

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

*Janova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si*



Univerzitetni program Gradbeništvo,
Konstrukcijska smer

Kandidatka:

Urška Kocjančič

Fazno spremenljiv material v visokoizolativnem tankoslojnem stavbnem ovoju

Diplomska naloga št.: 3192

Mentor:

prof. dr. Aleš Krainer

Somentor:

prof. dr. Jožef Peternelj

Ljubljana, 27. 9. 2011

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisana Urška Kocjančič izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom: »Fazno spremenljiv material v visokoizolativnem stavbnem ovoju«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 16. 9. 2011

(podpis)

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	621.742.4(043.2)
Avtor:	Urška Kocjančič
Mentor:	Prof. dr. Aleš Krainer
Somentor:	Prof. dr. Jožef Peternelj
Naslov:	Fazno spremenljiv material v visokoizolativnem tankoslojnim stavbnem ovoju
Obseg in oprema:	79 str., 15 pregl., 49 sl., 54 en., 1 pril.
Ključne besede:	fazno spremenljiv material (PCM), latentno shranjevanje toplote, poletno pregrevanje stavb, ocena časa taljenja plasti PCM, tankoslojni stavbni ovoj

Izveček

V diplomskem delu obravnavam eno od možnosti latentnega shranjevanja toplote. Uporabljeni so fazno spremenljivi materiali (PCM) primerni za vgraditev v pasivne solarne sisteme. Ker PCM absorbirajo oziroma oddajajo toploto pri prehodih agregatnega stanja trdno-tekoče oziroma tekoče-trdno ob konstantni temperaturi, so v stavbnem ovoju uporabni kot stabilizatorji temperature v prostorih. V poletnem času na primer lahko preprečujejo pregrevanje stavbe. Prestavljeni so že izdelani ter preizkušeni konstrukcijski sklopi z različnimi PCM sistemi integriranimi v stene, strop in tla. Za izbran primer modularnega fasadnega sistema, je na podlagi izračunanega časa taljenja PCM določen najbolj primeren položaj plasti PCM v konstrukcijskem sklopu. Ocena časa taljenja je določena s poenostavljenim Stefanovim problemom ali problemom s pomično mejo za primer, ko je na začetku celotna plast PCM v trdnem agregatnem stanju v toplotnem ravnotežju pri temperaturi faznega prehoda, nato pa na robni ploskvi konstrukcijskega sklopa temperaturo nenadoma povišamo. PCM se začne taliti. Najprej se stali robna ploskev PCM, nato pa meja, ki ločuje območje trdnega in območje tekočega PCM potuje v notranjost plasti PCM. Glede na poletne temperaturne razmere je med tremi komercialno dostopnimi PCM izbran tisti z najbolj optimalno temperaturo faznega prehoda za zagotavljanje toplotnega udobja v prostoru. Analiza pokaže, da med preizkušenimi PCM, plast PCM s temperaturo faznega prehoda okoli 21°C na notranji strani konstrukcijskega sklopa najbolj upočasnjuje odzivanje konstrukcijskega sklopa na spremembe temperature okolice. Ob visokih zunanjih in notranjih temperaturah se izbran PCM tali dovolj počasi, da preko dneva ohranja konstantno temperaturo notranje obodne površine.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 621.742.4(043.2)
Author: Urška Kocjančič
Supervisor: Prof. Aleš Krainer, Ph. D.
Co supervisor: Prof. Jožef Peternelj, Ph.D
Title: Phase change material in thermally insulated lightweight building envelope
Notes: 79 p., 15 tab., 49 fig., 54 eq., 1 ann.
Key words: phase change material (PCM), latent heat storage, summer overheating of the buildings, estimation of the time of PCM layer melting, lightweight building envelope

Abstract

In my thesis I treat one of the possibilities of latent heat storage. I have used the phase-change materials (PCM), which are appropriate to be built in passive solar systems. When PCM are changing their phase from liquid to solid state or vice versa, they absorb or emit the heat at constant temperature. Therefore they can be used as stabilisers of temperature and during summer they can prevent the overheating of buildings. I present existing and tested construction complexes with different PCM systems that are integrated in walls, ceilings and floors. For the chosen example of modular facade system the most fitting position of PCM layer in the construction element is determined, based on calculated time of PCM melting. Estimated time of melting is determined with simplified Stefan or moving boundary problem. This goes for the case, where at the beginning the whole layer of PCM is in solid phase in thermal balance at temperature of phase change. Later, when the temperature at the surface of construction complex is raised, the PCM starts melting. Firstly the outer surface melts and then the phase front, which separates the areas of solid and liquid PCM, starts moving to the inside of PCM. Considering the summer temperature conditions, between three commercially accessible PCM the one with the most optimal temperature of phase transition was chosen, to ensure the heat comfort in the room. The analysis shows, that among tested PCMs, the most optimal slowdown of the response of the construction element on the temperature changes of the environment is, when using the layer of PCM with the temperature of phase transition around 21°C on the internal side of construction element. With high external and internal temperatures the melting of the chosen PCM is slow enough in order to maintain constant temperature of internal wall surface.

KAZALO VSEBINE

	UVOD	1
1	SHRANJEVANJE SONČNE ENERGIJE	3
1.1	Fizikalni principi shranjevanja toplote	6
2	SNOVI ZA LATENTNO SHRANJEVANJE TOPLOTE	13
2.1	Kriteriji za izbiro PCM.....	13
2.2	Vrste PCM.....	16
3	UPORABA SISTEMOV S PCM ZA ZAGOTAVLJANJE TOPLOTNEGA UDOBJA V STAVBAH	25
3.1	Potencial uporabe PCM v konstrukcijskih sklopih.....	25
3.2	Materiali z mikroenkapsuliranim PCM	30
3.3	Konstrukcijski sklopi z integriranim PCM sistemom.....	35
3.3.1	Stropni sistemi	35
3.3.2	Sistemi integrirani v stene	37
3.3.3	Sistemi integrirani v tla	40
4	IZBIRA NAJBOLJ PRIMERNEGA PCM TER POZICIJE PLASTI PCM V KONSTRUKCIJSKEM SKLOPU NA PRIMERU IZBRANE STENSKE KONSTRUKCIJE	42
4.1	Prenos toplote skozi konstrukcijski sklop	42
4.2	Model stenske konstrukcije	48
4.3	Izbira optimalnega PCM in optimalne cone plasti PCM za izbran konstrukcijski sklop.....	52
4.3.1	5 – komorni sistem polnjen s CO ₂ brez PCM.....	53
4.3.2	5 – komorni sistem polnjen s CO ₂ in s plastjo PCM	57
4.3.2.1	Ocena časa taljenja plasti PCM z debelino b ob pri znani temperaturi roba plasti PCM.....	58
4.3.2.2	Izbira najprimernejšega PCM in položaja plasti PCM glede na izračunan čas taljenja	68
	ZAKLJUČEK	76
	VIRI	76

KAZALO SLIK

<i>Slika 1: Povprečni letni globalni obsev za Slovenijo [12].....</i>	<i>3</i>
<i>Slika 2: Povprečno sončno obsevanje v Ljubljani; levo - povprečno mesečno sončno sevanje; desno - povprečno urno sončno sevanja za januar in junij [11]</i>	<i>3</i>
<i>Slika 3: Časovno spreminjanje razpoložljive sončne energije in potrebne energije [2]</i>	<i>4</i>
<i>Slika 4: Metode shranjevanja toplote</i>	<i>5</i>
<i>Slika 5: Diagram segrevanja snovi, ki ga opisujejo enačbe (1.7) do (1.10)</i>	<i>8</i>
<i>Slika 6: Fazni prehod trdno- kapljevinsko agregatno stanje za kristalne in amorfne snovi [4]</i>	<i>9</i>
<i>Slika 7: Razmerje med debelinami sten iz različnih materialov za enako količino shranjene toplote</i>	<i>11</i>
<i>Slika 8: Sprememba temperature ki je potrebna, da snov shrani enako količino toplote</i>	<i>12</i>
<i>Slika 9: Temperaturne karakteristike latentnih in senzibilnih hranilnikov toplote</i>	<i>12</i>
<i>Slika 10: Razredi materialov za shranjevanje latentne toplote</i>	<i>16</i>
<i>Slika 11: Razredi PCM s specifično talilno toploto in temperaturo taljenja [8].....</i>	<i>17</i>
<i>Slika 12: Linije toplotnega udobja z upoštevanjem temperature zraka, temperature obodnih površin, hitrosti gibanja zraka in RH=50% za srednje aktivne uporabnike z lahкими oblačili [13] ...</i>	<i>26</i>
<i>Slika 13: Glavni dejavniki, ki vplivajo na temperaturo v stavbi.....</i>	<i>27</i>
<i>Slika 14: Nihanje temperature na zunanji strani stene (Te) in na notranji strani stene (Ti). v je faktor dušenja temperature, η pa temperaturna zakasnitev [15]</i>	<i>28</i>
<i>Slika 15: Konstrukcijski sklopi z možnostjo vstavitve PCM (1,4,5), dolgotrajni latentni solarni hranilnik toplote za ogrevanje s toplo vodo (2), ventilacijski sistem, ki segreje svež zunanji zrak (3) [5]</i>	<i>30</i>
<i>Slika 16: Mikrokapsule parafina inkorporirane v mavčno ploščo [17] ter mavčna plošča Knauf PCM SmartBoard® z vgrajenim Micronal® PCM podjetja BASF [17]. Vsak kvadratni meter 15mm debele mavčne plošče ima po podatkih proizvajalca vgrajene 3kg PCM s temperaturo taljenja 21, 23 ali 26°C. Masa plošče je 11,5kg/m², kar pomeni, da lahko shrani približno 330kJ/m² toplote.</i>	<i>30</i>
<i>Slika 17: Testni stavbi raziskave [18].....</i>	<i>31</i>
<i>Slika 18: Temperatura površine zahodnega zidu v notranjosti prostora v primerjavi z zunanjo temperaturo zraka ob konstantno zaprtih oknih [18]</i>	<i>31</i>
<i>Slika 19: Temperatura površine južnega zidu v notranjosti prostora in toplotni tok čez južni zid, merjen v sredini zidu, ob konstantno zaprtih oknih, podatki za iste 3 dni kot pri sliki 18 [18]</i>	<i>32</i>
<i>Slika 20: Testne škatle raziskave [19]</i>	<i>33</i>
<i>Slika 21: Temperatura površine betonskih tal za dneve 27.8.2008 do 3.9.2008 [19]</i>	<i>33</i>
<i>Slika 22: Testni sobi raziskave [20]</i>	<i>34</i>
<i>Slika 23: Temperatura izmerjena v sobi s ploščami DuPont™ Energain® in brez [20]</i>	<i>34</i>

<i>Slika 24: Sistem spuščenega stropa s PCM in njegovo delovanje [21].....</i>	<i>35</i>
<i>Slika 25: Spuščen strop s sistemom Cooldeck PCM podjetja Climator [22]</i>	<i>36</i>
<i>Slika 26: Princip delovanja sistema Cooldeck PCM ponoči in podnevi [22]</i>	<i>36</i>
<i>Slika 27: Zunanja temperatura zraka in temperatura zraka v prostoru pred vgraditvijo sistema Cooldeck PCM (levo) in po aktivaciji sistema (desno) v stavbo na sliki levo v Veliki Britaniji [22].....</i>	<i>36</i>
<i>Slika 28: Stropni sistem s panelom z mikroenkapsuliranim PCM in sistemom vodnih cevi za hlajenje [23].....</i>	<i>37</i>
<i>Slika 29: Stropni sistem s panelom Knauf PCM SmartBoard® in sistemom vodnih cevi za hlajenje [24].....</i>	<i>37</i>
<i>Slika 30: Stenska konstrukcija [2]</i>	<i>38</i>
<i>Slika 31: Fasadni panel brez plasti PCM (levo), fasadni panel s 2,5cm plastjo PCM na notranji strani (desno) [28]</i>	<i>38</i>
<i>Slika 32: Testni celici z dolžino stranice 90mm. Vse stranice so enake, razen južno orientirana stranska ploskev ima vgrajeno okno. Desno je prikazana lokacija senzorjev, ki so podobno nameščeni tudi v panel brez PCM [28].....</i>	<i>39</i>
<i>Slika 33: Dnevni potek temperatur zunanjega zraka ter notranje ploskve panela z in brez PCM [28]</i>	<i>39</i>
<i>Slika 34: Talni sistem s kapsulami PCM TEA 29 Capsules [29]</i>	<i>40</i>
<i>Slika 35: Hlajenje tal ponoči (levo), hladna tla hladijo prostor podnevi (desno) [30].....</i>	<i>41</i>
<i>Slika 36: Stacionarni prehod toplote skozi ravno štiri-plastno steno.....</i>	<i>44</i>
<i>Slika 37: Večja termična difuzivnost a pomeni, da se bo pri skokoviti spremembi vstopnega toplotnega toka q_1 izstopni toplotni tok q_2 hitreje ustalil.</i>	<i>47</i>
<i>Slika 38: Fasadna konstrukcija [25]</i>	<i>49</i>
<i>Slika 39: PCM vgrajen v zunanjo (A), sredinsko (B) ali notranjo cono (C) konstrukcijskega sklopa ..</i>	<i>50</i>
<i>Slika 40: Meritve ohlajanja in strjevanja komercialnega parafina RT27 [8] ter aproksimacija uporabljena v računu v poglavju 4.3. Z entalpijo 0J/g je določen staljen PCM, ki ne more več shraniti latentne toplote.</i>	<i>51</i>
<i>Slika 41: Površinska temperatura horizontalno postavljene temno rjave jeklene pločevine [26]</i>	<i>52</i>
<i>Slika 42: Časovno odvisen temperaturni profil plasti CO₂</i>	<i>55</i>
<i>Slika 43: Temperaturni profil v plasti CO₂ in v plasti betona pri t = 5min, če ima celotna plast začetno temperaturo 24°C, nato pa se na zunanjem robu temperatura nenadno zviša na 40°C.</i>	<i>56</i>
<i>Slika 44: Segrevanje polneskončne plasti PCM. Ko se temperatura dvigne nad temperaturo faznega prehoda T_{fp} se začne robna plast PCM taliti. Meja taljenja se je po nekem času premaknila za xM od roba.</i>	<i>60</i>

- Slika 45: Taljenje PCM-ja v zunanji komori. Na začetku je cel konstrukcijski sklop pri temperaturi faznega prehoda ($T_{fp}(A1)=30^{\circ}\text{C}$, $T_{fp}(A2)=26^{\circ}\text{C}$, $T_{fp}(A3)=21^{\circ}\text{C}$), ko temperaturo na površini $x=0$ povečamo na $T_z=T_0=40^{\circ}\text{C}$, se PCM prične taliti. Ko $x_M = b$ je staljena celotna plast PCM. 62*
- Slika 46: Premikanje fazne meje x_M , dokler po 3,42 urah ni staljena celotna plast PCM RT31..... 63*
- Slika 47: Temperaturno stanje v 5-komornem sistemu med taljenjem PCM-ja v sredinski komori. Na začetku je cel konstrukcijski sklop pri temperaturi faznega prehoda ($T_{fp}(B1)=30^{\circ}\text{C}$, $T_{fp}(B2)=26^{\circ}\text{C}$, $T_{fp}(B3)=21^{\circ}\text{C}$), ko temperaturo na površini $x=0$ povečamo na $T_z=40^{\circ}\text{C}$, se robna plast PCM $x = b_{CO2} = 4\text{cm}$ segreje do $T_0 > T_{fp}$ in PCM se prične taliti. Ko $x_M = b$ je staljena celotna plast PCM..... 64*
- Slika 48: Temperaturno stanje v 5-komornem sistemu med taljenjem PCM-ja v notranji komori. Na začetku je cel konstrukcijski sklop pri temperaturi faznega prehoda ($T_{fp}(C1)=30^{\circ}\text{C}$, $T_{fp}(C2)=26^{\circ}\text{C}$, $T_{fp}(C3)=21^{\circ}\text{C}$), ko temperaturo na površini $x=0$ povečamo na $T_z=40^{\circ}\text{C}$, se robna plast PCM $x = b_{CO2} = 8\text{cm}$ segreje do $T_0 > T_{fp}$ in PCM se prične taliti. Ko $x_M = b$ je staljena celotna plast PCM..... 66*
- Slika 49: Primeren položaj $b=2\text{cm}$ debele plasti PCM v konstrukcijskem sklopu, da pride do taljenja PCM in shranjevanja latentne toplote, če je temperatura zunanje površine $T_z=\text{const.}>T_{fp}$ in temperatura notranje površine $T_n=\text{const.}<T_{fp}$ 72*

KAZALO PREGLEDNIC

<i>Preglednica 1: Fizikalne lastnosti hidratnih soli [3, 9]</i>	18
<i>Preglednica 2: Fizikalne lastnosti anorganskih evtektikov [3,9]</i>	19
<i>Preglednica 3: Fizikalne lastnosti neevtektičnih anorganskih zmesi [3,9]</i>	20
<i>Preglednica 4: Fizikalne lastnosti parafinov [3,9]</i>	21
<i>Preglednica 5: Fizikalne lastnosti maščobnih kislin [3,9,10]</i>	22
<i>Preglednica 6: Fizikalne lastnosti sladkornih alkoholov [3]</i>	23
<i>Preglednica 7: Fizikalne lastnosti PEG [3]</i>	23
<i>Preglednica 8: Komercialni PCM.....</i>	24
<i>Preglednica 9: Termične difuzivnosti izolacijskih in drugih gradbenih materialov pri 20°C</i>	47
<i>Preglednica 10: Podatki proizvajalca o PCM RT21, RT27, RT31 [6].....</i>	50
<i>Preglednica 11: Karakteristike PCM RT31 glede na [2].....</i>	51
<i>Preglednica 12: V izračunu v poglavju 4.3.1 uporabljeni podatki za tri različne PCM s tremi različnimi temperaturami tališč</i>	52
<i>Preglednica 13: Lastnosti plina CO₂.....</i>	53
<i>Preglednica 14: Primerjalna preglednica rezultatov A, B in C</i>	69
<i>Preglednica 15: Potrebna oddaljenost izbranega PCM od zunanje površine 5-komornega sistema stavbnega ovoja ob temperaturi zunanje površine $T_z=40^{\circ}\text{C}$ in temperaturi notranje površine $T_n=24^{\circ}\text{C}$</i>	74

UVOD

Primerno celotno bivalno udobje v stavbah je zagotovljeno s toplotnim udobjem, kakovostjo zraka, zadostno količino dnevne svetlobe- svetlobnim udobjem in zaščito pred hrupom- zvočnim udobjem. Toplotno udobje določa termično dinamično ravnotežje med človekovim telesom in okoljem. Za posameznika predstavlja toplotno udobje stanje uma, ki izraža zadovoljstvo s toplotnim okoljem (ISO 7730:2005). Človek z metabolizmom iz hrane proizvaja toploto s katero vzdržuje stalno telesno temperaturo, energijo porablja za opravljanje mehanskega dela in prenaša toploto v okolico. Za zagotavljanje ravnotežja se metabolizem uravnava s pomočjo različnih mehanizmov prenosa toplote. Toplota, ki jo človek proizvede in odda v okolico, je tako odvisna od fizične aktivnosti in obleke ter od mikroklimatskih parametrov, kot so temperatura zraka, temperatura obodnih površin, hitrost gibanja zraka in relativna vlažnost zraka, tako imenovanih faktorjev toplotnega udobja. Toplotno udobne razmere v delovnem in bivalnem okolju so regulirane s številnimi standardi (npr. ISO 7730:2005) in pravilniki (npr. Direktiva EU o gradbenih proizvodih (89/106/EEC) – CPD, razlagalni dokument ID3 – zdravje, Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb (Ur. l. RS, št. 42/02)), saj je ustvarjanje toplotnega udobja ena od primarnih funkcij večine stavb, kar temeljno vpliva na stavbno zasnovo, izbiro materialov, orientacijo stavbe, načrtovanje ogrevanja in hlajenja prostorov in tako na celotno gradbeno industrijo. V diplomski nalogi se bom ukvarjala samo s temperaturo zraka in temperaturo obodnih površin, saj se za načrtovanje toplotnega udobja uporablja občutena ali operativna temperatura, ki je temperatura odvisna od temperature zraka v prostoru in srednje temperature obodnih površin prostora.

Stavbni ovoj ima poleg zagotavljanja zasebnosti in varnosti tudi funkcijo prilagajanja pretoka različnih energij med notranjim in zunanjim okoljem, pri čemer mora biti upoštevana časovna komponenta, saj se energijski tokovi spreminjajo tako dnevno, kot preko leta. V preteklosti so ljudje svoja bivališča gradili iz naravnih, lokalno dostopnih materialov, zgradbe prilagajali podnebnju ter izkoriščali naravno energijo okolice. Jame so bile primerna bivališča zaradi konstantne temperature čez celo leto, ki so jo omogočali masivni skalni previsi kot sezonska skladišča toplote. Rimljani so pred več kot 2000 leti cenili sposobnost kamna, da akumulira toploto in jo oddaja še potem, ko vir toplote že ugasne. Poznali so ogrevanje z dvojnimi tlemi, pri katerih je zgornji kamniti sloj stal na stebričkih, v vmesnem prostoru pa je krožil vroč zrak, ki so ga ogrevali v pečeh. Hiše v vročem in suhem podnebnju so imele zelo masivne stene, ki so preprečile velika dnevna nihanja temperature v notranjosti.

Danes je zaradi komercializacije trend vedno manjša debelina zunanje stene in majhna teža fasade, s čimer se povečajo uporabne površine, znižajo stroški transporta in skrajša čas montaže. Tankoslojni stavbni ovoj se sicer odraža v manjši masi elementa, vendar tudi v manjši sposobnosti akumulacije

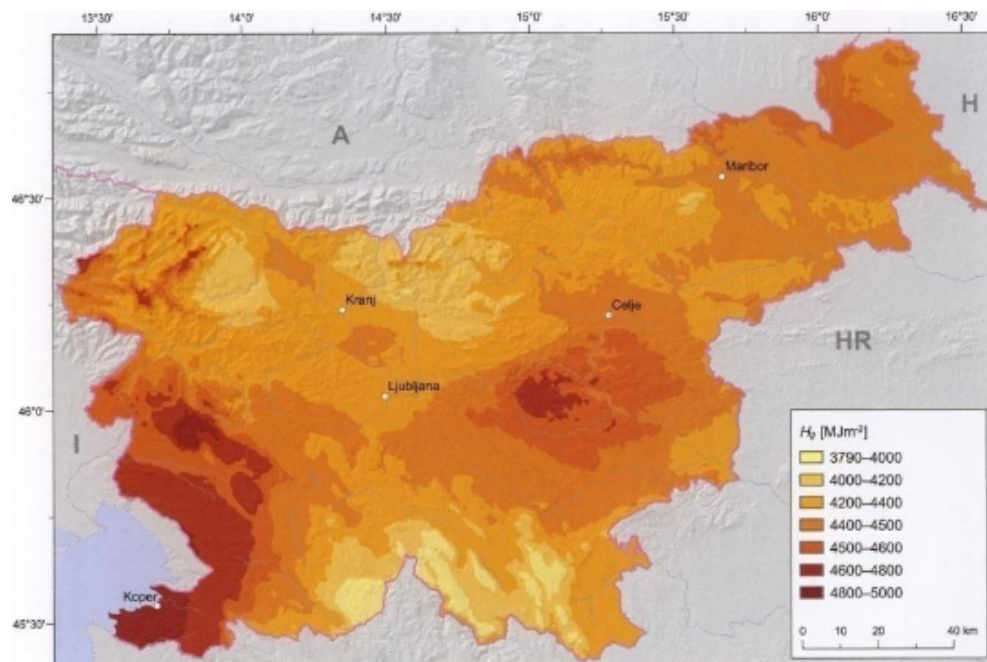
toplote, zato se stavbe lahko preko dneva pregrevaajo, ponoči pa preveč ohlajajo. Energija, ki je potrebna za izpolnjevanje sodobnih zahtev toplotnega udobja v stavbi, se je zelo povečala, še posebej v zadnjem času poraba elektrike za hlajenje in ogrevanje s klimatskimi napravami. Energetska preskrba človeštva temelji predvsem na fosilnih gorivih. Uporaba fosilnih goriv povzroča emisije CO₂, ki so glavni vzrok globalnega segrevanja. Poleg tega so zaloge fosilnih goriv, kot so premog, nafta in zemeljski plin, končne in nezanesljive. Princip ponudbe in povpraševanja z zmanjševanjem zalog narekuje naraščanje cen fosilnih goriv in vedno večjo energetska odvisnost od držav izvoznic fosilnih goriv. Zmanjšanje zalog fosilnih goriv in njihov vpliv na okolje je spodbudilo uporabo obnovljivih virov energije. Eden od najpomembnejših obnovljivih virov je sončna energija, ki jo lahko pretvorimo v energije, ki jih potrebujemo v stavbah.

Čedalje večje zahteve po energetske učinkovitosti ter želja po zdravem, prijetnem, varnem in učinkovitem notranjem okolju med drugim pogojujejo večjo izolativnost in akumulativnost neprozornih delov ovoja stavbe. Tako se odpirajo nove možnosti inovativni tehnologiji vgradnje materialov, ki shranjujejo toploto. Ena izmed rešitev je uporaba snovi, ki absorbira ali sprošča toploto pri spremembi agregatnega stanja v tankoslojnim fasadnem panelu, to so fazno spremenljivi materiali (PCM – Phase Change Material). Z uporabo PCM se lahko kompenzira majhna sposobnost shranjevanja toplote v tankoslojnim ovoju in s tem boljša regulacija temperature v stavbi.

