje sa postavljenim predikcijskim horizontom od $N = 24$, takav sustav nije bilo moguće realizirati zbog ograničenih mogućnosti korištenih funkcija u *Matlabu*, odnosno korištenih *solvera* pomoću kojih funkcije izračunavaju upravljački signal. Solveri koji su se koristili su glpk i cplex solveri. Pošto za vrijeme izrade ovog diplomskog rada nije bilo moguće nabaviti druge *solvere* koji bi ispunili postavljene zahtjeve, dani su rezultati upravljanja sa najvećim predikcijskim horizontom pri kojem su funkcije radile, tj. pri $N = 4$.

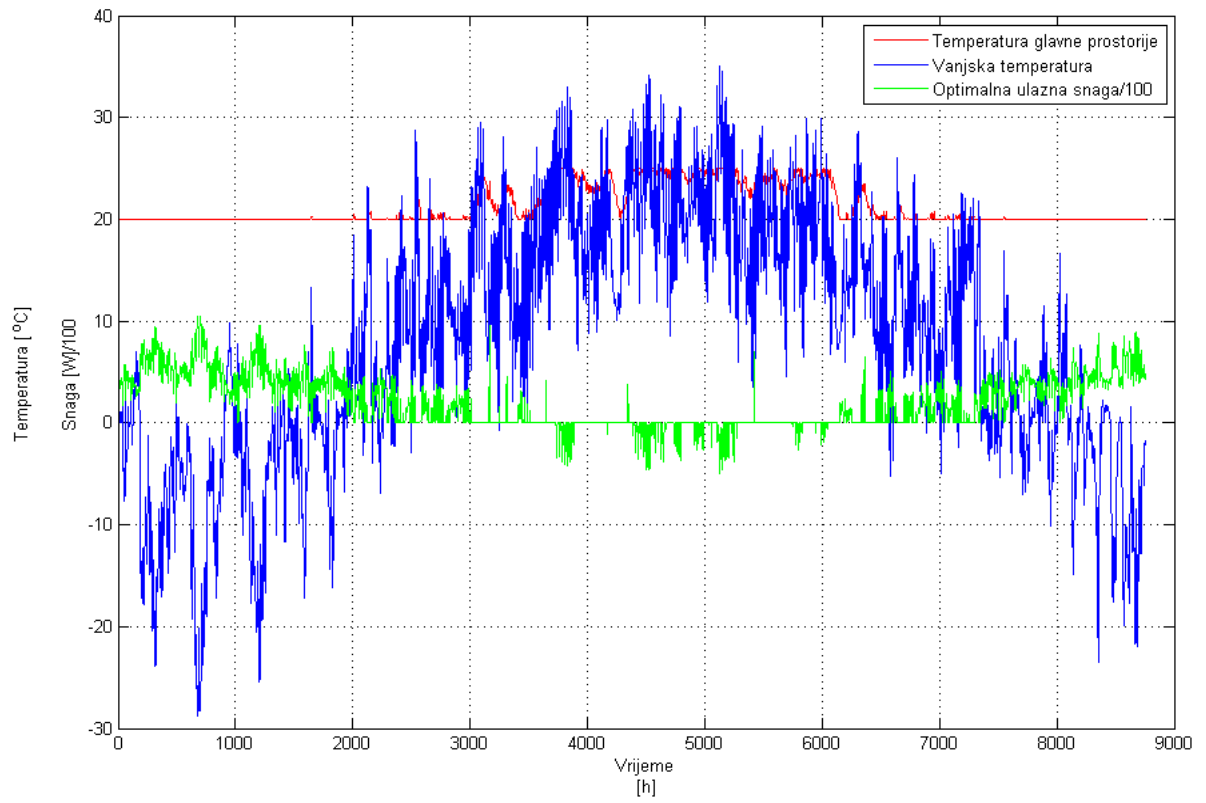
Na slikama 4.1 i 4.2 možemo vidjeti kako sustav upravljanja funkcionira zimi, odnosno ljeti, dok se na slici 4.3 može vidjeti kako sustav funkcionira tijekom cijele godine. Razvijeni sustav upravljanja obavlja posao u skladu s očekivanjima, a to je da zimi drži temperaturu na donjoj granici od 273 K, a ljeti na gornjoj granici od 275 K.