Cilj naloge je ovrednotiti fasadni panel s PCM kot integralnim elementom pri segrevanju s sončnim obsevanjem. Glede na temperature, do katerih se zaradi močnega poletnega sončnega sevanja segreje zunanja površina konstrukcije, bo izbrana optimalna sestava lahkega tankega fasadnega panela. Račun bo narejen za tri različne, na trgu dostopne PCM, na notranji, v sredinski in na zunanji strani 5-komornega sistema polnjenega s CO₂ kot toplotnim izolatorjem. 5-komorni sistem je del konstrukcijskega sklopa, med kaljenim steklom na zunanji strani in mavčno-kartonasto ploščo na notranji strani. Za analizo toplotnega odziva konstrukcijskega sklopa je bil narejen računski model za čas, v katerem se konstrukcija ne pregreva oziroma je konstrukcijski sklop sposoben ohranjati konstantno temperaturo kljub višji zunanji temperaturi. V primerjavi s panelom brez vstavljenе plasti PCM bo primerjana toplotna stabilnost konstrukcijskega sklopa. Pričakujem, da se bo sposobnost shranjevanja toplote stavbnega ovoja, z vstavitvijo primerne PCM na primernem mestu, povečala in da se bo konstrukcijski sklop s PCM segreval ali ohlajeval počasneje kot konstrukcijski sklop brez PCM.

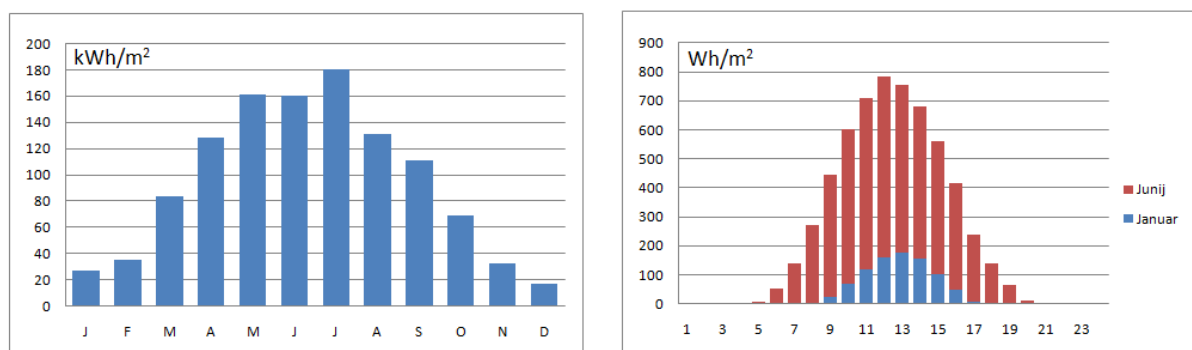
1 SHRANJEVANJE SONČNE ENERGIJE

Sonce je praktično neizčrpen vir obnovljive energije, ki je brezplačna, enakomerno razporejena brez geopolitičnih ovir in hkrati ne onesnažuje okolja.



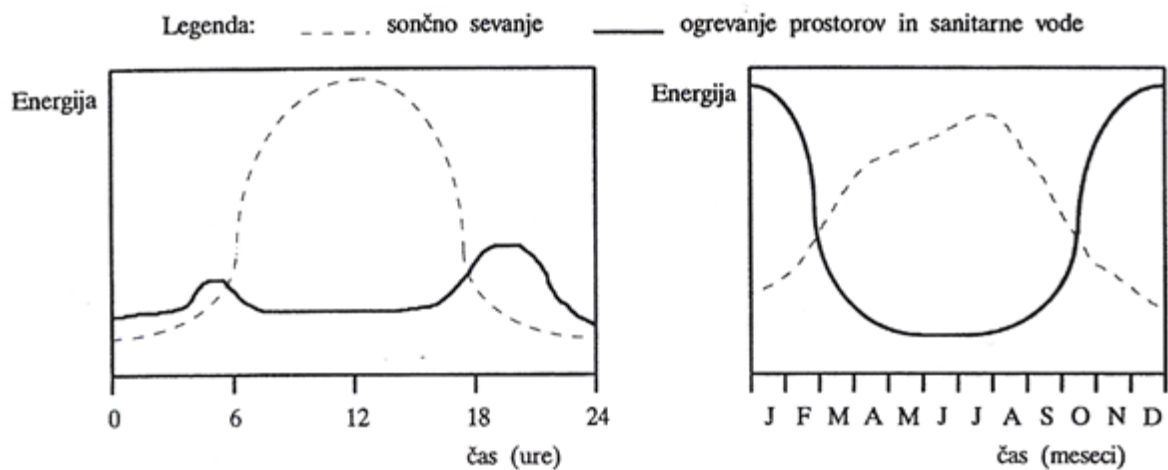
Slika 1: Povprečni letni globalni obsev za Slovenijo [12]

Druga značilnost sončne energije, ki jo lahko uvrstimo med slabosti, pa je časovna spremenljivost moči – sončna energija je neenakomeren vir energije. Sončno sevanje na enoto obsijane površine se spreminja glede na letni čas ter preko dneva zaradi vrtenja Zemlje okoli svoje osi (menjavanje dneva in noči) in vremenskih pojavov kot sta oblačnost in megla.



Slika 2: Povprečno sončno obsevanje v Ljubljani; levo - povprečno mesečno sončno sevanje; desno - povprečno urno sončno sevanja za januar in junij [11]

Energijo sončnega sevanja lahko izkoriščamo na dva načina: energijo lahko pretvorimo v toploto ali električno energijo. Glede na tehnologije pretvorbe sončnega sevanja v toploto ločimo pasivne in aktivne solarne sisteme. Pasivni solarni sistemi so vključeni v arhitektonsko-gradbeno strukturo stavb, v sedemdesetih letih so jih v ZDA označili z izrazom Passive Solar Architecture (PSA). To so integralni elementi zgradb, ki absorbirajo sončno energijo in jo pretvorijo v toploto za ogrevanje stavb: okna, zastekljeni zidovi, steklenjaki. Za delovanje ne potrebujejo dodatne energije in snovi za prenos toplote, ker gre v tem primeru za prenos toplote s sevanjem na notranjo stran prostora – zbrana toplota nato ogreva prostor in predmete v njem. Poleg sevanja se v PSA uporablja za prenos toplote tudi zrak, tako za gretje kot tudi za hlajenje. Aktivni solarni sistemi so naprave, ki s sprejemniki absorbirajo sončno energijo in jo v obliki toplote oddajo krožečemu fluidu – nosilcu toplote. Ta prenaša toploto od sprejemnika sončne energije v hranilnik toplote, ki ga potrebujemo, ker se razpoložljiva sončna energija ne pokriva s potrošnjo. Aktivni sistemi za delovanje potrebujejo dodatno energijo, ki je lahko tudi sončna. V diplomski nalogi bo analiziran fasadni panel kot element PSA za pretvarjanje sončnega obsevanja v toploto.

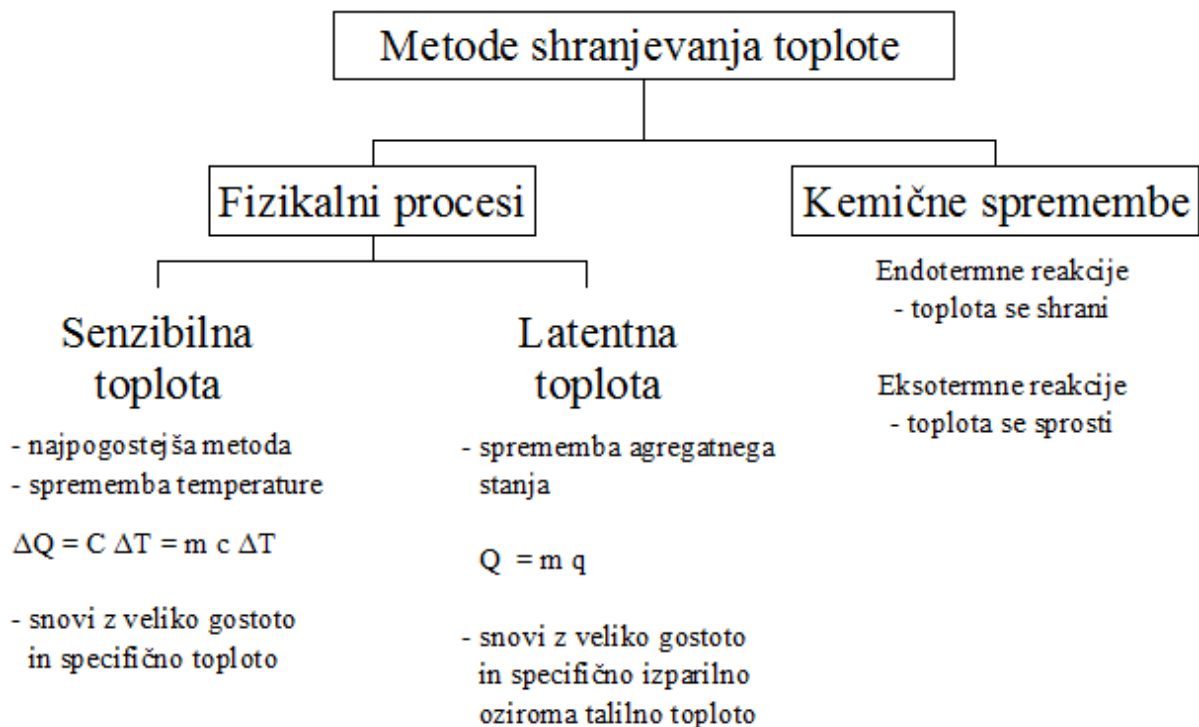


Slika 3: Časovno spreminjanje razpoložljive sončne energije in potrebne energije [2]

Potrebna energija za ogrevanje prostorov in toplo sanitarno vodo je največja ravno v času, ko je potencial sončne energije minimalen, kar prikazuje slika 3 [2]. Presežki sončnega sevanja pa se pojavijo, ko toplote ne potrebujemo, oziroma v toploto se takrat pretvori več sončnega sevanja kot so toplotne izgube stavbe. Večjo uporabo sončne energije lahko zagotovimo s shranjevanjem v obliki toplote ali s fotonapetostnimi sistemi, ki pretvarjajo svetlobno energijo neposredno v električno energijo. Shranjevanje toplote ima dvojno vlogo: varčevanje s toploto in preprečevanje pregrevanja. Pri aktivnih sistemih gre predvsem za sezonsko shranjevanje toplote, pri PSA pa predvsem za dnevno ali kratkotrajno shranjevanje toplote, ko viške toplote shranimo v konstrukcijskih sklopih in lokalnih hranilnikih. Za učinkovito delovanje PSA moramo torej pri arhitektonski zasnovi stavbe poleg

položaja elementov za sprejem sončnega obsevanja, primerne kroženja zraka za prenos toplote v stavbi in zaščite pred pregrevanjem, upoštevati tudi načelo shranjevanja toplote v gradbenih konstrukcijah. Na podlagi tega izberemo materiale, njihove položaje v konstrukcijskem sklopu ter način shranjevanja sončne energije.

Metode shranjevanja toplote so prikazane na sliki 4. Senzibilno shranjevanje je shranjevanje toplote s segrevanjem trdnih snovi (kamenje, opeka, beton, zemlja) ali tekočine (voda) – to je s povečanjem notranje energije gradbene konstrukcije. Za shranjevanje toplote se uporabi kar masa gradbene konstrukcije, zato so najprimernejše konstrukcije iz snovi z veliko gostoto (ρ) in specifično toploto (c). Toploto lahko shranimo tudi s povečanjem notranje energije pri taljenju snovi. To je latentna toplota, ki se shrani pri prehodu iz trdnega v tekoče agregatno stanje, oziroma se sprosti pri prehodu iz tekočega v trdno agregatno stanje. Tretji način shranjevanja toplote je shranjevanje toplote s kemičnimi spremembami. Toplota se shrani pri endotermnih kemijskih reakcijah, ko je energija produktov večja od energije reaktantov; in obratno, energija se sprosti pri eksotermnih reakcijah.



Slika 4: Metode shranjevanja toplote

1.1 Fizikalni principi shranjevanja toplote

Notranja energija snovi se lahko spreminja zaradi dela (mešanje vode, stiskanje snovi, zabijanje žeblija, električno delo), ki ga snov prejema ali oddaja, lahko pa jo spremenimo tudi tako, da snovi dovedemo toploto ali ji toploto odvezamo. To pravi tudi 1. zakon termodinamike ali energijski zakon:

$$dU = dA + dQ \quad (1.1)$$

$dA > 0$ snov delo prejme, poveča se mu notranja energija

$dA < 0$ snov delo odda, zmanjša se mu notranja energija

$dQ > 0$ snov toploto prejme (stik s toplejšo snovjo)

$dQ < 0$ snov toploto odda (stik s hladnejšo snovjo)

Notranja energija U je definirana kot vsota energij vseh vsebovanih delcev – molekul. Odvisna je torej od notranje zgradbe snovi in njenega stanja. Vsaka snov je sestavljena iz velikega števila molekul, ki se gibljejo, trkajo druga ob drugo, med njimi pa učinkujejo medmolekulske sile, zato je notranja energija sestavljena iz različnih deležev:

- Kemične in jedrske energije, ki jo ima snov zaradi spremembe sestave molekul ob kemijskih reakcijah in ob spremembi atomskih jeder in jo obravnavamo kot notranjo energijo posameznih molekul.
- Potencialne energije molekul zaradi medmolekulskih sil, ki se spreminja ob krčenju in raztezanju snovi ter ob spremembah agregatnega stanja snovi.
- Kinetične energije zaradi gibanja molekul v snovi.

$$U(\text{snovi}) = U_k(\text{termično gibajočih se molekul}) + U_p(\text{molekul zaradi sil med njimi}) + U_n(\text{molekul}) \quad (1.2)$$

Če se zgradba in notranja sestava samih molekul ne spreminjata, se pravi se v snovi ne dogajajo kemične reakcije in druge atomarne spremembe, k spremembi notranje energije snovi prispevata le sprememba kinetične energije gibajočih se molekul ter sprememba potencialne energije molekul zaradi sil med njimi, torej le prva dva člena desne strani enačbe (1.2).

Kaj se s posameznimi molekulami dogaja ne vemo natančno, lahko pa opazujemo snov, se pravi povprečno obnašanje velike množice molekul. To povprečje je kljub odstopanju posameznih molekul dovolj stalno, da ga lahko predstavimo s fizikalno količino – termodinamično količino. Na

mikroskopski (molekularni) stopnji so torej dogodki nedoločljivi, zato pa so makroskopski pojavi (povprečne množice molekul) stalni in jih lahko popišemo s termodinamičnimi količinami. Osnovne termodinamične količine:

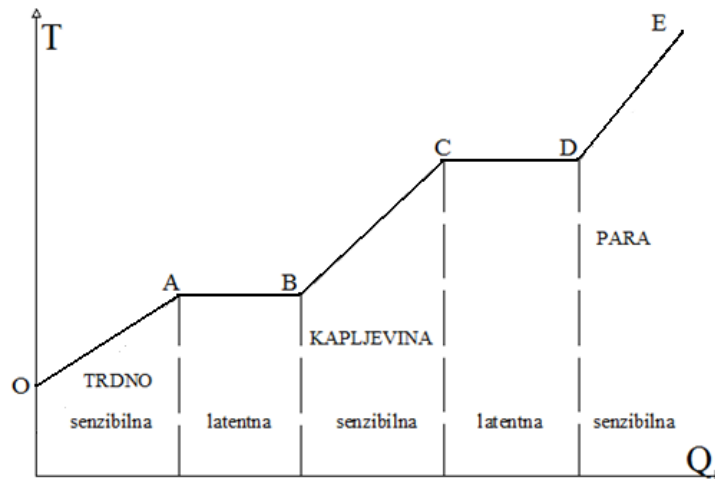
- Temperatura (T)
Sestavni delci snovi ne mirujejo, ampak se neprestano gibljejo. Temperatura je termodinamična količina, ki je povezana s povprečno kinetično energijo gibajočih se molekul. Čim živahneje se v povprečju gibljejo molekule, tem višja je temperatura snovi.
- Tlak (p)
- Masa (m), Volumen (V), Gostota ($\rho=m/V$)

Notranjo energijo snovi lahko spremenimo z dovajanjem ali odvajanjem toplote. Toplota je energija, ki brez dela preide iz enega telesa na drugo zaradi razlike v temperaturi. Samo po sebi je prehajanje neopazno, opazimo pa posledice. S trki med molekulami se notranja energija prek toplotnega stika prenaša iz toplejše snovi v hladnejšo snov, kar pomeni, da se notranja energija toplejše snovi zmanjšuje, notranja energija hladnejše snovi pa povečuje. Skozi snov se pretaka toplota – iz območja višje temperature v območje z nižjo temperaturo.

Pri toplotnih pojavih se zgradba in notranja sestava samih molekul ne spreminjata. Merilo za intenzivnost termičnega gibanja molekul je temperatura, ki je povezana s povprečno kinetično energijo gibajočih se molekul. V toplejši snovi (pri višji temperaturi) se molekule gibljejo z večjo povprečno kinetično energijo kot v hladnejši snovi (pri nižji temperaturi). Le pri absolutni ničli termično gibanje zamre in molekule imajo najnižjo možno kinetično energijo. Ko se snovi z različnima temperaturama med seboj dotikata, je torej termično gibanje na eni strani bolj živahno kot na drugi. Pri trkih si delci izmenjujejo kinetično energijo – pri trku hitrejše molekule s počasnejšo ta prevzame nekaj kinetične energije od prve in tako se energija prenaša. Kinetični člen notranje energije snovi je torej povezan s temperaturo T, potencialni člen pa je odvisen predvsem od povprečne razdalje med molekulami, torej od gostote oziroma volumna snovi: $U=U(T,V)$. Posledica dovajanja toplote je zvišanje temperature, raztezanje snovi ali sprememba agregatnega stanja. Pri spremembi agregatnega stanja se toplota torej ne porabi za zvišanje temperature, ampak za fazni prehod. Ob fazni spremembi se predvsem spremeni zgradba snovi, s čimer je povezana sprememba potencialne energije molekul zaradi sil med molekulami. Sledi, da se med spremembo agregatnega stanja ob nespremenjeni temperaturi spremeni notranja energija snovi [4].

Ob dovajanju toplote se materialu povečuje notranja energija. Posledica je povišanje temperature (ta toplota se imenuje senzibilna ali občutena toplota) ali sprememba agregatnega stanja (ta toplota se

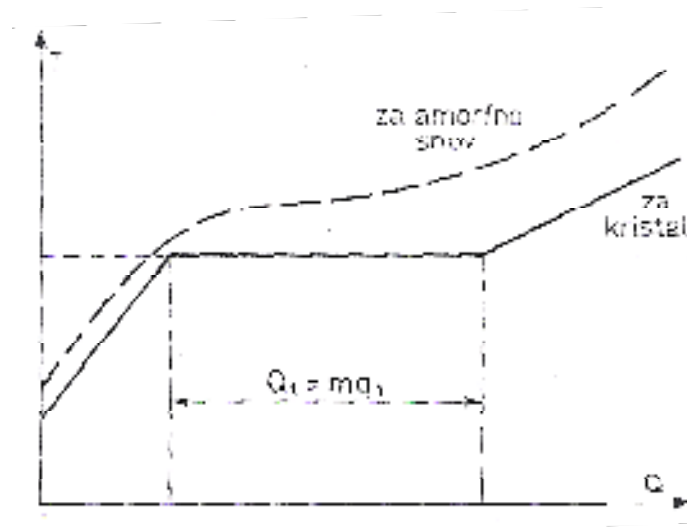
imenuje latentna toplota, skrita, nezaznavna toplota, oziroma v snovi skrita potencialna energija). Oba vpliva sta za kristalno snov pri konstantnem toplotnem toku P prikazana na sliki 5.



Slika 5: Diagram segrevanja snovi, ki ga opisujejo enačbe (1.7) do (1.10)

Ob segrevanju trdne snovi (dovajamo toploto Q), z molekulami urejeno razvrščenimi na dana mesta v kristalni mreži, ki lahko le nekoliko nihajo okrog ravnovesne lege, se njena temperatura najprej enakomerno povečuje in molekule vedno bolj intenzivno nihajo (področje $O-A$). Drugače povedano: makroskopska manifestacija vibracijske energije je toplota, katero okarakteriziramo s temperaturo. Pri tališču T_t je kinetična energija nihajočih molekul ravno zadostna, da zapustijo svoja mesta (A). Trdna snov se prične taliti. Med taljenjem (področje $A-B$) se temperatura in kinetična energija kljub segrevanju ne povečujeta, ampak se dovedena toplota (t.i. talilna toplota Q_t) porablja za povečanje potencialne energije molekul zaradi prehoda iz urejene zgradbe v neurejeno. Večina snovi s taljenjem poveča prostornino za nekaj % (izjema npr. led), saj je število molekul na enoto volumna v kapljevinski fazi manjše kot v trdni. Ker so relativne spremembe prostornine snovi ob taljenju majhne, se tališče le malo spreminja s tlakom. Ob segrevanju kapljevine, se povečuje intenziteta termičnega gibanja, a se molekule tekočine kljub temu ne razbežijo, ker jih medmolekulske sile držijo skupaj – povečuje se kinetična energija molekul in s tem temperatura snovi (območje $B-C$). Temperatura tekočine se povečuje do temperature vrelišča (T_v), pri kateri sta kapljevinska in plinasta faza v ravnovesju- obstajata v zmesi (območje $C-D$). Dovajanje toplote privede do točke, ko energija preseže privlačno silo med molekulami. Vrelišče narašča s tlakom. Izparilna toplota Q_i , ki se porabi za prehod iz kapljevinskega stanja v plinasto, se deloma naloži v povečano notranjo energijo snovi (poveča se potencialna energija v zvezi s spremembo zgradbe snovi), deloma pa krije delo, ki se opravi med povečanjem prostornine snovi zaradi vrenja. Para ima namreč precej večjo prostornino kot kapljevina iz katere nastane. V področju $D-E$ se temperatura povečuje na račun povečanja kinetične energije prosto gibajočih se molekul [4].

Prehod iz trdnega v kapljevinsko stanje ali obratno, je povezan z zgradbo snovi in je zato pri kristalnih trdninah bistveno drugačen kot pri amorfni (vosek, steklo, smola, različne plastike...). Amorfne trdnine imajo podobno zgradbo kot kapljevine. Te trdnine so pravzaprav zelo viskozne kapljevine, zaradi tega se med segrevanjem vedno bolj mehčajo in postopoma prehajajo v kapljevinsko stanje kot kaže slika 6; njihova temperatura bolj ali manj enakomerno narašča ob konstantnem toplotnem toku. Pravimo, da amorfne trdnine zvezno prehajajo v kapljevinsko stanje; ni ostre meje med enim in drugim stanjem. Amorfna talina se ne tali, se topi [4].



Slika 6: Fazni prehod trdno- kapljevinsko agregatno stanje za kristalne in amorfne snovi [4]

Celotna dovedena toplota od točke O do točke E na sliki 5 je podana z enačbo (1.10). Pri tem upoštevamo, da dodajamo toploto pri stalnem tlaku, kar pomeni da se snov pri segrevanju razteza in pri tem ob odzivanju obdajajoče snovi opravlja delo $dA = -pdV$. Dovedena toplota mora tako kriti tako povečanje notranje energije dU in delo, ki ga snov ob segrevanju oddaja:

$$dQ = dU - dA = dU + pdV \quad (1.3)$$

$$dQ = dU = mc_v dT; \quad \text{pri } V = \text{konst.} \quad (1.4)$$

$$dQ = mc_v dT + pdV = mc_p dT; \quad \text{pri } p = \text{konst.} \quad (1.5)$$

$$dQ = d(U + pV) = dH; \quad \text{pri } p = \text{konst.} \quad (1.6)$$

Entalpija H je termodinamično stanje snovi, $H = H(T, p)$. Lastnost entalpije je, da je pri procesih, ki potekajo pri stalnem tlaku, sprememba entalpije ravno enaka dovedeni ali odvzeti toploti. Če je $p = \text{konst.}$, entalpija ni odvisna od tlaka, ampak samo od temperature.

$$\frac{dT}{dQ} = \frac{1}{P} \frac{dT}{dt} \quad (1.7)$$

$$dQ = mc_p dT = P dt \quad (1.8)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{P}{mc_p} \quad \rightarrow \quad \frac{dT}{dQ} = \frac{1}{mc_p} \quad (1.9)$$

$$Q = m \cdot \left[\int_{T_0}^{T_A} c_{ps}(T) dT + q_t + \int_{T_A}^{T_B} c_{pl}(T) dT + q_i + \int_{T_B}^{T_C} c_{pv}(T) dT \right] \quad (1.10)$$

Pri tem velja $T_A = T_B = T_t$ in $T_C = T_D = T_v$.

Shranjevanje toplote s segrevanjem snovi je največ v uporabi. Produkt mase (m) in specifične toplote pri stalnem tlaku (c_p) imenujemo toplotna kapaciteta snovi (C), ki pove koliko toplote je potrebno, da se snov segreje za 1K, oziroma koliko toplote mora snov oddati, da se ohladi za 1K:

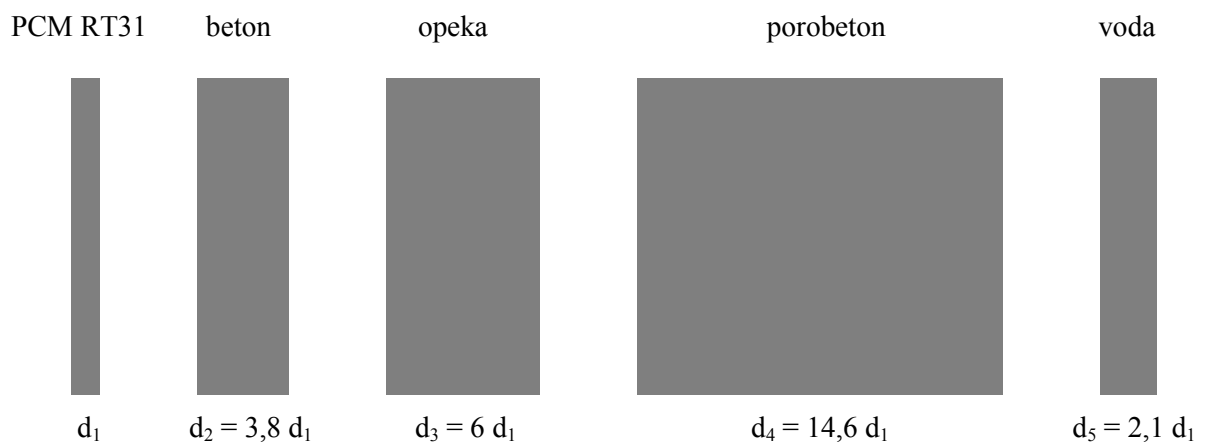
$$C = m c_p \quad (1.11)$$

$$Q = C \Delta T \quad \rightarrow \quad \Delta T = \frac{Q}{C} \quad (1.12)$$

Koliko se snov segreva oziroma ohlaja ob dovedeni ali odvedeni toploti je odvisno od toplotne kapacitete. Čim večja je toplotna kapaciteta snovi, tem manj se temperatura snovi spreminja zaradi toplotne izmenjave z okolico, kot kaže enačba (1.12). Snov, ki ima veliko toplotno kapaciteto je sposobna sprejeti veliko količino toplote ob majhni temperaturni spremembi [4]. Toplotna kapaciteta stavbe ima izravnalni vpliv na nihanje temperature. Snovi z veliko toplotno kapaciteto v stavbi imajo konstantno temperaturo, četudi prejemajo ali oddajajo nekaj toplote. Med gradbenimi materiali se kot hranilnika senzibilne toplote uporabljata predvsem beton in opeka. Odličen hranilnik je tudi voda, ki se lahko uporablja kot sestavni del konstrukcijskega sklopa. Debeli zidovi stavb se zaradi velike toplotne kapacitete podnevi počasi segrevajo, ponoči pa počasi ohlajajo. Velikost senzibilnega hranilnika toplote določimo kar z izbiro primerne debeline gradbene konstrukcije. Z razvojem tankoslojnih fasadnih sistemov, ki se odražajo v manjši teži, pa se je sposobnost shranjevanja toplote z maso konstrukcije zmanjšala. Njihova temperatura se spreminja skoraj sočasno s temperaturo zunanjega zraka. Tako se odpirajo možnosti latentnim hranilnikom toplote, katerih glavna prednost je

konstantna temperatura in velika količina toplote, ki jo na enoto mase lahko shranimo v teh snoveh. Za tehnično uporabo shranjevanja toplote je primeren le fazni prehod iz trdnega v kapljevinsko agregatno stanje, saj je sprememba volumna v sistemih s konstantnim pritiskom pri faznem prehodu iz kapljevinskega agregatnega stanja v paro prevelika. Materiali s faznim prehodom trdno-tekoče, ki so primerni za hranilnike latentne toplote imenujemo materiali s fazno spremembo ali kratko PCM (Phase Change Material).

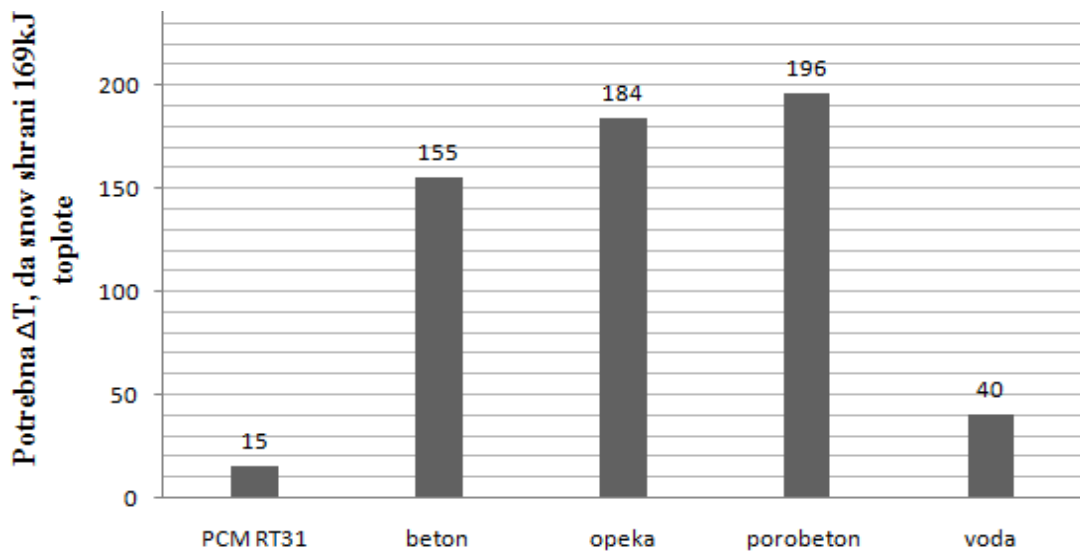
Na sliki 7 je prikazano razmerje potrebnih debelin konstrukcij iz različnih materialov za enako količino shranjene toplote po enačbi (1.10) pri spremembi temperature snovi iz 20°C na 35°C. Lastnosti materialov in izračuni so podani v prilogi A.



Slika 7: Razmerje med debelinami sten iz različnih materialov za enako količino shranjene toplote

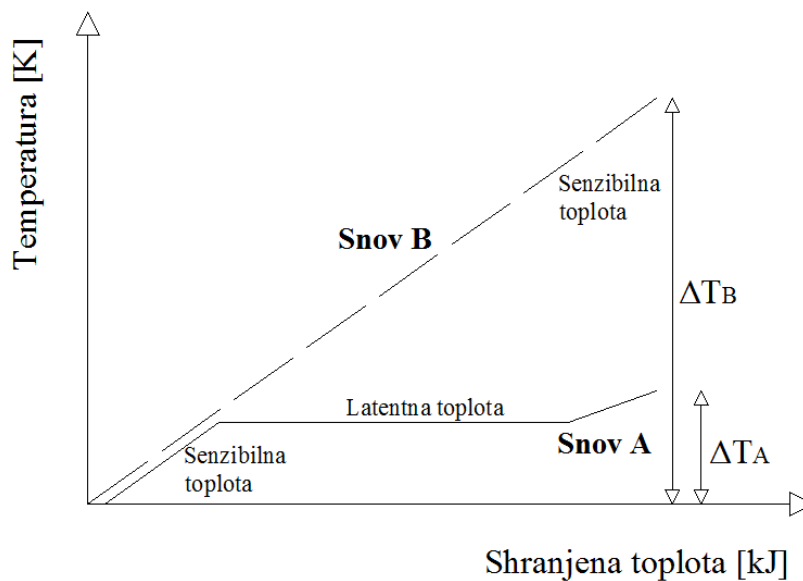
V primeru majhne spremembe temperature ($\Delta T = 15^\circ\text{C}$) v območju kjer poteka fazni prehod PCM iz trdnega v tekoče agregatno stanje, shrani PCM tudi do dvakrat več energije kot voda, 3,5-krat več kot beton in 6-krat več kot polna opeka. PCM hranilniki toplote so lahko torej dvakrat manjši kot vodni hranilniki, oziroma ob uporabi latentnih hranilnikov je debelina konstrukcije lahko veliko tanjša kot ob uporabi betona ali polne opeke kot materialov za senzibilno shranjevanje toplote. Ob tem moramo upoštevati še, da se temperatura spreminja s 24-urno periodo, del časa se toplota shranjuje v konstrukciji, del pa oddaja v prostor. Ob upoštevanju, koliko se amplituda temperature v konstrukciji glede na temperaturo na površini konstrukcije zmanjša, je za shranjevanje toplote v betonu ali opeki smiselna samo učinkovita debelina gradbene konstrukcije, ki pri shranjevanju toplote sodeluje. Latentni hranilniki toplote imajo večjo akumulacijsko sposobnost v določenem temperaturnem območju v primerjavi s senzibilnimi sistemi, saj se fazna sprememba vrši pri konstantni temperaturi pri kristalnih snoveh, pri amorfnih in realnih snoveh pa v temperaturnem intervalu.

Slika 8 kaže, kakšno temperaturno spremembo različnih materialov potrebujemo, da 1kg snovi shrani 169kJ toplote. Za izračun so uporabljeni podatki v prilogi A.



Slika 8: Sprememba temperature ki je potrebna, da snov shrani enako količino toplote

Na sliki 9 je potrebna temperaturna sprememba predstavljena še z grafom količine shranjene toplote v odvisnosti od temperature. Opazimo, da je za shranitev enake količine toplote v snovi, ki spreminja agregatno stanje (snov A), potrebna bistveno manjša sprememba temperature te snovi, kot za snov, ki shranjuje toploto senzibilno (snov B).



Slika 9: Temperaturne karakteristike latentnih in senzibilnih hranilnikov toplote

2 SNOVI ZA LATENTNO SHRANJEVANJE TOPLOTE

Iz slike 9 lahko razberemo potencialno uporabo PCM v ovoju stavbe za zagotavljanje toplotnega ugodja v stavbah:

- stabilizirajo temperature
- absorbirajo in oddajajo toploto pri konstantni temperaturi

Iščemo snov, ki bo shranila in oddala čim večjo količino energije pri konstantni temperaturi, poleg tega pa bo spremenila agregatno stanje pri tisti temperaturi, ki jo želimo mi. Najbolj poznana snov s fazno spremembo je voda, od naftne krize v 70. letih pa se je razvilo in proučevalo veliko PCM z različnimi snovnimi lastnostmi.

2.1 Kriteriji za izbiro PCM

Glede na zasnovo latentnega hranilnika in uporabo PCM izberemo ustrezen material. Kriteriji za izbor PCM so vezani na teoretične in eksperimentalne laboratorijske raziskave, kot tudi na izkušnje, pridobljene na že obravnavanih primerih. Izbran PCM mora imeti zahtevane termodinamične, tehnične in kemične lastnosti, ob upoštevanju ekonomskih kriterijev. Optimizacija lastnosti PCM z ozirom na podnebje, vremenske razmere, lego stavbe in specifikacije PCM, ki so na voljo na tržišču, je ena glavnih vprašanj uporabnosti PCM v stavbnem ovoju.

- TERMODINAMIČNI KRITERIJI:
 - Primerna temperatura faznega prehoda.

Točka ali interval prehoda snovi iz trdnega v kapljevinsko fazo in obratno je eden najpomembnejših parametrov za optimalno delovanje sistema pasivnega shranjevanja toplote s PCM. V odvisnosti od pričakovanega sončnega sevanja na določeni lokaciji za določeno orientacijo fasade in od hladilne ali ogrevalne funkcije sistema, izberemo PCM s temperaturo faznega prehoda, ki nam omogoča zeleno temperaturo v prostoru. Za ogrevanje s sončno energijo to pomeni, da naj bi bila temperatura faznega prehoda tako visoka, da se preko dneva PCM tali in akumulira viške dovedene toplote, ponoči pa je proces obraten – PCM se zaradi nižje zunanje temperature strdi in preko dneva akumulirano toploto prenese v prostor. Če je temperatura fazne spremembe prenizka, se PCM hitro stali in učinek ohranjanja konstantne temperature je ustavljen. Če pa je temperatura fazne spremembe previsoka, je

zmanjševalni vpliv na visoke temperature premajhen, oziroma je sistem neučinkovit, saj velikokrat sploh ne pride to taljenja PCM.

Peippo je objavil metoda za določitev optimalne temperature faznega prehoda PCM za PSA direktnega zajema, ko je panel s PCM pritrjen na notranje površine prostora [10]. Analitična in numerična metoda sta pokazali, da je optimalna temperatura faznega prehoda PCM za celinsko podnebje v času grelne sezone od oktobra do marca $1-3^{\circ}\text{C}$ nad temperaturo, ki jo želimo v prostoru. Tega izračuna ne moremo prenesti na v diplomski nalogi obravnavan primer z vstavitvijo PCM v fasadni ovoj, saj gre v primeru, ki ga obravnavam v diplomski nalogi, za indirektni zajem sončnega sevanja. V diplomski nalogi bo primernost vnaprej izbranega PCM z določeno temperaturo faznega prehoda ocenjena na podlagi izračunov v 4. poglavju, v odvisnosti od cone vstavitve PCM v konstrukcijski sklop.

- Velika talilna toplota $Q_t = m \cdot q_t$.

Večja kot je specifična talilna toplota q_t , več toplote lahko material shrani ob taljenju oziroma odda pri strjevanju ob konstantni temperaturi. Led (voda) ima eno najvišjih specifičnih talilnih toplot (335kJ/kg), vendar je njegovo tališče 0°C prenizko, da bi bilo uporabno za namene pasivnega ogrevanja. Zato pa je idealna za hladilne sisteme. Za PCM uporabljene v diplomski nalogi so s strani proizvajalca podane specifične toplote materiala za določeno temperaturno območje znotraj katerega pride do fazne spremembe. Material mora imeti tudi čim večjo gostoto ρ , da je za določeno enoto shranjene toplote potrebno čim manj materiala.

- Material se mora primerno taliti oziroma topiti.

Celoten volumen materiala se mora taliti pri točno določeni temperaturi ali znotraj ozkega temperaturnega pasu [2]. Imeti moramo tudi podatke o temperaturnem območju taljenja in temperaturnem območju strjevanja materiala, ki nista nujno enaka.

- Proces taljenja in strjevanja mora biti reverzibilen ter ciklično stabilen.

Material mora imeti veliko stopnjo ponovljivosti ciklov, brez večjih sprememb lastnosti snovi in sposobnosti shranjevanja toplote. O ciklični stabilnosti različnih PCM ni zadostnih podatkov. Solarni sistemi morajo imeti življenjsko dobo vsaj 20 let, kar za PCM kot dnevni hranilnik toplote pomeni več kot 7000 ciklov. Glavni problem ciklične stabilnosti je fazna separacija, zaradi neenakomernega taljenja takih PCM, ki imajo v molekuli kemično vezano vodo. Gre za hidratne soli, med katerimi je najbolj poznana Glauberjeva sol ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), pri katerih se del topi v raztopljeno vodno fazo, del pa ostane v trdni fazi in se ne

vrne v tekoče stanje. Ta del se useda na dno hranilnika in ne sodeluje več v ciklusu. Tako se učinkovitost sistema zmanjšuje.

V diplomski nalogi uporabljeni PCM so parafini v obliki voska za katere proizvajalec zagotavlja dolgo življenjsko dobo in ciklično stabilnost [6].

– Čim manjši efekt podhladitve

O podhlajeni fazi snovi govorimo, ko se kapljevinska snov ohladi pod temperaturo tališča, pa se vseeno ne strdi in tako ne odda latentne toplote. Vodo npr. lahko ohladimo pod 0°C, ne da bi zmrznila. Da snov zmrzne, se morajo njene molekule razporediti v kristalno mrežo, za kar pa so za začetek potrebna t.i. kristalizacijska jedra, ob katerih se molekule začno urejati [4]. Za PCM uporabljene v diplomski nalogi proizvajalec zagotavlja, da so brez efekta podhladitve [6].

• TEHNIČNI KRITERIJI:

– Inertna snov

Snov mora biti neaktivna in kompatibilna z ostalimi materiali. To pomeni, da naj ne bi imela medsebojnih vplivov z materialom v katerem PCM hranimo ter z materiali s katerimi lahko pride PCM v stik v primeru uhajanja v okolico. Snov prav tako ne sme povzročati korozije drugih konstrukcijskih materialov. Snov ne sme biti vnetljiva, eksplozivna in zdravju škodljiva tudi v najmanjših količinah. Za PCM uporabljene v diplomski nalogi proizvajalec zagotavlja kemično inertnost, netoksičnost in ekološko neoporečnost [6].

– Snov ne sme biti vnetljiva, eksplozivna in zdravju škodljiva tudi v najmanjših količinah.

– Majhna razlika volumna materiala v trdnem in kapljevinskem agregatnem stanju

Majhna sprememba volumna nam omogoča enostavnejše shranjevanje in konstruiranje sistema za vstavitev PCM. Volumska ekspanzija PCM uporabljenih v diplomski nalogi je do 16% [6].

– Kemična stabilnost

Za zagotovitev dolge življenjske dobe mora biti PCM kemično stabilen in ne sme biti nagnjen k razpadu na posamezne sestavine ob izpostavljenosti višjim temperaturam, sevanju, plinom...

- EKONOMSKI KRITERIJI:

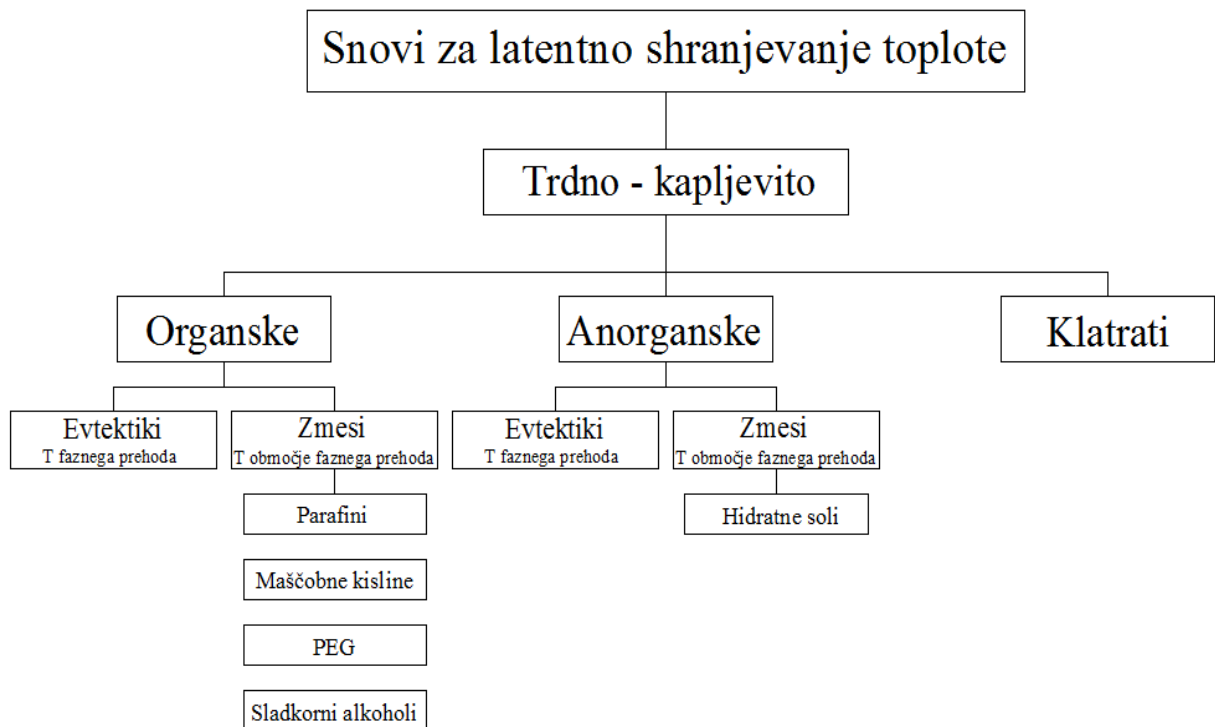
- Nizka cena

Cena PCM mora biti konkurenčna v primerjavi z ostalimi metodami shranjevanja toplote. Snov je lahko tudi draga, vendar ima tako zadovoljive lastnosti, da njegova uporaba močno izboljša lastnosti celotnega sistema in je tako stroškovno upravičena [2].

- Enostavno vzdrževanje in upravljanje sistema s PCM
- Cena sistema enkapsulacije PCM in celotnega sistema shranjevanja toplote mora biti ekonomsko upravičena.

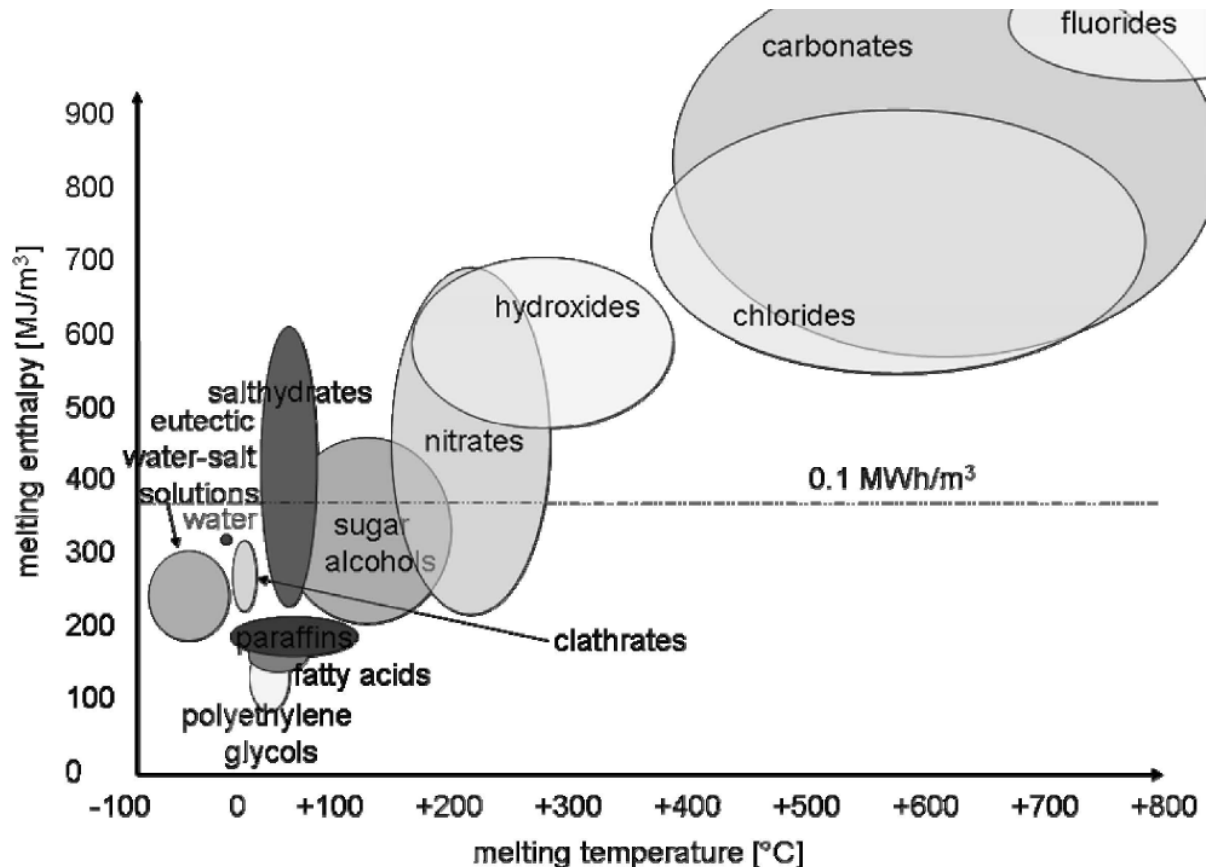
2.2 Vrste PCM

Zelo veliko zmesi in evtektikov (organskega in anorganskega izvora) je bilo testiranih kot potencialnih PCM, ampak samo redki izmed njih so zaenkrat na trgu. Glede na kriterije za izbiro PCMja, primerne za določeno aplikacijo, je težko najti snov, ki bi zadovoljevala celotno listo zahtev.



Slika 10: Razredi materialov za shranjevanje latentne toplote

Za uporabo PCM kot hranilnika sončne energije v stavbah v okviru PSA so primerne samo snovi s temperaturo faznega prehoda iz trdnega v tekoče agregatno stanje v intervalu med 15 do 90°C. Na sliki 11 so prikazani vsi razredi snovi s potencialno uporabo kot PCM s specifično talilno toploto [MJ/m³] in temperaturo taljenja [°C].



Slika 11: Razredi PCM s specifično talilno toploto in temperaturo taljenja [8]

Anorganski materiali pokrivajo celoten interval temperatur faznega prehoda, ki so primerne za uporabo PCM v stavbah. V povprečju imajo tudi veliko gostoto in višjo specifično talilno toploto kot organske snovi, vendar na primernost snovi za uporabo vplivajo tudi ostale lastnosti snovi. Glavna slabost anorganskih snovi je njihova nekompatibilnost s kovinami, saj v veliko kombinacijah pride do korozije.