Slika 4.1 Optimalno upravljanje temperaturom glavne prostorije zimi



Slika 4.2 Optimalno upravljanje temperaturom glavne prostorije ljeti



Slika 4.3 Optimalno upravljanje temperaturom glavne prostorije kroz cijelu godinu

Zaključak

U sklopu ovog rada uspješno je modelirano toplinsko ponašanje kuće sa ovojnicom koja sadrži napredne materijale kao što je *phase change material* (PCM). Razvijeni model će biti od velike koristi timu da kroz simulacije u različitim vremenskim uvjetima provjeri funkcionalnu vrijednost osmišljenog modela kuće i eventualno napravi preinake na modelu kuće, u svrhu boljih rezultata, prije same izgradnje kuće na završnici natjecanja.

Na temelju razvijenog modela također je uspješno dizajniran sustav upravljanja grijanjem/hlađenjem kuće, temeljen na modelskom prediktivnom upravljanju. Ipak, treba naglasiti da u sklopu razvijenog sustava upravljanja nisu uzeta u obzir fizička ograničenja uređaja koji će biti izvor potrebne energije za grijanje/hlađenje kuće, te ograničenja sustava za raspodjelu te energije po kući. Uvođenje navedenih ograničenja bi trebala biti sljedeći korak prema konačnom cilju, a to je integracija razvijenog upravljanja s konkretnim aktuatorima grijanja/hlađenja koji će se upotrebljavati u kući.

Literatura

- [1] Službena stranica Solar Decathlon Europe 2014, <http://www.solardecathlon2014.fr/en>
- [2] Službena stranica Team UniZG, <http://membrain.com.hr/>
- [3] KENISARIN, M., MAHKAMOV, K., Solar energy storage using phase change materials, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, 9, 12 (2007), 1913-1965
- [4] WAGAS, A. i UD DIN, Z., Phase change material (PCM) storage for free cooling of buildings - A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 2 (2013), 607-625
- [5] Službena stranica Micronal[®] PCM, http://www.micronal.de/portal/basf/ien/dt.jsp?setCursor=1_290798
- [6] BEJAN, A., KRAUS, A. D., Heat transfer handbook, New Jersey: *John Wiley & Sons*, 2003.
- [7] BEMPORAD, A., Hybrid Toolbox User's Guide, 4 (2012)
- [8] TORRISI, F.D., BEMPORAD, A., HYSDEL - A tool for generating computational hybrid models, *IEEE Trans. Contr. Systems Technology*, 12, 2, 4 (2004), 235-249
- [9] BEMPORAD, A., MORARI, M., Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints, *Automatica*, 35, (1999), 407-427
- [10] KVASNICA, M., GRIEDER, P., BAOTIĆ, M., MORARI, M., Multi-Parametric Toolbox (MPT), 2003, <http://control.ee.ethz.ch/hybrid/mpt/>
- [11] ILOG, Inc. CPLEX User Manual, <http://www.ilog.com>

Sažetak

Sveučilište u Zagrebu po prvi puta sudjeluje na međunarodnom sveučilišnom natjecanju *Solar Decathlon Europe*, čiji je cilj izgradnja samoodržive kuće. Kako se u sklopu dizajna kuće dizajnira i inovativna ovojnica kuće, koja u sebi uključuje i napredne materijale, poput materijala s talištem u okolini sobne temperature (engl. Phase Change Material, PCM), u sklopu ovog diplomskog rada modelirano je toplinsko ponašanje prostorije s ovojnicom koja uključuje takve napredne materijale. Na temelju razvijenog modela koncipiran je i dizajniran sustav upravljanja grijanjem/hlađenjem kuće koji se temelji na modelskom prediktivnom upravljanju.

Ključne riječi: Solar Decathlon Europe, phase change material, PCM, toplinski proces u stambenom objektu, modelsko prediktivno upravljanje, MPC, energetski efikasno upravljanje

Summary

University of Zagreb is participating for the first time on an international university competition *Solar Decathlon Europe*, which main goal is to build a sustainable home. As a part of the design house, innovative membrane of the house is designed, which in itself includes advanced materials, such as phase change materials (PCM). In this thesis, thermal behavior of the room with a membrane that includes such advanced materials is modeled. Heating/cooling control system based on a developed model of the house is also designed in this thesis. Control system is based on the model's predictive control.

Keywords: Solar Decathlon Europe, phase change material, PCM, thermal process in the building, model predictive control, MPC, energy-efficient control