Hidratne soli imajo temperaturo tališča med 5 in 130°C. Hidratne soli v preglednici 1 predstavljajo osnovo veliko komercialnim PCM.

Preglednica 1: Fizikalne lastnosti hidratnih soli [3, 9]

Material	Temperatura taljenja [°C]	Specifična talilna toplota q_t [kJ/kg]	Toplotna prevodnost λ [W/mK]	Gostota ρ [kg/m ³]
LiClO ₃ · 3H ₂ O Litijev klorat (I)	8	155	-	1530 (tekoče) 1720 (trdno)
Na ₂ CrO ₄ · 10H ₂ O Natrijev kormat	18	-	-	-
KF · 3H ₂ O Kalijev fluorid	18,5	231	-	1447 (tekoče, 20°C) 1455 (trdno 18°C)
Mn(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O Manganov (II) nitrat	25,8	125,9	-	1738 (tekoče, 20°C) 1728 (tekoče, 40°C) 1795 (trdno, 5°C)
CaCl ₂ · 6H ₂ O kalcijev klorid	29,3	171,19	0,54 (tekoče, 39°C) 1,088 (trdno, 23°C)	1562 (tekoče, 32°C) 1710 (trdno, 25°C)
LiNO ₃ · 3H ₂ O Litijev nitrat (V)	30	296	-	-
Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O Natrijev sulfat Glauberjeva sol	32	254	0,554	1485 (trdno)
Na ₂ HPO ₄ · 12H ₂ O Natrijev hidrogenfosfat (V)	35-44	280	0,476 (tekoče) 0,524 (trdno)	1442 (tekoče) 1522 (trdno)
Zn(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O Cinkov nitrat	36,4	147	-	-
K ₃ PO ₄ · 7H ₂ O Kalijev fosfat	45	-	-	-
Zn(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O Cinkov nitrat	45,5	-	-	-
Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O Kalcijev nitrat	42,7 47	-	-	-
Na ₂ HPO ₄ · 7H ₂ O Natrijev hidrogenfosfat (V)	48	-	-	-
Na ₂ S ₂ O ₃ · 5H ₂ O Natrijev tiosulfat (VI)	48-55	187	-	1670 (tekoče) 1750 (trdno)
Zn(NO ₃) ₂ · 2H ₂ O Cinkov nitrat	54	-	-	-
Na(CH ₃ COO) · 3H ₂ O Natrijev acetat	58	226	-	1280 (tekoče) 1450 (trdno)
NaOH · H ₂ O Natrijev hidroksid	58	-	-	-
Cd(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O Kadmijev nitrat	59,5	-	-	-

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 1

Fe(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O Železov nitrat	60	-	-	-
NaOH Natrijev hidroksid	64	227	-	1690
Na ₂ B ₄ O ₇ · 10H ₂ O Natrijev tetraborat Boraks	68,1	-	-	-
Na ₃ PO ₄ · 12H ₂ O Natrijev fosfat	69	-	-	-
Na ₂ P ₂ O ₇ · 10H ₂ O	70	184	-	-
Ba(OH) ₂ · 8H ₂ O Barijev hidroksid	78	265	0,653 (tekoče, 86°C) 1,255 (trdno, 56°C)	1937 (tekoče, 84°C) 2180 (trdno)
Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O Magnezijev nitrat (V)	89,9	149	0,49 (tekoče 95°C) 0,669 (trdno 56°C)	1550 (tekoče 94°C) 1636 (trdno 25°C)
MgCl ₂ · 6H ₂ O Magnezijev klorid	117	165	0,57 (tekoče 120°C) 0,704 (trdno 110°C)	1450 (tekoče 120°C) 1569 (trdno 20°C)

Hidratne soli so kemijske spojine, ki imajo v molekuli kemično vezano vodo. Poznamo jih po formuli $M \cdot nH_2O$, kjer M predstavlja anorgansko snov. Sestavljene so iz več komponent, kar potencialno vodi v fazno separacijo in ciklično nestabilnost snovi, zato za dolgoročno uporabo potrebujejo stabilizatorje. Večina hidratnih soli se podhlaja, slaba lastnost je tudi, da so korozivne za določene kovine. Volumska sprememba pri spremembi agregatnega stanja pri hidratnih solih je majhna, do 10%. So cenovno sprejemljive.

Evtitektiki so zmesi dveh ali več spojin v natančno določenem razmerju, pri katerem ima zmes lastnosti čiste snovi, kar pomeni da pri določeni evtaktični temperaturi nastopi transformacija taline v trdno stanje. Iskanje najprimernejše zmesi je narejeno eksperimentalno. V preglednicah 2 in 3 so podatki za že preizkušene zmesi.

Preglednica 2: Fizikalne lastnosti anorganskih evtektikov [3,9]

Material	T _t [°C]	q _t [kJ/kg]	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]
51-55% Cu(NO ₃) ₃ ·6H ₂ O + 45-49% LiNO ₃ ·3H ₂ O	16,5	250	-	-
45-52% LiNO ₃ ·3H ₂ O + 48-55% Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	17,2	220	-	-
55-65% LiNO ₃ ·3H ₂ O + 35-45% Ni(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	24,2	230	-	-

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 2

66.6% CaCl ₂ ·6 H ₂ O + 33.3% MgCl ₂ ·6 H ₂ O	25	127	-	1590
45% Ca(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O + 55% Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	25	130	-	1930
48% CaCl ₂ + 4.3% NaCl + 0.4% KCl + 47.3% H ₂ O	26,8	188	-	1640
67% Ca(NO ₃) ₂ ·4 H ₂ O + 33% Mg(NO ₃) ₂ ·6 H ₂ O	30	136	-	1670
60% Na(CH ₃ COO)·3 H ₂ O + 40% CO(NH ₂) ₂	30 31,5	226	-	-
61.5% Mg(NO ₃) ₂ ·6 H ₂ O + 38.5% NH ₄ NO ₃	52	125,5	0,494 (tekoče 65°C) 0,565 (tekoče 88°C) 0,552 (trdno 36°C)	1515 (tekoče 65°C) 1596 (trdno 20°C)
58.7% Mg(NO ₃) ₂ ·6 H ₂ O + 41.3% MgCl ₂ ·6 H ₂ O	59	132	0,51 (tekoče 65°C) 0,678 (tekoče 53°C)	1550 (tekoče 50°C) 1630 (tekoče 24°C)
53% Mg(NO ₃) ₂ ·6 H ₂ O + 47% Al(NO ₃) ₃ ·9 H ₂ O	61	148	-	1850

Preglednica 3: Fizikalne lastnosti neevtektičnih anorganskih zmesi [3,9]

Material	Temperatura taljenja [°C]	Specifična talilna toplota q _t [kJ/kg]	Toplotna prevodnost λ [W/mK]	Gostota ρ [kg/m ³]
4.3% NaCl + 0.4% KCl + 48% CaCl + 47.3% H ₂ O	27	188	-	1530 (tekoče) 1640 (trdno)
Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O / Mg(NO ₃) ₂ · 2H ₂ O	55,5	-	-	-
80% Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O + 20% MgCl ₂ · 6H ₂ O	60	150	-	-

Najbolj pogosto uporabljeni organski PCM so parafini. Parafin je ime za ogljikovodike, pri katerih je dosežena nasičenost z vodikom. Gre za alkane s splošno formulo C_nH_{2n+2}, pri katerih so nižji členi plinasti, višji tekoči in najvišji trdni. Kot komercialni PCM se uporabljajo parafinski voski, ki so zmesi nasičenih ogljikovodikov v ravni verigi s kemično oznako C₁₄H₃₀ do približno C₂₀H₄₂, ki so predstavljeni v preglednici 4. Pridobivajo se v procesu rafiniranja iz nafte. Njihova talilna temperatura se povečuje z molsko maso parafina. Tališče alkanov namreč narašča z dolžino verige atomov ogljika v molekuli.

Preglednica 4: Fizikalne lastnosti parafinov [3,9]

Material	Temperatura taljenja [°C]	Specifična talilna toplota q_t [kJ/kg]	Toplotna prevodnost λ [W/mK]	Gostota ρ [kg/m ³]
n-Tetradekan $C_{14}H_{30}$	6	230	0,21 (trdno)	760 (tekoče 20°C)
n-Pentadekan $C_{15}H_{32}$	10	212	-	770 (tekoče 20°C)
n-Heksadekan $C_{16}H_{34}$	18	210,2	-	760 (tekoče 20°C)
n-Heptadekan $C_{17}H_{36}$	19	240	-	776 (tekoče 20°C)
n-Oktadekan $C_{18}H_{38}$	28	200,2	0,148 (tekoče 40°C) 0,358 (trdno 25°C)	774 (tekoče 70°C) 814 (trdno 20°C)
n-Eikozan $C_{20}H_{42}$	38	283	-	779
n-Triakontan $C_{30}H_{62}$	66	-	-	775
n-Tetrakontan $C_{40}H_{82}$	82	-	-	-
n-Pentakontan $C_{50}H_{102}$	95	-	-	779

V primerjavi z ostalimi organskimi spojinami imajo parafini visoko talilno toploto, kar je vidno na sliki 11. So amorfne snovi, zato ni jasnega prehoda med trdnim in kapljevinskim agregatnim stanjem, fazna sprememba se zgodi v temperaturnem intervalu, v primerjavi s čistimi alkani, kjer je temperatura tališča določena. Gostota parafinov je veliko manjša kot gostota anorganskih snovi – gostota tekočega parafina je okoli 750kg/m³, medtem ko je gostota trdnega parafina med 800 in 900kg/m³. Z upoštevanjem razmerja gostot je sprememba volumna pri fazni spremembi trdno-kapljevinsko tudi več kot 15%. V primerjavi z anorganskimi snovmi je to sicer slabost, vendar so parafini mehkejši in med raztezanjem ne razvijejo tako velikih sil [2]. Razliko med volumni je potrebno upoštevati pri dimenzioniranju sistema enkapsuliranja PCM. Ohlajajo se brez podhajevanja. Kot vse organske spojine imajo parafini nizko toplotno prevodnost λ . To je slabost parafinov, saj PCM shranijo veliko toplote, vendar se mora toplota prenesti v prostor, da sistem funkcionira. So inertni in kompatibilni s kovinami. Parafini so stabilni do 250°C, kratkotrajno pregrevanje na lastnosti ne vpliva. So ciklično stabilni. Čisti alkani so zelo dragi, tudi več kot 100-krat dražji od komercialno dostopnih parafinov.

Večino organskih neparafinov predstavljajo maščobne kisline s splošno formulo $CH_3(CH_2)_{2n}COOH$. Najpogostejše maščobne kisline in njihove zmesi, ki so bile testirane kot PCM so predstavljene v preglednici 5. Njihova specifična talilna toplota je podobna kot pri parafinih in njihova temperatura

tališča prav tako narašča z dolžino molekule, vendar imajo to slabost, da so 2 do 5-krat dražje kot parafini. Maščobne kisline se ohlajajo z majhnim ali ničnim podhlajevanjem, so ciklično stabilne, imajo kot parafini nizko toplotno prevodnost ter velik volumski raztezek. So slabše kompatibilne s kovinami.

Preglednica 5: Fizikalne lastnosti maščobnih kislin [3,9,10]

Material	T_t [°C]	q_t [kJ/kg]	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]
Kaprilna kislina $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_6\text{COOH}$	16	149	0,149 (tekoče 38°C)	901 (tekoče 30°C) 981 (trdno 13°C)
Butil stearat $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COO}(\text{CH}_2)_3\text{CH}_3$	19	140	-	-
Dodekanol $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{OH}$	16	200	-	-
Kaprična kislina $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_8\text{COOH}$	32	153	0,149 (tekoče 40°C)	886 (tekoče 40°C) 1004 (trdno 24°C)
Lavrična kislina $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COOH}$	42-44	178	0,147 (tekoče 50°C)	870 (tekoče 50°C) 1007 (trdno 24°C)
Miristinska kislina $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH}$	58	186,2	-	861 (tekoče 55°C) 990 (trdno 24°C)
Palmitinska kislina $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$	61,6	185,2	0,162 (tekoče 68,4°C)	850 (tekoče 65°C) 989 (trdno 24°C)
Stearinska kislina $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$	69	203	0,172 (tekoče 70°C)	848 (tekoče 70°C) 965 (trdno 24°C)
61,5% Kaprična kislina 38,5% Lavrična kislina	18,5 (teoretično) 19,1 (izmerjeno)	132	-	-
55% Lavrična kislina 45% Kaprična kislina	21	143	-	-
73,5% Kaprična kislina 26,5% Mistrinska kislina	23,5 (teoretično) 21,4 (izmerjeno)	152	-	-
66% Kaprična kislina 34% Mistrinska kislina	24	147,7	0,164 (tekoče 39,1°C) 0,154 (tekoče 61,2°C)	888 (tekoče 25°C) 1018 (trdno 1°C)
75,2% Kaprična kislina 24,8% Palmitinska kislina	24,6 (teoretično) 22,1 (izmerjeno)	153	-	-
86,6% Kaprična kislina 13,4% Stearinska kislina	27,6 (teoretično) 26,8 (izmerjeno)	160	-	-
62,6% Lavrična kislina 37,4% Miristinska kislina	31,8 (teoretično) 32,6 (izmerjeno)	156	-	-
64% Lavrična kislina 36% Palmitinska kislina	33 (teoretično) 32,8 (izmerjeno)	165	-	-
75,5% Lavrična kislina 24,5% Stearinska kislina	37 (teoretično) 37,3 (izmerjeno)	171	-	-
51% Miristinska kislina 49% Palmitinska kislina	40 (teoretično) 39,8 (izmerjeno)	174	-	-

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 5

65,7% Miristinska kislina	45,1 (teoretično)	181	-	-
34,3% Stearinska kislina	44 (izmerjeno)			
64,9% Palmitinska kislina	46,7 (teoretično)	179	-	-
35,1% Stearinska kislina	50,4 (izmerjeno)			

Sladkorni alkoholi so novejši razred materialov, ki se jih obravnava kot potencialne PCM. Kot je razvidno iz preglednice 6 imajo višje temperature taljenja, od 90 do 200°C, zato za pasivne solarne sisteme niso primerni. Imajo večjo gostoto kot ostali organski materiali in primerljive talilne toplote, vendar pri ohlajanju lahko pride do podhladitve.

Preglednica 6: Fizikalne lastnosti sladkornih alkoholov [3]

Material	T_t [°C]	q_t [kJ/kg]	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]
Ksilitol $C_5H_7(OH)_5$	94	263	-	1500 (trdno 20°C)
D-Sorbitol $C_6H_8(OH)_6$	97	185	-	1520 (trdno 20°C)
Eritritol $C_4H_6(OH)_4$	120	340	0,326 (tekoče 140°C) 0,733 (trdno 20°C)	1300 (tekoče 140°C) 1480 (trdno 20°C)

Polietilen glikol ali kratko PEG so polimeri, ki so sestavljeni iz monomera $-CH_2-CH_2-O-$. PEG imajo molekulsko maso od okoli 200 do 10000g/mol. Preizkušeni PEG so predstavljeni v preglednici 7.

Preglednica 7: Fizikalne lastnosti PEG [3]

Material	Temperatura taljenja [°C]	Specifična talilna toplota q_t [kJ/kg]	Toplotna prevodnost λ [W/mK]	Gostota ρ [kg/m ³]
PEG400	8	100	0,19 (tekoče 38°C)	1125 (tekoče 25°C) 1228 (trdno 3°C)
PEG600	17-22	127	0,19 (tekoče 38°C)	1126 (tekoče 25°C) 1232 (trdno 4°C)
PEG1000	35-40	-	-	-
PEG3000	52-56	-	-	-
PEG6000	56-60, 66	190	-	1085 (tekoče 70°C) 1212 (trdno 25°C)

Nekateri od PCM prisotni na trgu so predstavljeni v preglednici 8. Temeljijo na hidratnih soleh ali parafinih. V diplomski nalogi bo konstrukcija analizirana s komercialnimi proizvodi PCM RT21, RT27 in RT31. Vsi podatki o v izračunu v poglavju 4.3 uporabljenih PCM, dani s strani proizvajalca, so podani v preglednici 10.

Preglednica 8: Komercialni PCM

Ime PCM in proizvajalec	Material	Temperatura taljenja [°C]	q_t	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]
RT -4 do RT 100 Rubitherm GmbH	Parafin	-3 do 100	Približno 170 kJ/kg	0,2	cca. 760 (tekoče) cca. 880 (trdno)
ClimSel C-18 do C70 Climator Sweden AB	Hidratna sol	-18 do 70	Med 40 in 80 Wh/kg	0,5 do 0,7	1360 do 1700
STL27, 47, 52, 55 Mitsubishi Chemicals	Hidratna sol	27 do 55	Približno 210 kJ/kg	-	1090 do 1340
AC27 Cristopia Energy System	Hidratna sol	27	207 kJ/kg	-	1,47
Astorstat HA16, 17, 18, 20 AstorWax by Honeywell	Parafin	18 do 38	-	-	-
TH29, TH58 TEAP Energy	Hidratna sol	29 58	188 kJ/kg 226 kJ/kg	-	-

3 UPORABA SISTEMOV S PCM ZA ZAGOTAVLJANJE TOPLOTNEGA UDOBJA V STAVBAH

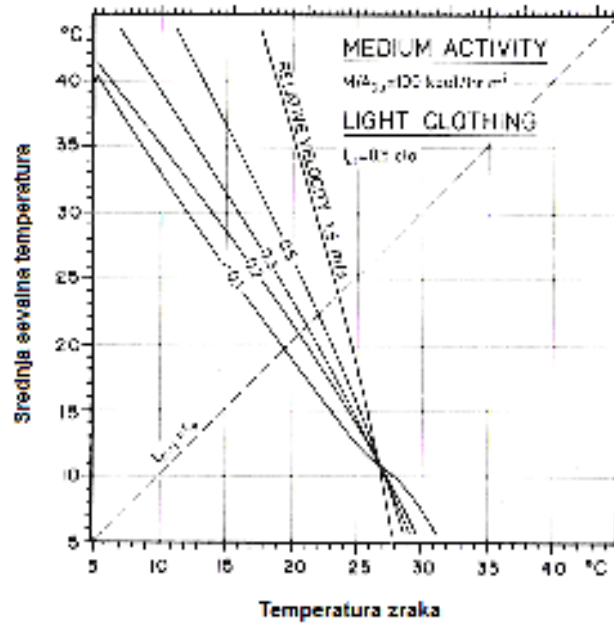
3.1 Potencial uporabe PCM v konstrukcijskih sklopih

Za posameznika predstavlja toplotno udobje stanje uma, ki izraža zadovoljstvo s toplotnim okoljem (ISO 7730:2005). Temperatura zraka, temperatura obodnih površin, gibanje zraka in relativna vlažnost zraka vplivajo na toplotno izmenjavo med človeškim telesom in okolico [13]. Obseg cone udobja, torej meje znotraj katerih se gibajo našti parametri, je odvisen od človekove aktivnosti, stopnje metabolizma, obleke, značilnosti posameznika ter namembnosti aktivnega prostora. Toplotno udobje dosežemo z ravnovesjem med toplotnimi dobitki in toplotno oddajo telesa, tako da vplivamo na stanje okolice z ogrevanjem, hlajenjem, prezračevanjem in količino sončne energije. Oblikovanje udobnih bivalnih in delovnih razmer od katerih je toplotno udobje ena od primarnih funkcij, ki temeljno vpliva na izbor lokacije, orientacijo, zasnovu stavbe in njeno geometrijo, na izbor materialov, načrtovanje ogrevanja in hlajenja prostorov in tako na celotno gradbeno industrijo.

Tehnologije s PCM lahko vplivajo samo na dva parametra toplotnega udobja: temperaturo zraka in temperaturo obodnih površin prostora, posredno pa tudi na relativno vlažnost zraka, ki je funkcija temperature zraka.

Za načrtovanje toplotnega udobja uporabljamo občuteno ali operativno temperaturo. Občutena temperatura ali operativna temperatura je srednja temperatura med temperaturo zraka v prostoru in srednjo temperaturo obodnih površin prostora, če je hitrost gibanja zraka manjša od 0,2m/s. Srednja sevalna temperatura je povprečna temperatura vseh površin, vključno z grelnimi telesi, ki nas obdajajo v prostoru. Človek namreč oddaja toploto z dihanjem, potenjem, konvektivno v zrak okoli sebe ter tudi s sevanjem na površine, ki ga obdajajo. Toplotni tok, ki ga človek oddaja v okolico s sevanjem, je večji, čim večja je razlika temperatur med njim in obodnimi površinami. Čim nižja je torej temperatura obodnih površin, več toplote človek oddaja s sevanjem, zato se lahko počuti neudobno.

Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb (Ur. l. RS, št. 42/02) navaja, da se optimalna občutena temperatura določi v odvisnosti od aktivnosti in obleke uporabnika prostora skladno s SIST CR 1752.

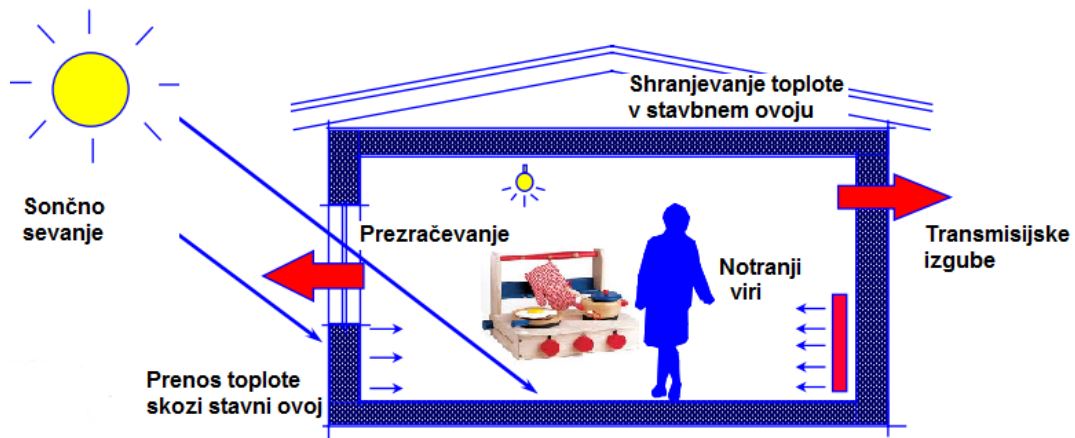


Slika 12: Linije toplotnega udobja z upoštevanjem temperature zraka, temperature obodnih površin, hitrosti gibanja zraka in $RH=50\%$ za srednje aktivne uporabnike z lahkimi oblačili [13]

Na sliki 12 so prikazane linije optimalnih operativnih temperatur za različne hitrosti gibanja zraka za uporabnike z lahkimi oblačili in srednjo aktivnostjo. Glede na sliko 12 in SIST CR 1752 je optimalna operativna temperatura približno 20°C . Najvišja dovoljena projektna občutena temperatura (in ne temperatura zraka) do katere se sme stavba poleti pregrete pa 27°C . Z vidika toplotnega udobja in energije, ki jo porabimo za ogrevanje, je previsoka temperatura notranjega zraka nezaželena. Pri klasičnem ogrevanju s konvekcijo preko posameznih grelnih teles segrevamo le zrak v prostoru. Stavbe z veliko toplotno akumulativnostjo, ki preko sistemov PSA izkoriščajo sončno energijo (direktni zajem skozi okna, indirektni zajem preko zbiralno-shranjevalnih sten in steklenjakov), pa ogrevajo svojo okolico posredno, s sevanjem toplote akumulirane v ovoj prostorov. Tako dobimo ugoden občutek toplote (operativna temperatura), čeprav je temperatura zraka nižja kot pri konvekcijskem ogrevanju, s tem pa skrajšamo čas učinkovitega delovanja grelnih teles, kar pomeni nižje stroške ogrevanja.

Če stojimo med stenama z različno površinsko temperaturo, ljudje čutimo razliko, ki jo imenujemo asimetrija sevanja. Če je razlika temperatur prevelika, to čutimo kot neudobje. Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb (Ur. l. RS, št. 42/02) podaja največje sevalne temperaturne asimetrije. Problem zunanjih sten, katerih površinska temperatura je odvisna od temperature okoliškega zunanjega zraka in toplotne prehodnosti konstrukcijskega sklopa stene, je bistveno zmanjšala uporaba toplotnih izolacij velikih debelin. S pravilnim načrtovanjem konstrukcijskega sklopa in s pravilno razporeditvijo grelnih teles preprečimo preveliko razliko med temperaturami površin ovoja. Tako dosežemo uravnotežen sistem toplotnih tokov v prostoru.

Temperatura v stavbi in stopnja toplotnega udobja je rezultat toplotne kapacitete stavbe, toplotnih pritokov in odtokov skozi stavbni ovoj ter notranjih virov toplote.

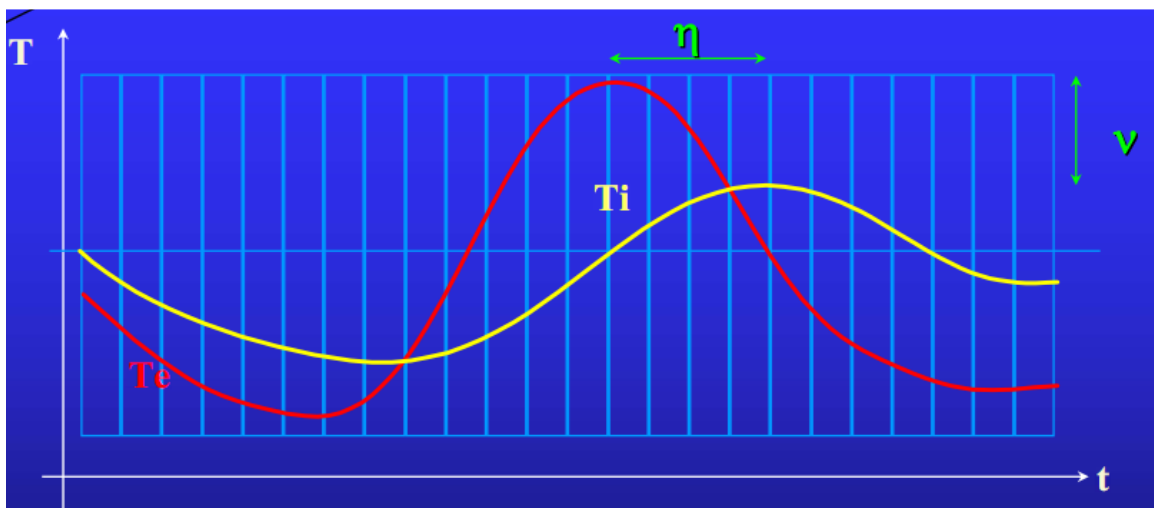


Slika 13: Glavni dejavniki, ki vplivajo na temperaturo v stavbi

Pravilnik o učinkoviti rabi energije (Ur. L. RS. Št. 52/10) PURES 2010 in pripadajoča tehnična smernica TSG–1–004;2010 prenašata zahteve evropske direktive o učinkoviti rabi energije v stavbah EPBD 31/2010/EU v slovensko zakonodajo. Ta pravilnik določa tehnične zahteve, ki morajo biti izpolnjene za učinkovito rabo energije v stavbah na področju toplotne zaščite, ogrevanja, hlajenja, prezračevanja ali njihove kombinacije, priprave tople vode in razsvetljave v stavbah, zagotavljanja lastnih obnovljivih virov energije za delovanje sistemov v stavbi ter metodologijo za izračun energijskih lastnosti stavbe. Med drugim v 8. in 9. členu določa, da morajo materiali in elementi konstrukcije ter celotna zunanja površina stavbe omogočati učinkovito upravljanje z energijskimi tokovi ter da je potrebno s toplotno zaščito površine toplotnega ovoja stavbe zmanjšati prehod energije skozi površino toplotnega ovoja stavbe ter zmanjšati podhlajevanje ali pregrevanje stavbe. V 7. členu določa dovoljeno letno potrebno toploto za ogrevanje in dovoljen letni potreben hlad za hlajenje stavbe. Ker na rabo energije vpliva stavba s svojimi toplotno-tehničnimi lastnostmi v povezavi z meteorološkimi pogoji okolja, predpisuje upoštevanje naslednjih lastnosti stavbe (slika 13):

- Toplotne značilnosti stavbe:
 - toplotna kapaciteta (akumulacija toplote),,
 - toplotna izolacija,
 - pasivno gretje in hlajenje,
 - toplotni mostovi.
- Naravno in mehansko prezračevanje, lahko tudi zračno tesnost.
- Zasnovo, položaj in orientacijo stavbe.
- Pasivne solarne sisteme in zaščito pred sončnim sevanjem.

Stavbni ovoj ima torej tudi funkcijo uravnavanja toplotnih tokov v prostor. Toplotna stabilnost je sposobnost zunanje konstrukcijskega sklopa, da ohrani relativno obstojnost temperature na notranji strani konstrukcijskega sklopa ob nihanju temperature zunanje zraka in nihanju toplotnega toka skozi sklop [15]. V poletnem času mora konstrukcijski sklop zaščititi bivalni prostor pred pregrevanjem zaradi visokih temperatur in absorbiranega sončnega sevanja na zunanji površini konstrukcije, v ogrevalni sezoni pa pred transmisijskimi izgubami. Količina toplote, ki zaradi sončnega sevanja prehaja v prostor skozi konstrukcijo in poveča temperaturo v prostoru, je odvisna od toplotnega upora, toplotne akumulativnosti ter absorpcijskih lastnosti zunanjih površin. Temperatura zunanje zraka in zunanjih površin konstrukcije niha s periodo 24 ur. Temperaturni val v primeru velike termične difuzivnosti a , ki je definirana v 4. poglavju, prodira skozi konstrukcijski sklop, se pri tem duši in niha v ritmu z zunanjim nihanjem zraka. V primeru majhne termične difuzivnosti, je mehanizem prenosa toplote prepočasen, da bi temperatura stene nihala v ritmu z nihanjem zunanje zraka. Predznak temperature na zunanji steni se namreč spremeni, preden toplota prodre globoko v steno in v steni se pojavijo nekakšni toplotni valovi. Karakteristična vrednost, s katero opišemo toplotno stabilnost konstrukcije je faktor dušenja temperature, ki je količnik med amplitudo spreminjajoče se temperature zunaj in amplitudo temperature notri. Čas, ki preteče med pojavom najvišje temperature zunaj in najvišje temperature na notranji površini konstrukcije imenujemo fazni zamik ali temperaturna zakasnitev.



Slika 14: Nihanje temperature na zunanji strani stene (T_e) in na notranji strani stene (T_i). ν je faktor dušenja temperature, η pa temperaturna zakasnitev [15]

Pri toplotni stabilnosti konstrukcijskega sklopa je odločilna zmožnost materiala, da sprejme toploto in jo shrani ter ko temperatura v okolici pade, shranjeno toploto odda v prostor ali mediju za prenos toplote. Masivni zidovi (iz betona, opeke) z veliko toplotno kapaciteto se podnevi počasi segrevajo, ponoči pa počasi ohlajajo. Nihanje temperature v notranjosti je tako majhno. V primeru lahkih konstrukcij, ki nimajo velikih toplotnih kapacitet niti velike mase na enoto prostornine, ne moremo

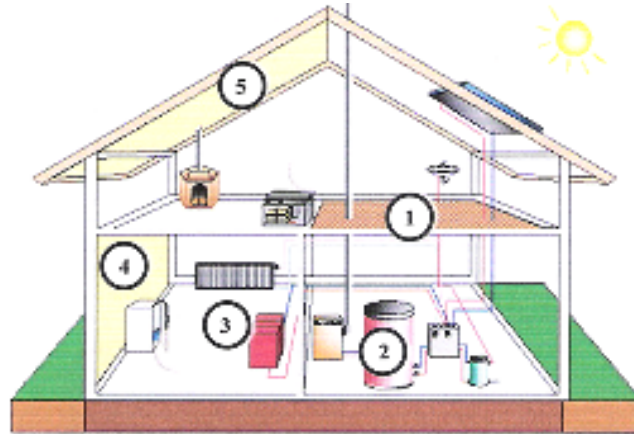
pričakovati velike stabilnosti temperature [14,16]. Tako se odpirajo nove možnosti inovativni tehnologiji vgradnje materialov, ki shranjujejo toploto, v tankoslojni fasadni panel. Ena izmed rešitev je uporaba snovi, ki absorbira ali sprošča toploto pri spremembi agregatnega stanja, to so fazno spremenljivi materiali.

Glavna naloga PCM integriranega v konstrukcijski sklop je regulacija toplotnega toka čez stavbni ovoj:

- Če je temperatura faznega prehoda PCM približno enaka povprečju dnevne temperature, duši nihanja temperature v notranjosti. Ko se podnevi temperatura dvigne nad temperaturo faznega prehoda in stali PCM, PCM shrani latentno toploto ter jo odda, ko temperatura pade pod temperaturo fazne spremembe in se PCM strdi. Tako je temperatura v notranjosti podnevi nižja, ponoči pa višja, glede na zunanjo temperaturo. Ker je temperatura fazne spremembe fiksna, oziroma je znotraj nekega ozkega temperaturnega intervala, povprečna dnevna temperatura pa se preko leta stalno spreminja, uporaba PCM za enakomerno dušenje dnevnih in nočnih ekstremnih temperatur, ni praktična. Za delovanje takega sistema bi namreč rabili več različnih PCM z različnimi temperaturami faznega prehoda, ki bi se menjavali preko leta v odvisnosti od povprečne dnevne temperature.
- Ko dnevna temperatura ne niha okoli temperature fazne spremembe PCM, ampak je temperatura fazne spremembe višja ali nižja od povprečne dnevne temperature, PCM v konstrukcijskem sklopu služi izogibanju previsokim ali prenizkim dnevnim temperaturam. Glede na lokacijo stavbe izberemo PCM s temperaturo faznega prehoda, ki bo omogočala hlajenje ali ogrevanje prostora. Če želimo ohraniti prostor hladen oziroma se izogniti temperaturam nad neko temperaturo, ki nam povzroča neudobje, z integracijo PCM s primerno temperaturo fazne spremembe zmanjšamo toplotni tok v prostor za določen čas. Toplota se v času previsokih temperatur v obliki latentne toplote shrani v PCM, ko temperatura pade, pa sproščeno toploto s primerno ventilacijo odvedemo iz prostora. Ogrevanje temelji na principu pasivne izrabe sončne energije, ko lahko relativno tanka plast PCM zagotovi podobno toplotno kapaciteto kot masivna betonska stena.

Kot je bilo omenjeno v poglavju 1.1, imajo latentni hranilniki toplote večjo akumulacijsko sposobnost v določenem temperaturnem območju v primerjavi s senzibilnimi sistemi. V primeru majhne spremembe temperature v območju, kjer poteka fazni prehod PCM iz trdnega v tekoče agregatno stanje, shrani PCM veliko več toplote kot beton ali opeka, oziroma ob uporabi PCM je lahko konstrukcija veliko tanjša kot ob uporabi betona ali opeke kot materialov za senzibilno shranjevanje

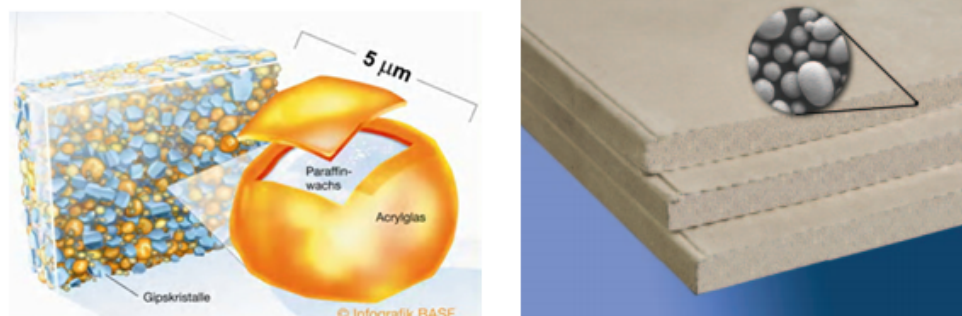
toplote. Za zagotovitev večje toplotne stabilnosti lahko montažnih stavb, ki so zgrajene predvsem iz jekla in stekla, je bilo razvitih več aktivnih sistemov in PSA s PCM kot skladiščem odvečne toplote.



Slika 15: Konstrukcijski sklopi z možnostjo vstavitve PCM (1,4,5), dolgotrajni latentni solarni hranilnik toplote za ogrevanje s toplo vodo (2), ventilacijski sistem, ki segreje svež zunanji zrak (3) [5]

3.2 Materiali z mikroenkapsuliranim PCM

Integracija PCM v različne nosilne matrike, na primer v mavec, je povzročala probleme, ko je PCM iz matrike iztekal (bleeding) [1]. Pri direktni inkorporaciji PCM v mavec je Orel [1] našel rešitev v povečani viskoznosti PCM v tekočem stanju s pomočjo silicijevega dioksida, kar ni zmanjšalo toplotnih lastnosti kompozitnega materiala. Kasneje so razvili sistem mikroenkapsulacije, to so majhni delci, veliki le nekaj mikrometrov, sestavljeni iz jedra – mikroskopsko majhnih kapljic PCM (parafin), ki so zaprte v ovoj iz katerega PCM ne more iztekat (slika 16). V material so lahko vgrajeni v obliki disperzije ali prahu. Mikroenkapsuliran parafin se lahko vgrajuje v mavčne plošče za stenske obloge, v malto za omete ter v beton.



Slika 16: Mikrokapsule parafina inkorporirane v mavčno ploščo [17] ter mavčna plošča Knauf PCM SmartBoard® z vgrajenim Micronal® PCM podjetja BASF [17]. Vsak kvadratni meter 15mm debele mavčne plošče ima po podatkih proizvajalca vgrajene 3kg PCM s temperaturo taljenja 21, 23 ali 26°C. Masa plošče je 11,5kg/m², kar pomeni, da lahko shrani približno 330kJ/m² toplote.

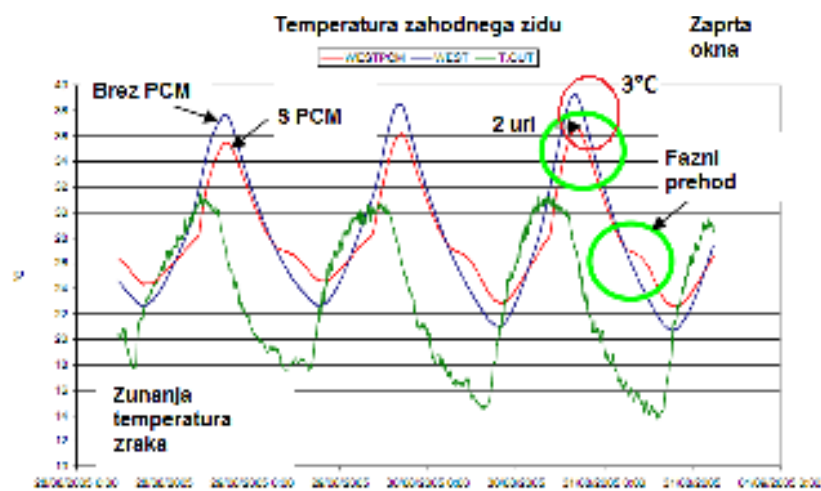
Vgrajevanje PCM v materiale, ki se jih namešča na notranjo stran konstrukcijskega sklopa je logično, saj večjo toplotno stabilnost prostora dosežemo samo z materiali z veliko toplotno kapaciteto in veliko maso na enoto površine, nameščenimi v notranjosti prostora. Toplotno kapaciteto tako povečamo, temperatura materiala se manj spreminja zaradi toplotne izmenjave z okolico in notranja temperatura prostora se manj spreminja s časom. Bistvo problema je v tem, kakšno debelino lahko sprememba faze doseže po energetskem inputu, ki je v pasivnih sistemih časovno omejen na 24-urno dinamiko.

Narejenih je bilo več raziskav na primeru testnih stavb iz betona z mikroenkapsuliranim PCM [18,19]. V raziskavi [18] so merili odziv stavbe s PCM v celinskem podnebju v Španiji. Zidovi testnih stavb so bili debeline 12cm, razen tega, da je beton ene testne stavbe vseboval 5% mikroenkapsuliranega PCM (Micronal®, temperatura taljenja 26°C, specifična talilna toplota 110kJ/kg) glede na svojo maso, ni bilo v zasnovi nobenih razlik. Stavbi nista bili toplotno izolirani, imeli sta po eno okno na vzhodu in zahodu, štiri manjša okna na jugu ter vrata na severu.



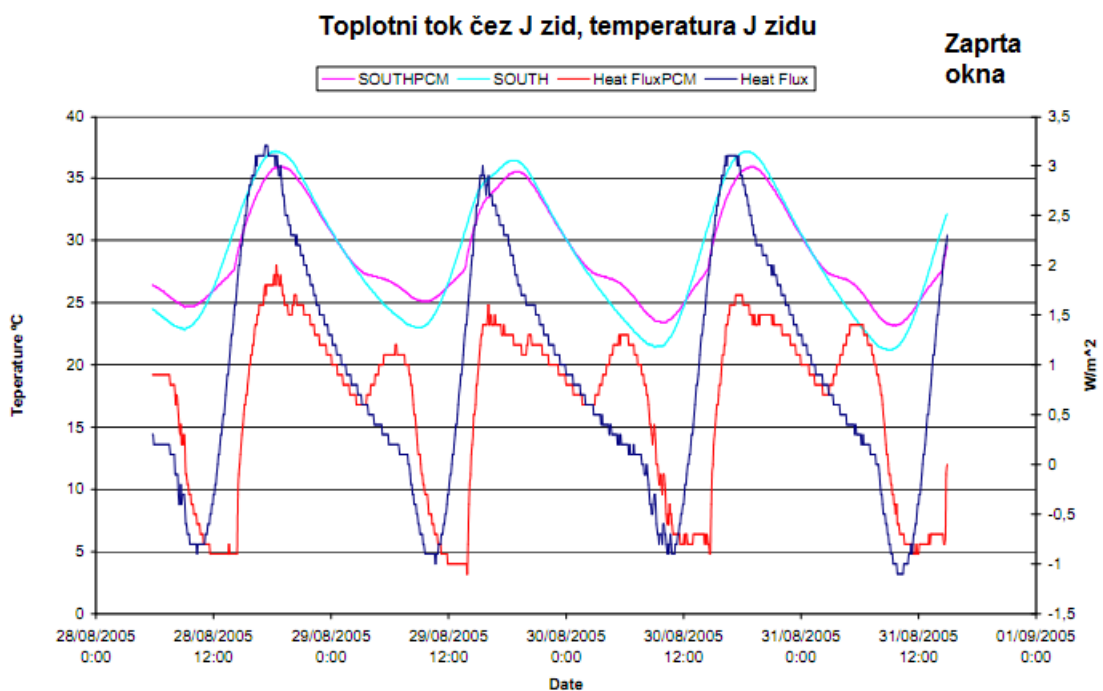
Slika 17: Testni stavbi raziskave [18]

Rezultati PCM kot blažilca najvišjih temperatur poleti so bili dobri, saj je s PCM zmanjšala temperatura notranje površine zidu do 4°C. Razlika med temperaturo notranje površine zidu z in brez PCM je opazna tudi pri minimalnih temperaturah ponoči. Notranja površina zidu s PCM ohranja do 2°C višjo temperaturo kot zid brez PCM.



Slika 18: Temperatura površine zahodnega zidu v notranjosti prostora v primerjavi z zunanjo temperaturo zraka ob konstantno zaprtih oknih [18]

Na sliki 18 je vidno, da ob maksimalni zunanji temperaturi zraka 31°C , temperatura zahodnega zidu v stavbi brez PCM doseže 39°C , v stavbi s PCM pa 36°C . Temperatura 36°C v stavbi brez PCM je dosežena približno 2 uri prej, kot je enaka temperatura dosežena v stavbi s PCM. Temperaturna razlika med dnevom in nočjo zahodnega zidu brez PCM je bila okoli 17°C , zidu s PCM pa okoli 13°C . Temperatura južnega zidu je nekoliko nižja, temperaturna razlika pri najvišjih temperaturah je 1°C , kot je vidno na sliki 19. Največji toplotni tok skozi južni zid je pri stavbi s PCM za polovico manjši kot pri stavbi brez PCM. V primeru vgradnje PCM zmanjšamo temperaturno prevodnost betona. Toplota se v fazi taljenja PCM porablja za spremembo agregatnega stanja s čimer material akumulira toploto, manj pa jo v časovni enoti prevaja naprej.



Slika 19: Temperatura površine južnega zidu v notranjosti prostora in toplotni tok čez južni zid, merjen v sredini zidu, ob konstantno zaprtih oknih, podatki za iste 3 dni kot pri sliki 18 [18]

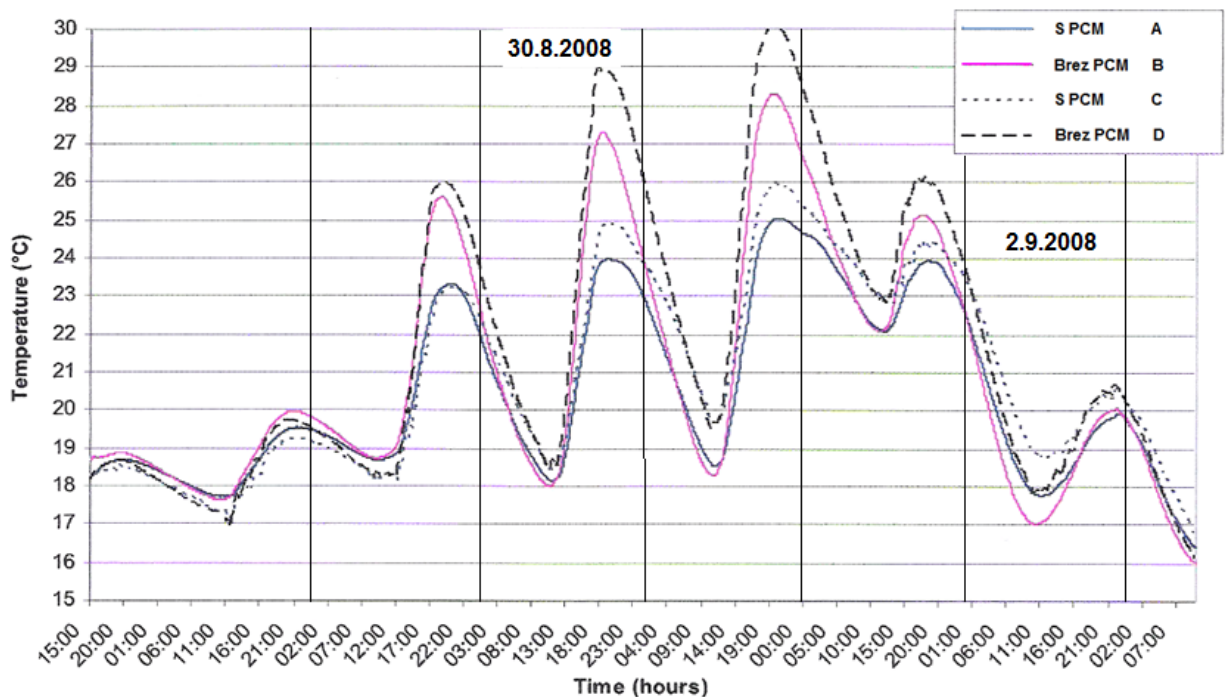
Z nočnim prezračevanjem so bila dosežena še manjša temperaturna nihanja - pri isti zunanji temperaturi je bila najvišja dnevna temperatura zidu v obeh primerih stavbe nižja za več kot 2°C .

V raziskavi [19] so merili odziv štirih testnih škatel v podnebjju na Nizozemskem. Mikroenkapsuliran PCM (Micronal®, temperatura taljenja 23°C , specifična talilna toplota 110kJ/kg) je bil vgrajen samo v betonska tla testnih škatel A in C. Vse testne škatle so imele okno na južni strani, vendar so sta imeli testni škatli A in C okno z več kot še enkrat večjo toplotno prehodnostjo kot okni testnih škatel B in D. Poleg tega so stene in strop testnih škatel A in B ter C in D izolirane z različnim materialom z različno toplotno upornostjo.



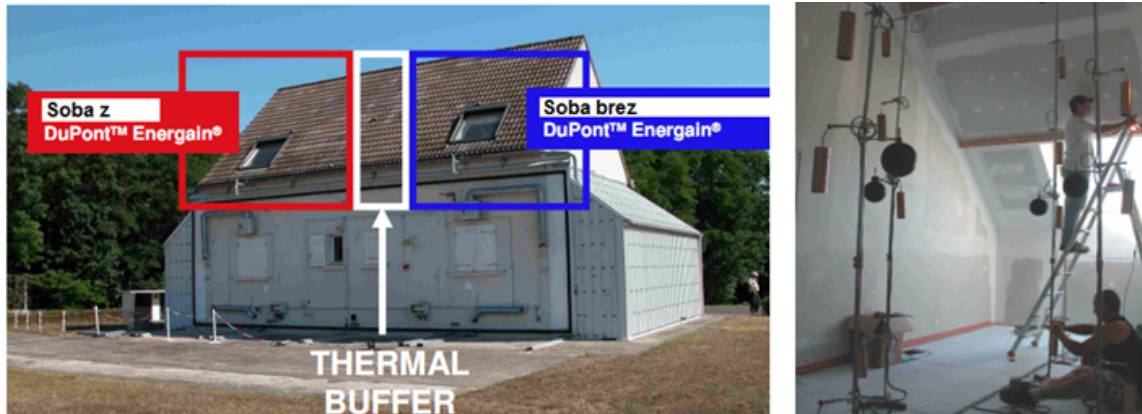
Slika 20: Testne škatle raziskave [19]

Kot vidimo na sliki 21 sta imeli testni škatli A in B, ki sta izolirani drugače kot C in D nižje povprečne dnevne temperature. 30.8.2008 je bila najvišja zunanja temperatura zraka 24°C ob okoli 15:00, najvišja temperatura tal pa je dosežena 3 ure kasneje. Najvišja temperatura tal v primeru A (s PCM) je bila ta dan več kot 3°C nižja kot v primeru B (brez PCM). Ponoči se temperature tal glede na vgradnjo PCM niso razlikovale, najverjetneje zaradi manjšega toplotnega upora oken v primeru testih škatel z vgrajenim PCM, ki pomeni večje toplotne izgube. 2.9.2008 ko je bila najvišja dnevna temperatura 21°C, maksimalno sončno sevanje pa je bila po podatkih kar dvakrat manjše kot 30.8.2008, je bila temperatura tal s PCM 1°C višja kot temperatura tal brez PCM. Očitno je višjo temperaturo tal ohranjala latentno shranjena toplota v PCM.



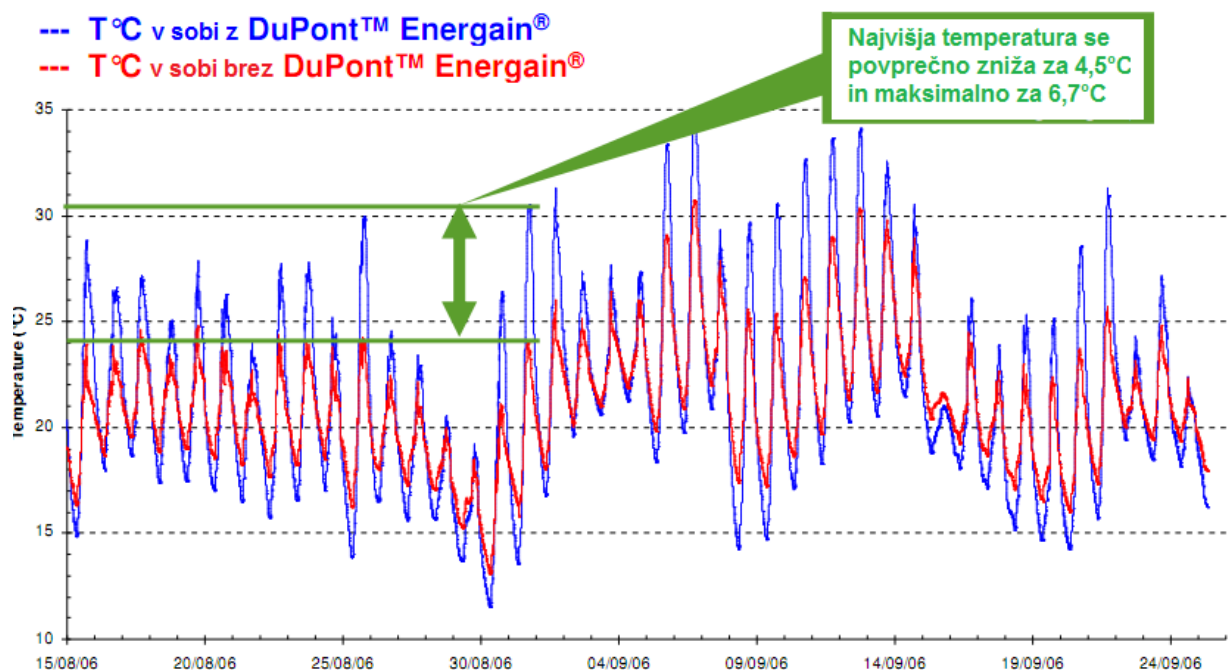
Slika 21: Temperatura površine betonskih tal za dneve 27.8.2008 do 3.9.2008 [19]

DuPont™ Energain® je z aluminijem laminirana 5,26mm debela plošča za stenske obloge, ki vsebuje 60% parafinskega voska, ki se po podatkih proizvajalca [20] topi pri 21,7°C in strjuje pri 18°C. Proizvajalec je ploščo testiral na primeru testnih podstrešnih sob v podnebnih razmerah v okolici Pariza, z nočnim prezračevanjem poleti.



Slika 22: Testni sobi raziskave [20]

Na sliki 23 so rezultati merjenja temperature v notranjosti sob za avgust in september 2006, kjer se plošče DuPont™ Energain® izkažejo kot odličen blažilec najvišjih in najnižjih temperatur.

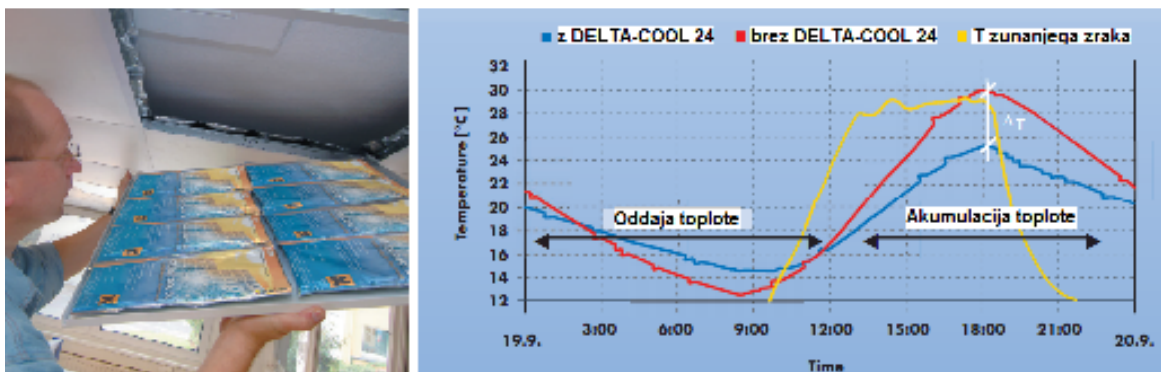


Slika 23: Temperatura izmerjena v sobi s ploščami DuPont™ Energain® in brez [20]

3.3 Konstrukcijski sklopi z integriranim PCM sistemom

3.3.1 Stropni sistemi

Primer pasivnega gradbenega elementa je spuščeni strop na viseči kovinski podkonstrukciji z makroenkapsuliranim PCM. Aluminijske vrečke, kamor je pakiran PCM, se enostavno položijo na mavčne plošče, kot je prikazano na sliki 24. Eden takih sistemov je DELTA®-COOL 24 podjetja Dörken. PCM DELTA®-COOL 24 je hidratna sol, ki se topi v temperaturnem intervalu 22 - 28°C in kristalizira pri 22°C. 1m² aluminijskih vrečk 30cmx15cm ima 8kg/m² in specifično toploto približno 1260kJ/m². Za optimalno blaženje visokih temperatur poleti mora biti zagotovljeno nočno prezračevanje, da se čez dan shranjene viške toplote lahko odvede iz stavbe. Na sliki 22 je podatek proizvajalca o delovanju spuščenega stropa z DELTA®-COOL 24 testiranega v bivalnem kontejnerju za dan 19.9.2003 [21]. Ob nočnem prezračevanju in maksimalni zunanji dnevni temperaturi 29°C je prostor s sistemom PCM ohranil kar 5°C nižjo temperaturo kot tisti brez sistema PCM, ki se je segrel na 30°C.



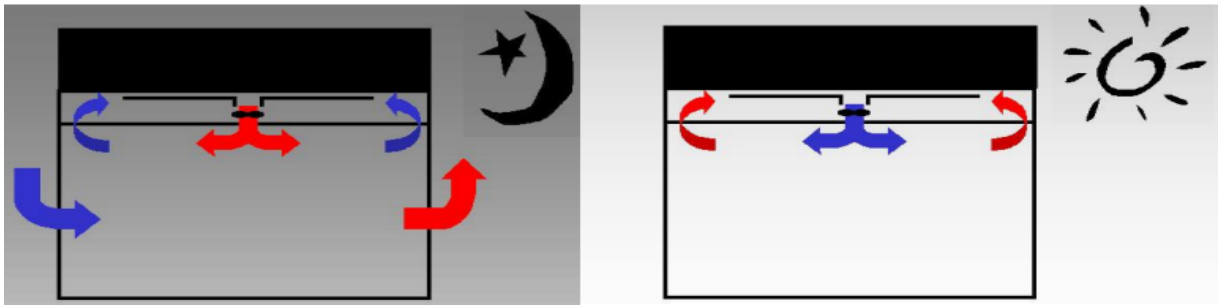
Slika 24: Sistem spuščenega stropa s PCM in njegovo delovanje [21]

V primerih PCM vgrajenega v gradbene materiale ali pri sistemu DELTA®-COOL 24 toplota v prostor prestopa z naravno konvekcijo ali radiacijo. Toplotna izmenjava in oddaja shranjene toplote ponoči je ključna za učinkovito delovanje PCM sistema kot dnevnega hranilnika toplote. Brez dotoka hladnega nočnega zraka do plasti PCM temperatura plasti ponoči ne doseže nižje temperature kot je temperatura strjevanja PCM, kar pomeni, da PCM shranjene toplote ne odda. Tako je ima v naslednjem ciklu PCM manjšo sposobnost shranjevanja toplote, ves material je stopljen in učinek zmanjševanja temperature je manjši. Izmenjavo toplote in pritok zraka izboljša aktivni ventilacijski sistem. Kot kaže slika 25 je pod strop nameščen kanal v katerem je PCM, ki usmerja tok zraka. V element Cooldeck PCM podjetja Climator je v aluminijskih vrečkah vgrajen PCM s temperaturo faznega prehoda 24°C po podatkih proizvajalca [22].



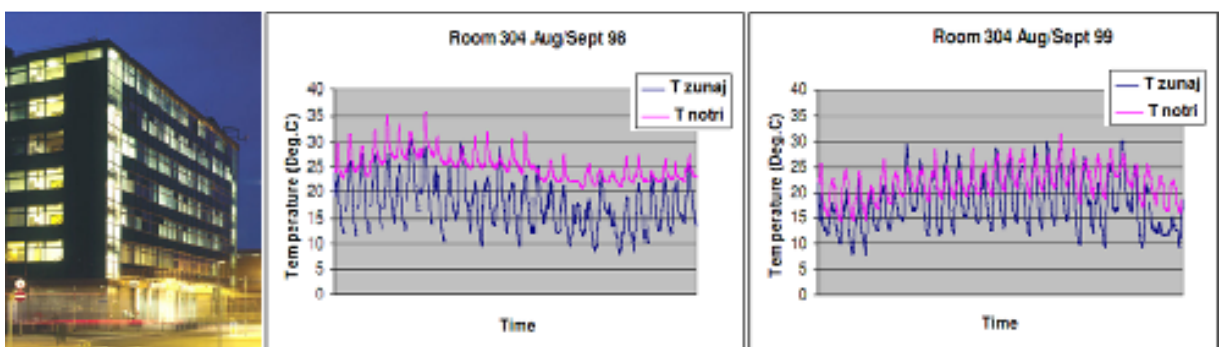
Slika 25: Spuščen strop s sistemom Cooldeck PCM podjetja Climator [22]

Kot je prikazano na sliki 26 je hladen nočni zrak je z ventilatorji usmerjen čez plast PCM, ki mu odda shranjeno toploto in je nato segret odveden iz prostora. Čez dan se segret zrak iz prostora dviga in prehaja plast PCM ter se nato ohlajen vrača nazaj v prostor. Aplikacija, kjer je kanal s PCM nameščen v prostor med stropno ploščo in spuščnim stropom, tako izkorišča toplotno maso stropne plošče in toplotno kapaciteto PCM.



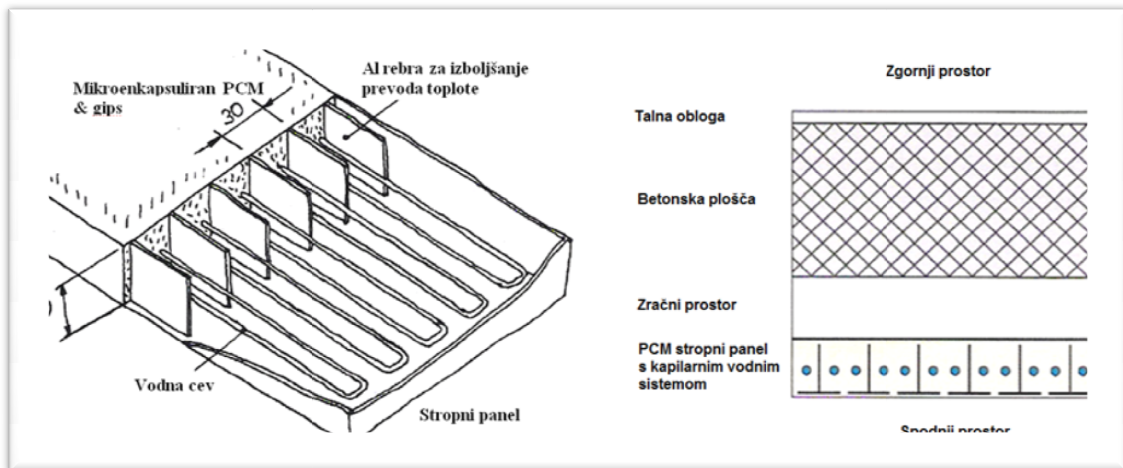
Slika 26: Princip delovanja sistema Cooldeck PCM ponoči in podnevi [22]

Kot kažeta grafa na sliki 27 desno, pred in po vgraditvi sistema Cooldeck PCM, so se temperature v notranjosti z delujočim sistemom znižale do 5°C. Za delovanje sistema je potrebna le energija za poganjanje ventilatorjev, kar pa je mnogo manj, kot energija potrebna za konvencionalno hlajenje s klimatsko napravo.

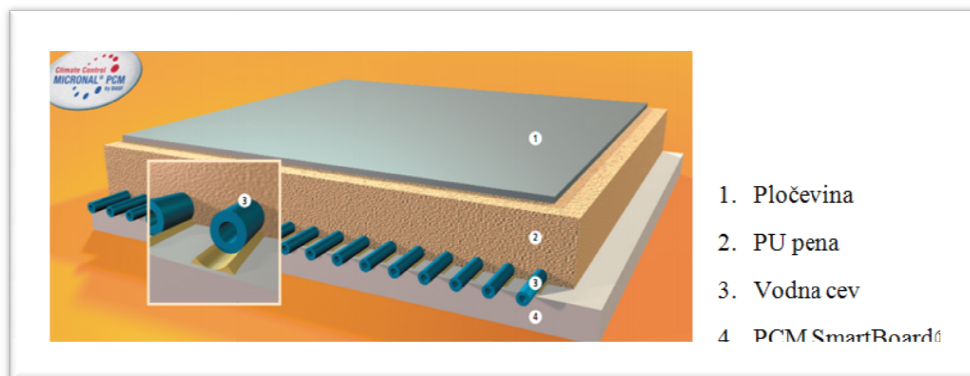


Slika 27: Zunanja temperatura zraka in temperatura zraka v prostoru pred vgraditvijo sistema Cooldeck PCM (levo) in po aktivaciji sistema (desno) v stavbo na sliki levo v Veliki Britaniji [22].

Eden od konceptov stropnega sistema je tudi panel v katerem se tekom dneva PCM tali zaradi visokih zunanjih temperatur, ponoči pa se strdi zaradi ohlajanja s pomočjo vgrajenega sistema vodnih cevi [23,24]. V primeru [23] je kapilarni vodni sistem vgrajen v panel iz zmesi malte in mikroenkapsuliranega PCM, medtem ko pri [24] mavčna plošča Knauf PCM SmartBoard® z vgrajenim Micronal® PCM zaključuje konstrukcijski sklop, vodne cevi pa potekajo znotraj trde poliuretanske pene. Sistema sta predstavljena na slikah 28 in 29.



Slika 28: Stropni sistem s panelom z mikroenkapsuliranim PCM in sistemom vodnih cevi za hlajenje [23]

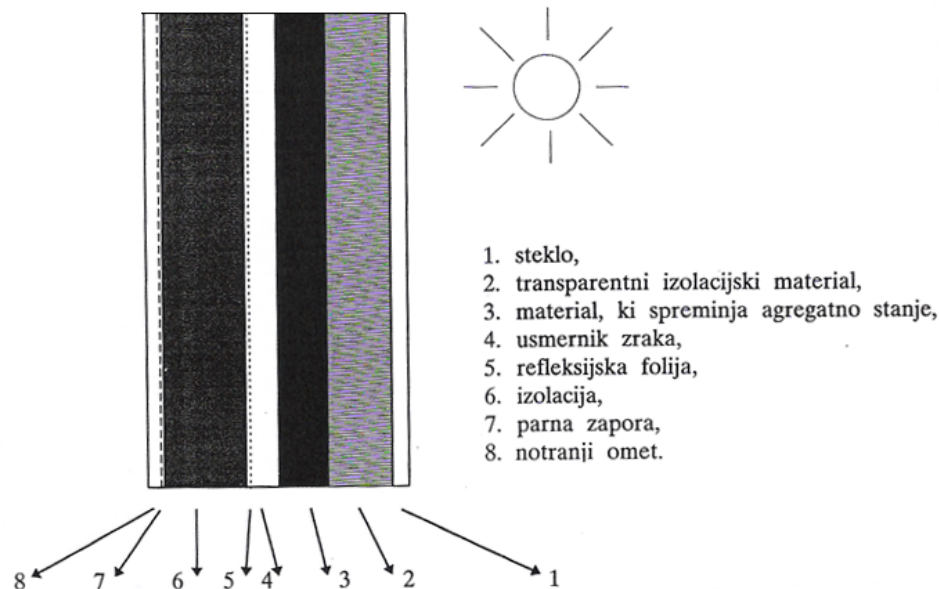


Slika 29: Stropni sistem s panelom Knauf PCM SmartBoard® in sistemom vodnih cevi za hlajenje [24]

3.3.2 Sistemi integrirani v stene

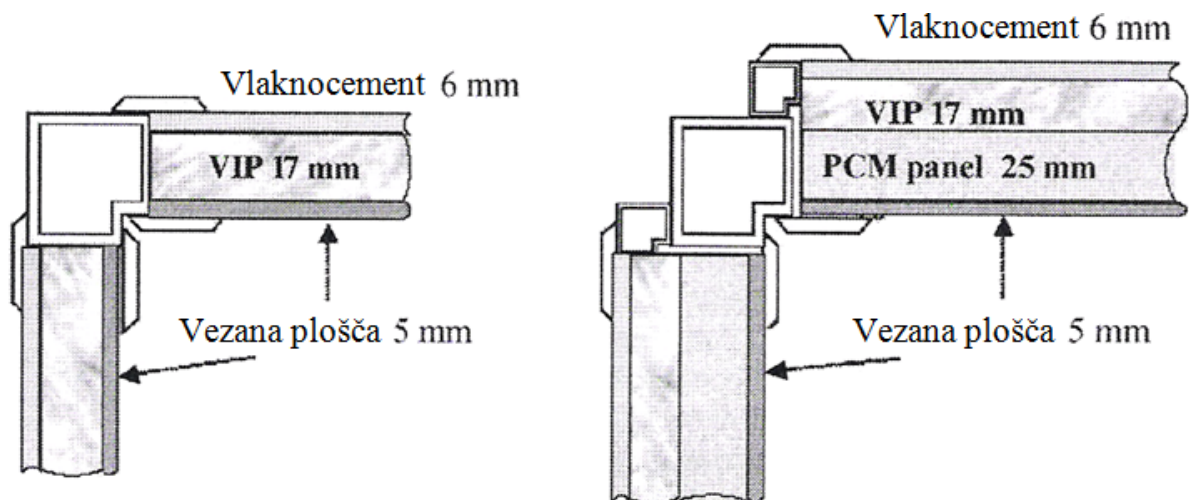
Primer je stenska konstrukcija s plastjo PCM, ki shranjeno latentno toploto uporablja za segrevanje zraka pri prezračevanju stavbe [2]. Sestavni deli so prikazani na sliki 30. Sončno sevanje prehaja skozi transparentni izolacijski material in se absorbira v PCM, ki se zaradi dovedene toplote segreva in

spreminja agregatno stanje. Temperatura tališča je izbrana tako, da temperaturni nivo ustreza ogrevanju zraka za prezračevanje stavbe. Zrak v zračni regi se konvektivno segreva, nakar ga vodimo v prostore. Tako je zaradi konstantne temperature tališča temperatura izstopnega zraka približno konstantna [2].



Slika 30: Stenska konstrukcija [2]

Kot izboljšanje temperaturne stabilnosti tankostenske lahke fasade je bil testiran panel z vakuumsko izolacijsko ploščo (VIP) z in brez PCM PEG 600 [28], kot je prikazano na sliki 31. PEG 600 uporabljen v eksperimentu je imel rahlo drugačne lastnosti kot so predstavljene v preglednici 7, in sicer je imel fazni prehod med temperaturama 21°C in 25°C ter specifično talilno toploto 148kJ/kg.



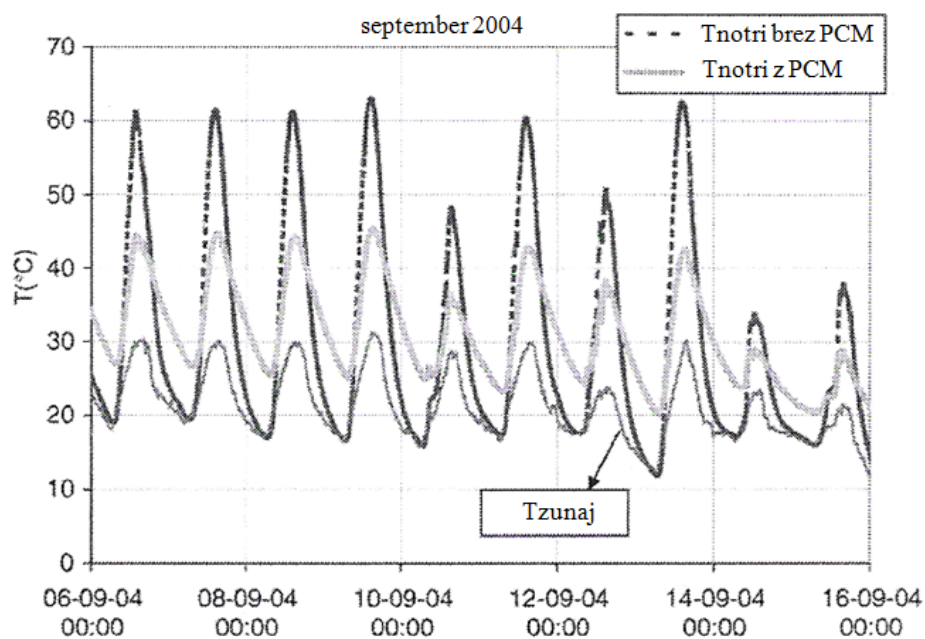
Slika 31: Fasadni panel brez plasti PCM (levo), fasadni panel s 2,5cm plastjo PCM na notranji strani (desno) [28]

Panelse je testiralo na 2 testnih celicah z južno orientacijo okna meseca septembra 2004.



Slika 32: Testni celici z dolžino stranice 90mm. Vse stranice so enake, razen južno orientirana stranska ploskev ima vgrajeno okno. Desno je prikazana lokacija senzorjev, ki so podobno nameščeni tudi v panel brez PCM [28].

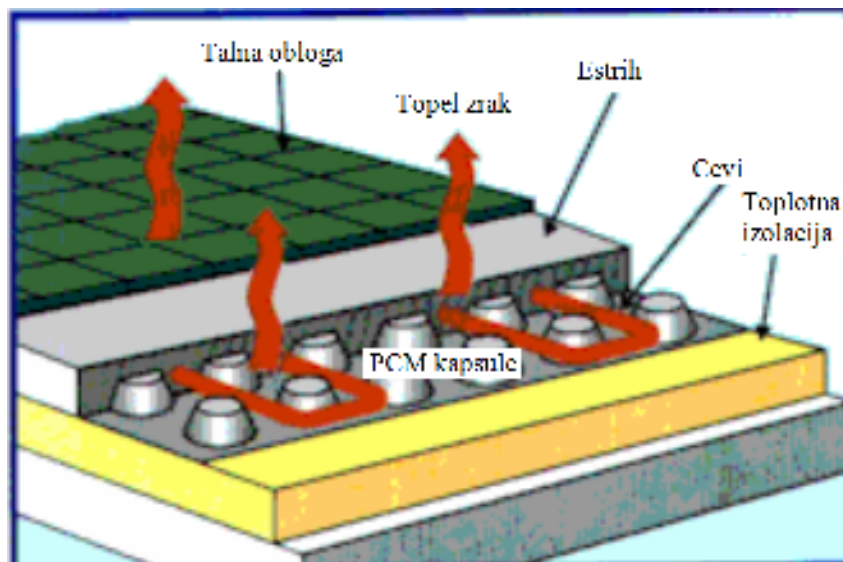
Na sliki 33 je prikazana temperatura notranje površine zahodnega panela za 10 dni na mestu notranjega senzorja prikazanega na sliki 32. V najbolj vročem delu dneva, ob zunanji temperaturi zraka okoli 30°C, je temperatura v celici brez PCM presegla 60°C, medtem ko je temperatura panela s PCM dosegla nekaj nad 40°C. Ponoči je temperatura celice brez PCM padla na nivo zunanje temperature, temperatura celice s PCM pa je ohranila okoli 8°C višjo temperaturo. Dnevno amplitudo nihanja temperature PCM zmanjša iz okoli 45°C na 20°C, kar opravičuje uporabo PCM kot dnevnega hranilnika toplote.



Slika 33: Dnevni potek temperatur zunanje zraka ter notranje ploskve panela z in brez PCM [28]

3.3.3 Sistemi integrirani v tla

Možnost shranjevanja toplote s PCM se lahko uporabi tudi v talnih sistemih. TEAP Energy, podjetje omenjeno v preglednici 7, izdeluje talni element TEA 29 Capsules prikazan na sliki 34. Kapsule so polnjene s PCM s tališčem pri 29°C.

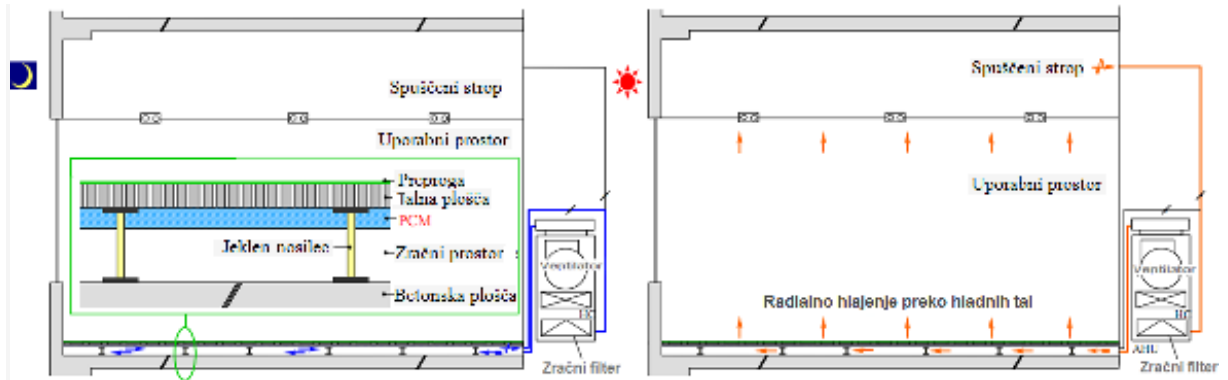


Slika 34: Talni sistem s kapsulami PCM TEA 29 Capsules [29]

Osnovna ideja sistema na sliki 34 je, da ohranja tla pri bolj ali manj konstantni temperaturi tekom dneva, to je pri temperaturi faznega prehoda izbranega PCM. Poleti se tla segrevajo zaradi direktnega zajema sončnega sevanja skozi okna, vendar ko temperatura doseže tališče in se začne prehod PCM v kapljevinsko fazo, se toplota shrani kot latentna in element se v času taljenja ne segreva. Če je tališče PCM natančno in pravilno izbrano, v času fazne spremembe tla delujejo kot sevalna površina pri temperaturi, ki predstavlja toplotno udobju uporabnikom stavbe. Sončno sevanje se torej porabi za taljenje PCM namesto za povišanje temperature v notranjosti stavbe. Ko se PCM popolnoma stopi, hladna voda, ki kroži v ceveh v sistemu, ali hladen nočni zrak, aktivira inverzni proces strjevanja PCM in sproščanja shranjene latentne toplote. Tako je PCM pripravljen na naslednji cikel. S primerno izbiro temperature tališča, je lahko podobna strategija uporabna tudi pozimi, ko se za segrevanje PCM poleg sončnega sevanja uporablja topla voda v ceveh. Prednost sistema ogrevanja s sevanjem s plastjo PCM je, da zmanjša obremenitve v vrhuncu porabe energije za ogrevanje/ hlajenje.

Koncept drugačnega sistema [30] je prikazan na sliki 35. Ponoči cirkulacija hladnega zraka v zračnem prostoru v tleh shladi primarno nosilno betonsko ploščo ter talno ploščo in plast PCM nad zračnim prostorom. Preko dneva se ves shranjen hlad porabi za odstranjevanje viškov toplote. Ponoči, ko je energija cenejša, se lahko zrak v zračnem prostoru ohladi na nižje temperature, kot so potrebne za

strjevanje PCM, tako da se vsa masa konstrukcije preko dneva počasneje segreje do temperatur, ki predstavljajo neudobje uporabnikov.



Slika 35: Hlajenje tal ponoči (levo), hladna tla hladijo prostor podnevi (desno) [30]

4 IZBIRA NAJBOLJ PRIMERNEGA PCM TER POZICIJE PLASTI PCM V KONSTRUKCIJSKEM SKLOPU NA PRIMERU IZBRANE STENSKE KONSTRUKCIJE

4.1 Prenos toplote skozi konstrukcijski sklop

Teorija prenosa toplote obravnava procese, kjer se energija prenaša zaradi razlik v temperaturi v snovi ali med telesi ter pojasnjuje mehanizme in hitrost prenosa toplote. Toplota je tisti del notranje energije, ki se prenaša ob stiku različno toplih teles; če snov sprejme toploto, se poveča njena notranja energija, če snov toploto odda, se njena notranja energija zmanjša. Toplota Q [J] se pretaka samodejno iz mesta z višjo temperaturo na mesto z nižjo temperaturo. Toplotni tok P [W = J/s] pove, koliko toplote se prenese v časovni enoti. Večja kot je razlika v temperaturi med mestoma, večji je toplotni tok.

$$P = \frac{dQ}{dt} \quad (4.1)$$

Gostota toplotnega toka q [W/m²] je definirana na enoto površine, pravokotne na smer toka:

$$q = \frac{dP}{dA} \quad (4.2)$$

V splošnem se toplota prenaša s tremi različnimi mehanizmi, ki se v naravi praviloma pojavijo istočasno:

- Prevod toplote (kondukcija) – prenos toplote v snovi ali skozi stično površino dveh teles brez mešanja in tokov snovi. Ko telesi z različnimi temperaturami staknemo, se notranja energija prek toplotnega stika prenaša iz toplejše v hladnejšo snov s trki med molekulami staknjenih teles.
- Prestop toplote (konvekcija) – prenos toplote iz ali v tekočino (kapljevino ali plin) ob mešanju makroskopskih "delcev". Gibanje "delcev" je lahko posledica razlike v temperaturah med "delci" in zato različne gostote snovi, na katero deluje zemeljska težnost. Ko je prvotno mirujoča tekočina v stiku s toplejšo površino, se njeni deli segrevajo, posledično pade njihova gostota, zato se zaradi vzgona začnejo dvigati, na njihovo mesto pa doteka sveža tekočina. Ta pojav imenujemo naravna konvekcija. Gibanje "delcev" pa je lahko posledica dovedenega dela (prisilna konvekcija). V mirujočih tekočinah se toplota prenaša le s kondukcijo.

- Sevanje (radiacija) – oddajanje elektromagnetnega valovanja. Radiacijska toplota je tista, ki se prenaša med dvema telesoma, ki nista v neposrednem stiku.

Prevod toplote je transport energije na osnovi temperaturnih gradientov v snovi. V trdnih telesih, ki niso propustna za termično sevanje, se energija prenaša samo s prevodom toplote, medtem ko se v plinih in kapljevinah proces energijskega transporta poveča s tokovnim gibanjem (konvekcija) in sevanjem. Transport toplote v snovi lahko opišemo z vektorskim poljem gostote toplotnega toka \vec{q} , ki na določenem mestu določa velikost in smer energijskega toka in je v splošnem odvisen še od časa. Njegova smer je po definiciji smer pretakanja toplote, to je v smeri manjšanja temperature. Sorazmernostna konstanta se imenuje toplotna prevodnost λ .

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad}T \quad (4.3)$$

Za enodimenzionalen prevod toplote, ko se temperatura spreminja samo v eni koordinatni smeri, velja:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (4.4)$$

Osnovna enota za toplotno prevodnost je W/mK. To je toplotni tok, ki preteče skozi površino 1m^2 pri temperaturnem gradientu 1K/m v smeri pravokotno na površino. Je snovna lastnost in jo določamo eksperimentalno. Je skalar, če je snov izotropna. Od λ je torej odvisno, kako dobro snov prevaja toploto.

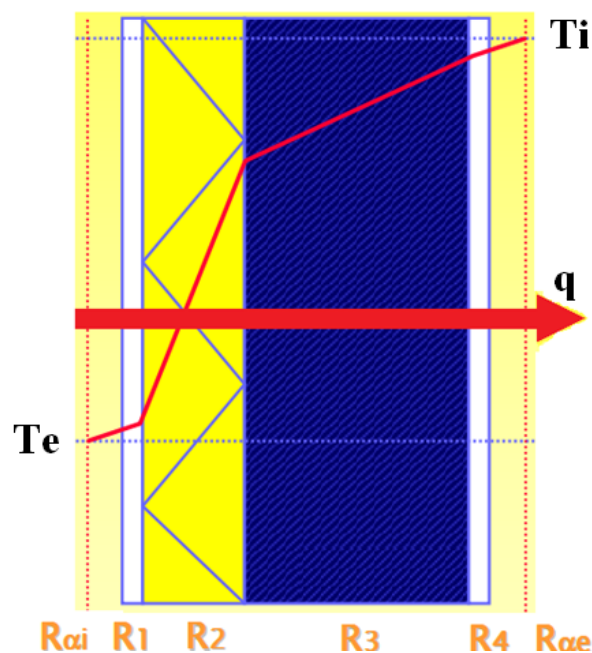
Snov z majhno toplotno prevodnostjo se imenuje toplotni izolator. Dobri izolatorji so mirujoči plini, ker so molekule plina dovolj narazen, toplota pa se prevaja s trki molekul – toplotna prevodnost je nizka, za večino plinov od nekaj $0,01$ do $0,1\text{ W/mK}$. Izjemi sta vodik in helij, ki imata majhno molekulsko maso in se zato molekule pri določeni temperaturi gibljejo hitreje kot pri drugih plinih. Na podoben način se toplota prenaša tudi v kapljevinah, le da so razdalje med molekulami manjše in na prenos toplote vplivajo medmolekulske sile. Toplotna prevodnost kapljevina je od $0,1$ do $0,3\text{ W/mK}$ z izjemo vode ($0,598\text{ W/mK}$ pri 20°C), amoniaka in živega srebra. Najvišje toplotne prevodnosti imajo trdne snovi. V teh se toplota prenaša z nihanjem kristalne mreže, v kovinah pa predvsem z gibanjem prostih elektronov. Kovine imajo toplotno prevodnost velikosti nekaj deset do 100 W/mK (baker 395 W/mK , aluminij 229 W/mK pri 20°C).

V splošnem je toplotna prevodnost odvisna od temperature in tlaka. Pri zmernih tlakih je za trdne snovi, kapljevine in pline odvisna le od temperature. V ožjem temperaturnem območju jo lahko jemljemo kot konstanto pri večini trdnih snovi, v splošnem pa jo linearno interpoliramo glede na

temperaturo. Pri gradbenih konstrukcijah pa moramo upoštevati tudi navlaženje s prodiranjem atmosferske in talne vode ali zaradi kondenzacije vodne pare. Povečanje vlažnosti snovi ima za posledico povečanje njene toplotne prevodnosti.

Prehod toplote v gradbenih konstrukcijah je posledica razlik v temperaturi med notranjostjo stavbe in okolico. Na prehod toplote vplivajo vsi trije mehanizmi prenosa toplote. V stacionarnem stanju, ko govorimo o ustaljenih temperaturnih razmerah na obeh straneh konstrukcijskega sklopa, se temperaturne razlike s časom ne spreminjajo in je toplotni tok skozi vsak prečni presek konstrukcijskega sklopa enak.

Toplotni tok skozi konstrukcijski sklop, ki v stacionarnem stanju prehaja skozi ploščinsko enoto 1m^2 , če je temperaturna razlika zraka na obeh straneh konstrukcije enaka 1K , imenujemo toplotna prehodnost U [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]. Upošteva prehod toplote skozi element ovoja stavbe in v splošnem vključuje prevajanje, konvekcijo in sevanje. Po Pravilniku o učinkoviti rabi energije v stavbah (Ur. L. RS. Št. 52/10) mora biti toplotna prehodnost gradbene konstrukcije manjša ali kvečjemu enaka največji dovoljeni toplotni prehodnosti U_{max} , ki je na primer za zunanje stene stanovanjskih objektov $0,28\text{W}/\text{m}^2\text{K}$. Ekvivalentno toplotni prehodnosti gradbene konstrukcije lahko navajamo tudi njeno toplotno upornost $R = \frac{1}{U}$ [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]. Toplotni upor ustreza padcu temperature med dvema obravnavanima mejnima ploskvama površine 1m^2 , ko skozi njiju teče toplotni tok 1W . Izolativnost plasti je tem boljša, čim večji je njen toplotni upor.



Slika 36: Stacionarni prehod toplote skozi ravno štiri-plastno steno

Način preračun toplotne prehodnosti homogenih gradbenih konstrukcij opredeljuje standard SIST EN ISO 6946. Za ravno gradbeno konstrukcijo s homogenimi plastmi, kjer toplotni tok teče pravokotno na površino konstrukcije, določimo skupno toplotno upornost konstrukcije z izrazom:

$$R = R_{\alpha i} + \sum_j R_{\lambda j} + R_{\alpha e} = R_{\alpha i} + \sum_j \frac{d_j}{\lambda_j} + R_{\alpha e} \quad (4.5)$$

kjer je:

$R_{\alpha i}$ toplotna upornost termalne plasti pri prestopu toplote na notranji strani [m²K/W]

R_{λ} toplotna upornost posameznega homogenega sloja [m²K/W]

$R_{\alpha e}$ toplotna upornost termalne plasti pri prestopu toplote na zunanji strani [m²K/W]

d_j debelina posameznega homogenega sloja [m]

λ_j toplotna prevodnost posameznega homogenega sloja [W/mK]

Toplotna prehodnost homogene gradbene konstrukcije je tedaj:

$$U = \frac{1}{R} \leq U_{\max} \quad (4.6)$$

Toplotni tok skozi konstrukcijski sklop ob stacionarnih pogojih:

$$q = U \Delta T; \quad \Delta T \text{ je temperaturna razlika med temperaturo zraka zunaj in notri} \quad (4.7)$$

Toplotni tok, ki prehaja skozi konstrukcijski sklop, pa se v praksi časovno spreminja, zato predstavljajo stacionarne analize velike poenostavitve glede na dejansko stanje. V naravi je prenos toplote vedno nestacionaren, porazdelitev temperature v gradbenih konstrukcijah se spreminja s časom. S časom se namreč spreminja temperatura okolice, sončno sevanje ter tudi temperature v prostoru zaradi sončnega sevanja in notranjih virov toplote. To pomeni, da vstopajoči toplotni tok v konstrukcijo ni vedno enak toplotnemu toku, ki na drugi strani izstopa iz konstrukcije. Torej je temperatura odvisna tako od koordinate x , kot tudi od časa t , $T = T(x, t)$.

Če opazujemo enodimenzionalni model s konstantnim prerezom S , ki leži vzdolž osi x , je množina toplote, ki jo odsek med prerezoma x in $x + dx$ dobi v časovni enoti:

$$Q = -S[q(x + dx, t) - q(x, t)] \quad (4.8)$$

Na račun prejete toplote se temperatura plasti z debelino dx in površino S v časovni enoti spremeni za:

$$\rho S c_p dx \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.9)$$

Glede na enačbo (4.4) je:

$$\rho S c_p dx \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda S \left[\frac{\partial T(x+dx,t)}{\partial x} - \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right] \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned} \left[\frac{\partial T(x+dx,t)}{\partial x} - \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right] &= \frac{\partial}{\partial x} [T(x+dx,t) - T(x,t)] = \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left[T(x,t) + \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} dx - T(x,t) \right] = \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} dx \end{aligned} \quad (4.11)$$

Obe strani enačbe (4.10) delimo z $\rho S c_p dx$ ter vstavim izraz (4.11), sledi:

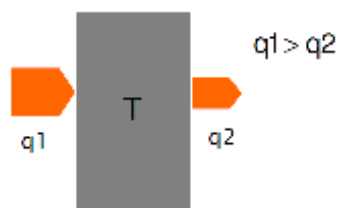
$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \quad (4.12)$$

Enačba (4.12) pove, kako se temperatura spreminja zaradi pretakanja toplote, oziroma določa porazdelitev temperature v telesu. Diferencialna enačba prehoda toplote temelji na bilanci energije za diferencialni element - sprememba toplotne energije na enoto časa v majhnem elementu mase je enaka vsoti toplotnih tokov skozi njene stene.

Toplotna prehodnost konstrukcije je pomembna, ko želimo doseči čim manjše toplotne izgube in čim večji prihranek energije. S klasičnim ogrevanjem, sistemi talnega in stenskega gretja ali s sistemi pasivnega zajema sončne energije prostor ogrevamo na želeno temperaturo. Za vzdrževanje te temperature porabimo tem manj energije, kolikor manj toplote preide skozi konstrukcijski sklop, kar zagotavljajo materiali z nizko toplotno prevodnostjo. V poletnem obdobju, ko preko dneva temperature zaradi sončnega sevanja zelo presežejo temperature, ki predstavljajo toplotno udobje posameznika, zrak ohlajamo z nočnim prezračevanjem in s klimatskimi napravami. Klimatske naprave predstavljajo veliko porabo električne energije in visoke stroške, poleg tega največ energije potrebujemo ravno v času najvišje potrošnje in najvišjih cen. V veliko primerih, ob primernem senčenju, prezračevanja s hladnim nočnim zrakom in toplotno stabilnostjo obodnih konstrukcijskih sklopov, lahko udobne toplotne razmere dosežemo brez klimatskih naprav. Z nočnim prezračevanjem masivnih stavb, ko hladen zrak oplazi in shladi masivne stene v stavbi, podnevi ni potrebno nikakršno mehansko hlajenje. Drugače pa je pri modernih lahkomontažnih stavbah z dobro toplotno izoliranimi tankimi fasadnimi paneli, saj samo z nizko toplotno prehodnostjo konstrukcije ni možno zagotoviti toplotne stabilnosti konstrukcije. Poleg toplotne prevodnosti moramo tako poznati še ostale snovne lastnosti, ki opredeljujejo nestacionarni prehod toplote. Najpomembnejša je termična difuzivnost a [m^2/s].

$$a = \frac{\lambda}{c_p \rho} \quad (4.13)$$

Poleg izbire vrste konstrukcije je odločilnega pomena pravilna izbira izolacijskih materialov. Za zaščito pred poletno vročino so najprimernejši materiali, ki nudijo zelo počasen prehod toplote, kar pomeni da izkazujejo nizko termično difuzivnost a . Termična difuzivnost opredeljuje razmerje med toplotnim tokom, ki ga neka snov prevaja in toploto, ki jo snov pri tem shrani (akumulira). Če toplotni tok, ki vstopa v konstrukcijski sklop in izstopni toplotni tok nista enaka, se telesu namreč spremeni temperatura. Toplotna prevodnost λ določa hitrost prevajanja toplote s toplih k hladnejšim delom snovi ob stacionarnih pogojih. Če temperaturnih razlik v telesu ne vzdržujemo z zunanjimi viri, se s časom manjšajo in slej ko prej dosežejo vsi deli telesa enako temperaturo. Termična difuzivnost a določa, kako hitro se temperature izenačijo.



Slika 37: Večja termična difuzivnost a pomeni, da se bo pri skokoviti spremembi vstopnega toplotnega toka q_1 izstopni toplotni tok q_2 hitreje ustabilil.

Pri visoki toplotni prevodnosti, je prenos toplote skozi snov hiter. Pri nizki toplotni kapaciteti telo pri ogrevanju absorbira le majhen delež energije. Tako se snovi z večjo termično difuzivnostjo hitreje odzivajo – ogrevajo oziroma ohlajajo ob spremembi temperature okolice.

Za blažitev porasta temperature v notranjih prostorih, ko toplotna energija vdira v notranjost, so najprimernejši gradbeni materiali z zmožnostjo, da sprejmejo in shranijo toploto, in ko temperatura v okolici pade, toploto zopet oddajo (akumulativnost materiala). To so materiali z veliko specifično toploto in gostoto. Materiali z višjo gostoto so praviloma slabši toplotno izolacijski materiali. S težjimi materiali, ki kljub temu dobro izolirajo, je možno prehod toplote omejiti in odložiti. Taki materiali imajo posebej majhno razmerje med toplotno prevodnostjo in sposobnostjo akumuliranja toplote in s tem majhno termično difuzivnost a .

Preglednica 9: Termične difuzivnosti izolacijskih in drugih gradbenih materialov pri 20°C

Snov	Toplotna prevodnost λ [W/mK]	Gostota ρ [kg/m ³]	Specifična toplota c_p [J/kgK]	Termična difuzivnost a [10 ⁻³ m ² /h]
Baker	385	8930	383	405
Aluminij	203	2700	940	288
Jeklo	53,5	7800	460	54

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 9

Votla opeka	0,52	1200	920	1,70
Beton	2,04	2400	960	3,19
Porobeton	0,2	700	860	1,20
Zid iz naravnega kamna	1,16	2000	920	2,27
Mineralna in steklena volna	0,041	35	840	5,02
Polistirenske plošče	0,041	25	1260	4,69
Pluta	0,041	120	1670	0,74
Celulozna vlakna	0,04	85	1800	0,94
Vlknaste lesene plošče	0,045	190	2000	0,43
Argon	0,018	1,8	520	69,9
CO ₂	0,016	1,8	847	37,2
Zrak	0,025	1,2	1013	76,6

Ob pravilnem izboru materialov, sestavi konstrukcijskega sklopa in izvedbi, je možno združiti zahteve po nizki toplotni prehodnosti, dobri zaščiti pred poletnim pregrevanjem, majhni masi in debelini fasadne konstrukcije ter čim nižjih stroških ogrevanja in hlajenja prostorov.

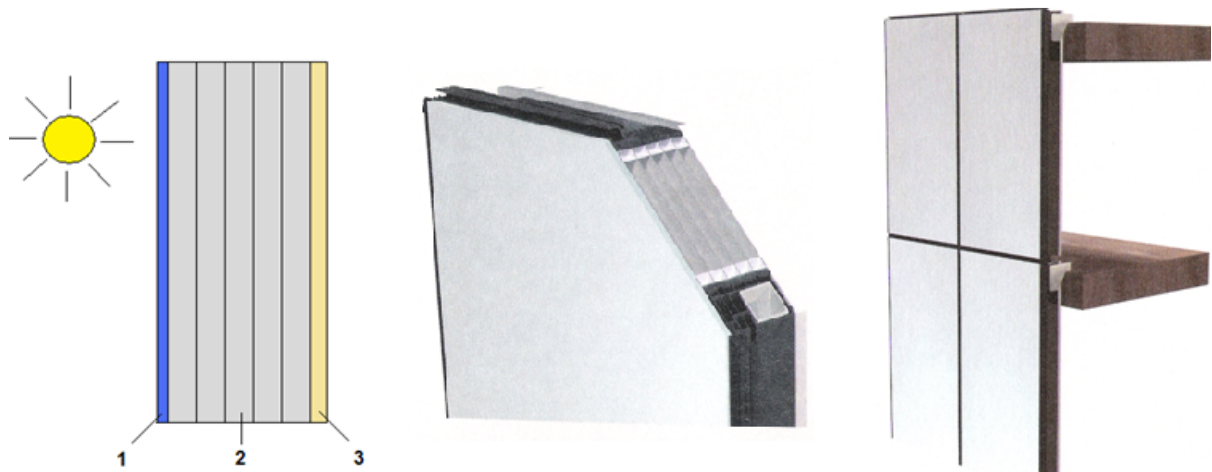
4.2 Model stenske konstrukcije

Analiziran bo modularni fasadni sistem, ki je sestavljen iz elementov s 5-komornim sistemom polnjenim s plinom CO₂, kaljenim steklom na zunanji strani in mavčno-kartonasto ploščo na notranji strani. Konstrukcija je prikazana na sliki 38, sestavni deli pa so naslednji:

1. Kaljeno steklo 8mm
2. 5-komorni sistem s skupno debelino 100mm.

Vsaka komora ima debelino 2mm, komore so ločene z 0,1mm debelo aluminijasto folijo in polnjene s plinom CO₂.

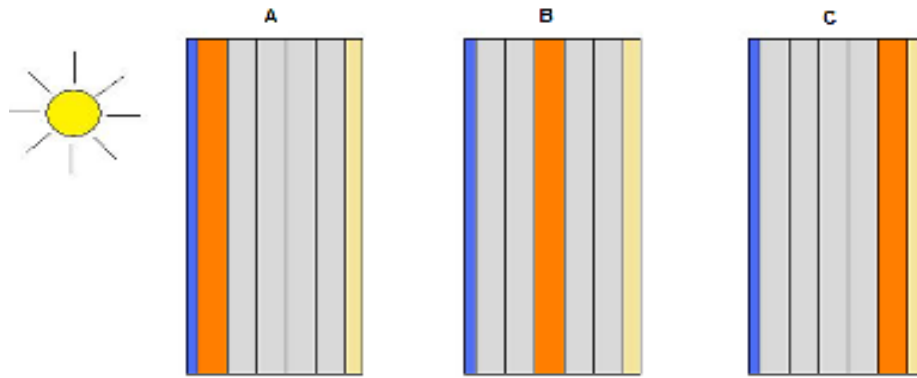
3. Mavčno-kartonasta plošča 12 mm



Slika 38: Fasadna konstrukcija [25]

Gre za visoko izolativne tanke in lahke elemente z enostavno vgradnjo. Za eno modularno enoto je po SIST EN ISO 6946 s strani proizvajalca določena toplotna prehodnost $U = 0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ oziroma $R = 4,17 \text{ m}^2\text{K/W}$. Izračun toplotne upornosti za enak konstrukcijski sklop po enačbi (4.5), celo brez upoštevanja uporov mejnih zračnih plasti $R_{ci} + R_{ce}$, nam da $R = 6,90 \text{ m}^2\text{K/W}$, ki se razlikuje od navedene vrednosti proizvajalca zaradi velikih toplotnih izgub skozi robove fasadnega elementa. Debelina panela je približno 14cm, masa na enoto površine pa približno 45kg/m^2 [25]. Kljub nizkemu U faktorju pa ima predstavljena lahka fasadna konstrukcija zelo majhno toplotno kapaciteto in toplotno stabilnost, kar ima lahko za posledico pregrevanje notranjih prostorov. Pri masivni fasadni konstrukciji je situacija obrnjena, a lahko nižji U faktor dosežemo s primerno toplotno izolacijo, vendar je v tem primeru debelina stene tudi do več kot 3-krat večja od analiziranega lahkega fasadnega sistema.

Da bi toplotno stabilnost obravnavanega konstrukcijskega sklopa izboljšali, kot hranilnik toplote izberemo tri različne PCM z različnimi temperaturami tališč. Latentno shranjevanje izberemo zaradi velike količine toplote, ki jo PCM lahko shrani na enoto mase. Tako je z vstavitvijo PCM v le eno od komor debeline 2cm dosežena veliko večja toplotna kapaciteta konstrukcijskega sklopa ob minimalno povečani masi – masa fasadnega elementa s PCM na enoto površine je približno 60kg/m^2 . Za primerjavo ima 10cm debela betonska stena maso na enoto površine približno 240kg/m^2 . Na podlagi take temperature tališča, ki omogoča, da se PCM v 24urni periodi spreminjanja temperature stali in strdi ter časa, ko se toplota zaradi sončnega sevanja porablja za taljenje PCM in je izstopni toplotni tok iz konstrukcijskega sklopa zato minimalen, bo določena najbolj primerna komora za vstavitvev PCM.



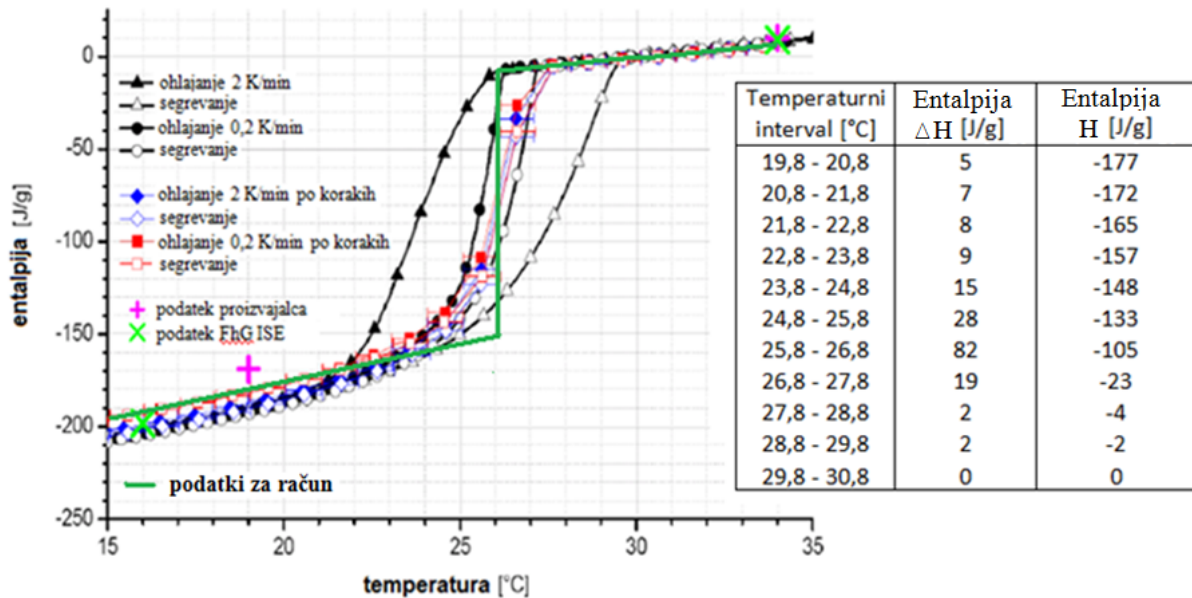
Slika 39: PCM vgrajen v zunanjo (A), sredinsko (B) ali notranjo cono (C) konstrukcijskega sklopa

V poglavju 4.3 bo, poleg konstrukcijskega sklopa brez PCM, analiziranih devet primerov konstrukcijskega sklopa s PCM. PCM bo vgrajen v zunanjo, sredinsko ali notranjo cono 5-komornega sistema (A, B, C na sliki 39), poleg tega pa bodo za vsak položaj analizirani trije PCM z različno temperaturo tališča. Specifikacija uporabljenih PCM je prikazana v preglednici 12. Gre za na trgu dostopne PCM RT21, RT27 in RT31. V preglednici 10 so prikazani podatki proizvajalca Rubitherm GmbH.

Preglednica 10: Podatki proizvajalca o PCM RT21, RT27, RT31 [6]

	RT21	RT27	RT31	
Temperaturno območje taljenja	18 – 23	25 - 28	27 – 31	°C
Temperaturno območje strjevanja	22 - 19	28 - 25	31 - 27	°C
Specifična shranjena toplota	134 (segrevanje iz 15°C na 30°C)	184 (segrevanje iz 20°C na 35°C)	169 (segrevanje iz 20°C na 35°C)	kJ/kg
Gostota trdno	880 (pri 15°C)	880 (pri 15°C)	880 (pri 15°C)	kg/m ³
Gostota tekoče	770 (pri 45°C)	760 (pri 45°C)	760 (pri 45°C)	kg/m ³
Toplotna prevodnost	0,2	0,2	0,2	W/mK
Volumska ekspanzija	14	16	16	%

Parafinski voski so amorfne trdnine, ki postopoma prehajajo iz trdnega v kapljevinsko agregatno stanje. Ne talijo se pri točno določeni temperaturi tališča, ampak v temperaturnem območju nekaj °C. Glede na meritve [8] prikazane na sliki 40 zaradi lažjega izračuna aproksimiramo podatke proizvajalca za parafin RT27.



Slika 40: Meritve ohlajanja in strjevanja komercialnega parafina RT27 [8] ter aproksimacija uporabljena v računu v poglavju 4.3. Z entalpijo 0 J/g je določen staljen PCM, ki ne more več shraniti latentne toplote.

Za RT31 so uporabljeni podatki iz [2] prikazani v preglednici 11. Ker za PCM RT21 natančnejši podatki in meritve niso na voljo, so v računu v poglavju 4.3 uporabljeni podatki, ki ustrezajo podatkom proizvajalca v preglednici 10, vendar niso eksperimentalno preverjeni.

Preglednica 11: Karakteristike PCM RT31 glede na [2]

Temperatura tališča	30	°C
Vsebnost olja	5,5	%
Gostota	1412	kg/m ³
Talilna toplota	150	kJ/kg
Specifična toplota trdnega	2,1	kJ/kgK
Specifična toplota tekočega	2,4	kJ/kgK
Toplotna prevodnost trdnega	0,2	W/mK
Toplotna prevodnost tekočega	0,15	W/mK

Podatki upoštevani v računu v poglavju 4.3 so torej kombinacija podatkov proizvajalca ter dostopnih meritev za izbrane PCM.

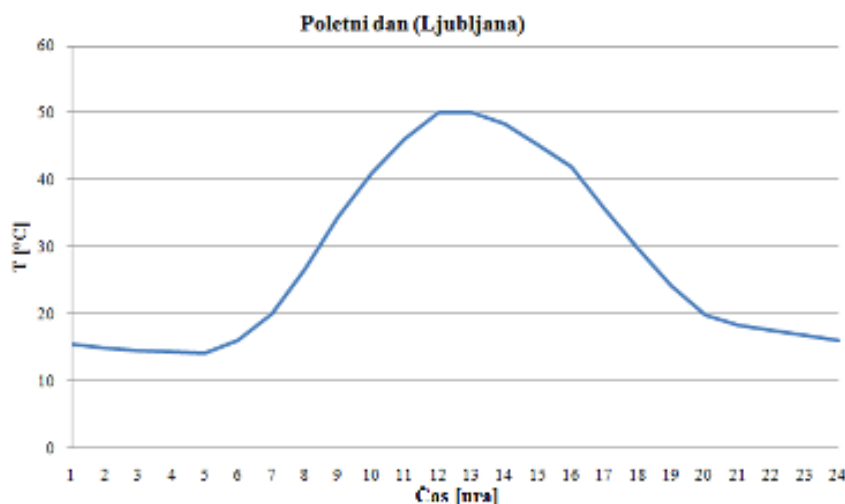
Preglednica 12: V izračunu v poglavju 4.3.1 uporabljeni podatki za tri različne PCM s tremi različnimi temperaturami tališč

	RT21	RT27	RT31	
Temperatura faznega prehoda	21	26	30	°C
Gostota	825	820	820	kg/m ³
Talilna toplota	110	140	150	kJ/kg
Specifična toplota trdno	3	4	2,1	kJ/kgK
Specifična toplota tekoče	1	1,5	2,4	kJ/kgK
Toplotna prevodnost	0,2	0,2	0,2	W/mK

Ker se bo med analizo spreminjala samo struktura 5-komornega sistema, v računu v poglavju 4.3 nista upoštevani plasti stekla in mavčno-kartonaste plošče. Prav tako so zanemarjene aluminijaste folije, ki delijo 5-komorni sistem, saj so zelo tanke, zato imajo na toplotno prehodnost (enačba (4.5)) in toplotno kapaciteto (enačba (1.11)) konstrukcijskega sklopa zunanje stene minimalen vpliv.

4.3 Izbira optimalnega PCM in optimalne cone plasti PCM za izbran konstrukcijski sklop

Za izbiro PCM-ja z najbolj primerno temperaturo tališča so pomembne zunanje temperature in sončno sevanje za lokacijo in orientacijo objekta, kjer naj bi bil PCM vgrajen v konstrukcijski sklop zunanje stene. Obodne konstrukcije so namreč zelo izpostavljene sončnemu sevanju, zato se zunanja površina segreje na precej višje temperature kot je temperatura zunanjega zraka.



Slika 41: Površinska temperatura horizontalno postavljene temno rjave jeklene pločevine [26]

Na sliki 41 je s temperaturo površine temno rjave jeklene strehe okarakteriziran povprečen poletni dan med junijem in avgustom v Ljubljani. Povprečna najvišja dnevna temperatura zraka v opazovanem času je bila okoli 24°C. Opazimo, da so temperature, do katerih se segrejejo zunanje površine konstrukcije, veliko višje od zunanjih temperatur zraka.

4.3.1 5 – komorni sistem polnjen s CO₂ brez PCM

Analizirana bo L = 10cm debela plast CO₂, brez pregradnih aluminijastih folij v primeru, da je v začetnem stanju celotna plast pri konstanti temperaturi T_n, nato pa se na zunanjem robu 5-komornega sistema temperatura dvigne na T_z. Na notranji strani plasti CO₂ torej vzdržujemo stalno temperaturo T_n < T_z, na zunanji pa po dvigu temperature iz T_n na T_z vzdržujemo stalno temperaturo T_z. Izberemo T_n = 24°C, glede na zahtevo SIST CR 1752, da je najvišja dovoljena projektna občutena temperatura do katere se sme stavba poleti pregreti 27°C in glede na to, da je za plastjo CO₂ na notranji strani vgrajena še mavčno-kartonasta plošča. Za T_z upoštevamo T_z = 40°C, kot približno srednjo dnevno temperaturo zunanje površine 5-komornega sistema, ki povzroča segrevanje konstrukcijskega sklopa. Toplotni tok teče le pravokotno na ploskev.

Upoštevamo samo prevod toplote skozi plast CO₂, konvekcijo in prenos toplote s sevanjem zanemarimo. Debelina komore 2cm naj bi bila dovolj majhna, da je konvekcijsko gibanje plina CO₂ kot mehanizem prenosa toplote majhno, zaradi zelo nizke emisivnosti aluminija pa lahko v primerjavi s prevodom toplote zanemarimo tudi sevanje.

Lastnosti plina CO₂ so prikazane v preglednici 13. V računu so upoštevane lastnosti pri temperaturi $\frac{24^{\circ}\text{C}+40^{\circ}\text{C}}{2} = 32^{\circ}\text{C}$, ki so določene z linearno interpolacijo med temperaturama 0 in 50°C.

Preglednica 13: Lastnosti plina CO₂

Gostota	ρ	[kg/m ³]	2,373	pri -50 °C
			1,912	pri 0 °C
			1,723	pri 32 °C
			1,616	pri 50 °C
			1,4	pri 100 °C
Toplotna prevodnost	λ	[W/mK]	0,0109	pri -50 °C
			0,0143	pri 0 °C
			0,0165	pri 32 °C
			0,0178	pri 50 °C
			0,0213	pri 100 °C
Specifična toplota	c_p	[J/kgK]	828	pri 0 °C
			858	pri 32 °C
			875	pri 50 °C
			925	pri 100 °C

Najprej nas nas čas v katerem se v plasti vzpostavi stacionarno stanje, vhodni in izhodni toplotni tok v odvisnosti od časa ter toplota, ki jo plast CO₂ prejme v času, preden se vzpostavi stacionarno stanje. Koordinatna os x je usmerjena pravokotno na ravnino plasti, izhodišče je na zunanjem robu plasti.

Temperaturni profil plasti pod prej opisanimi temperaturnimi pogoji v trenutku t opisuje enačba (4.17), ki jo izpeljemo:

$$T(x, t) = T_z - \left(\frac{T_z - T_n}{L}\right)x + \Theta(x, t), \quad (4.14)$$

kjer $\Theta(x, t)$ zadošča enačbi (4.11), to je $\frac{\partial \Theta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2}$.

Upoštevamo začetni pogoj, da ima pri $t = 0$ celotna plast temperaturo T_n :

$$T(x, 0) = T_n = T_z - \left(\frac{T_z - T_n}{L}\right)x + \Theta(x, 0) \rightarrow \Theta(x, 0) = -(T_z - T_n) \left(1 - \frac{x}{L}\right) \quad (4.15)$$

Robni pogoji:

$$T(0, t) = T_z = T_z + \Theta(0, t) \quad \rightarrow \quad \Theta(0, t) = \Theta(L, t) = 0 \quad (4.16)$$

$$T(L, t) = T_n = T_z - \left(\frac{T_z - T_n}{L}\right)L + \Theta(L, t)$$

Rešitev za $\Theta(x, t)$ dobimo z metodo ločitve spremenljivk.

$$T(x, t) = T_z - \left(\frac{T_z - T_n}{L}\right)x - 2(T_z - T_n) \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{a n^2 t}{L^2}} \frac{\sin\left(\frac{n \pi x}{L}\right)}{n \pi} \quad (4.17)$$

Vsota v enačbi (4.17) hitro konvergira zaradi faktorja n^2 v eksponentu, tako je dominanten prvi člen v vsoti in zato ostale člene v računu zanemarimo.

Oceno za čas v katerem se zaradi dviga temperature na enem robu $L=10\text{cm}$ debele plasti CO₂ vzpostavi stacionarno stanje, določimo z enačbo (4.18), ki jo utemeljuje enačba (4.17). Stacionarno stanje je doseženo po času:

$$t_{\text{stac}} \approx \frac{L^2}{a} = \frac{0,1^2 \text{m}^2 \cdot 1,723 \text{kg/m}^3 \cdot 858 \text{J/kgK}}{0,0165 \text{W/mK}} \cong 896 \text{s} \cong 15 \text{min} \quad (4.18)$$

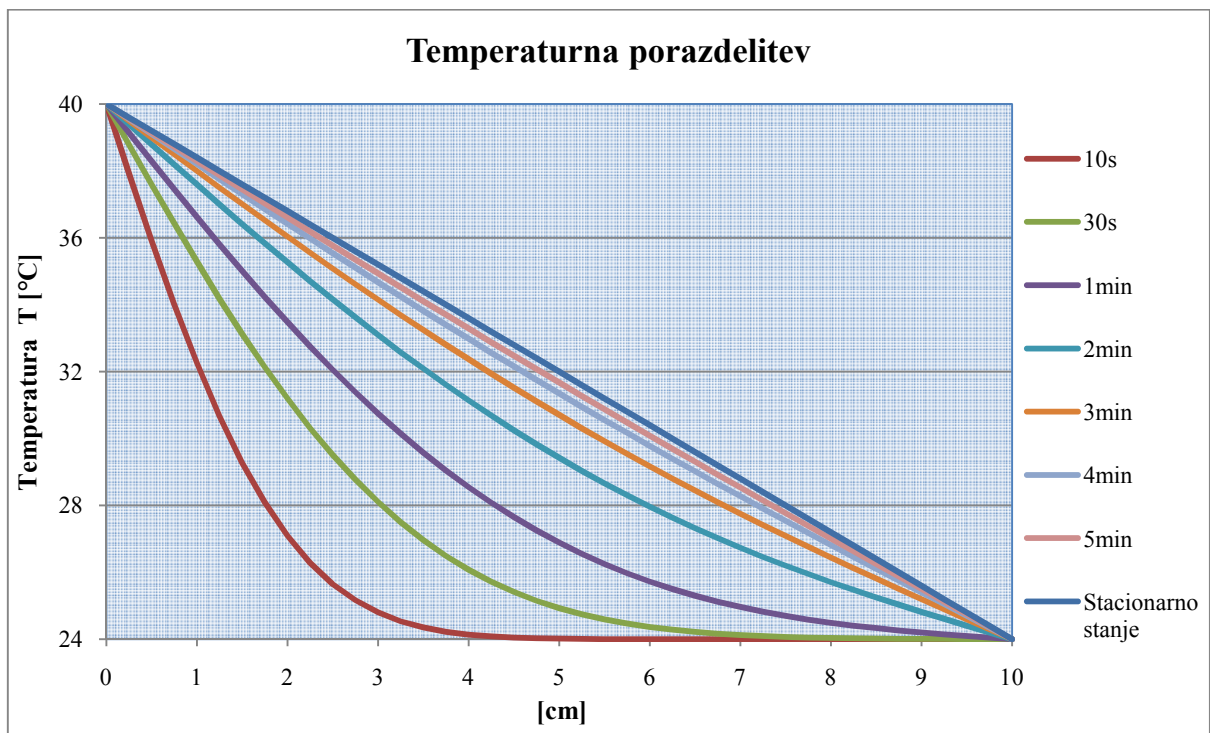
V tem primeru je eksponentni faktor v prvem členu vsote v enačbi (4.17) enak $e^{-\frac{a\pi^2 t_{stac}}{L^2}} = e^{-\frac{a\pi^2 L^2}{L^2 a}} = e^{-\pi^2} \approx 5,1 \cdot 10^{-5}$, kar pomeni da se temperature v času $t \geq t_{stac}$ samo še minimalno spreminjajo. Ko se temperature ustalijo, temperaturni profil plasti določa enačba (4.19):

$$T(x, \infty) = T(x) = T_z - \left(\frac{T_z - T_n}{L}\right)x \quad (4.19)$$

Toploto, ki jo plast z debelino L in s površino S prejme, je enaka:

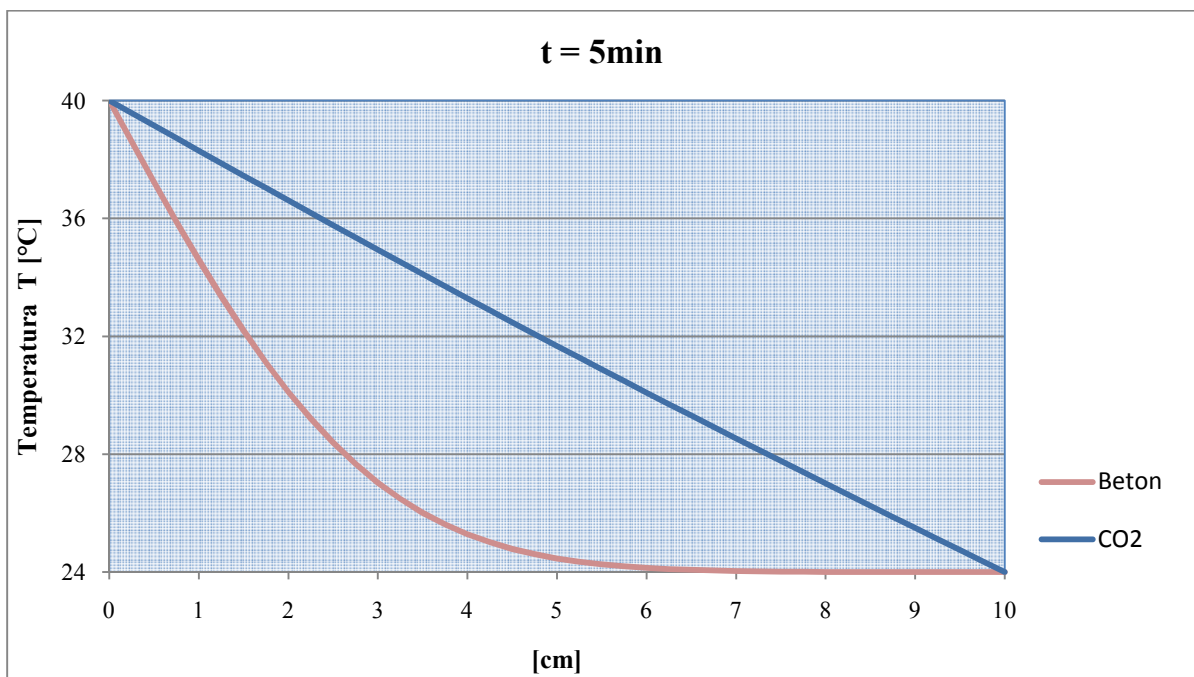
$$Q = \int_0^L \rho S c_p (T(x) - T_n) dx = \rho S c_p (T_z - T_n) \int_0^L \left(1 - \frac{x}{L}\right) dx = \frac{1}{2} \rho S L c_p (T_z - T_n) \quad (4.20)$$

Toplotna upornost 10cm debele plasti CO_2 ob upoštevanju enodimenzionalnega prevoda toplote, je po enačbi (4.5) $6,05 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$, kar pomeni nizko toplotno prehodnost plasti $0,17 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$. Čas, ki je potreben, da se po dvigu temperature na enem robu vzpostavi stacionarno stanje, je 896 sekund ≈ 15 minut po enačbi (4.18). Po tem času čez plast teče konstanten toplotni tok, ki je v primeru temperaturne razlike med notranjo in zunanjo površino $40^\circ\text{C} - 24^\circ\text{C} = 16^\circ\text{C}$ po enačbi (4.7) enak $2,65 \text{ W/m}^2$. Temperatura kot funkcija koordinate x in časa t je prikazana na sliki 42.



Slika 42: Časovno odvisen temperaturni profil plasti CO_2

Stacionarno stanje je doseženo relativno hitro, še posebej, če čas CO₂ primerjamo s časom, ki je potreben, da se stacionarno stanje vzpostavi v betonu z lastnostmi iz preglednice 9 kot značilnemu materialu za masivno gradnjo. Temperature v betonu se spreminjajo veliko počasneje, stacionarno stanje pa je doseženo šele po 188 minutah, kar je več kot 12-krat počasneje kot v CO₂. Rezultat je pričakovan, saj ima beton 12-krat nižjo termično difuzivnost, kar pomeni, da se toliko počasneje segreva oziroma ohlaja. Primerjava temperature v plasti CO₂ in plasti betona pri t = 5min pri prej opisanih pogojih spreminjanja temperature je prikazana na sliki 43.



Slika 43: Temperaturni profil v plasti CO₂ in v plasti betona pri t = 5min, če ima celotna plast začetno temperaturo 24°C, nato pa se na zunanjem robu temperatura nenadno zviša na 40°C.

Toplotna upornost 10cm debele plasti betona je veliko manjša kot toplotna upornost CO₂, in sicer je toplotna upornost po enačbi (4.5) $0,05 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$, kar pomeni kar 123-krat višjo toplotno prehodnost plasti betona kot je toplotna prehodnost plasti CO₂. V kolikor bi bile komore elementa polnjene z zrakom namesto s CO₂, bi bila toplotna upornost 10 cm debele plasti zraka $3,86 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$, kar je 1,6-krat manj od toplotne upornosti CO₂. Stacionarni toplotni tok čez plast betona pri danih temperaturnih pogojih je tako 326,4W/m², medtem ko je, kot je bilo že omenjeno, toplotni tok pri stacionarnih pogojih čez CO₂ le 2,65W/m². Nizek koeficient toplotne prehodnosti U torej ni odločilnega pomena pri izbiri konstrukcijskega sklopa, ki nudi veliko toplotno stabilnost. Za zaščito pred pregrevanjem so najboljši materiali, ki nudijo zelo počasen prehod toplote in s tem počasno segrevanje, kar pa CO₂ ni.

Toplotna kapaciteta po enačbi (1.11) da enačbo za toplotno kapaciteto plasti materiala določene debeline L na m^2 :

$$\frac{c}{s} = \frac{m c_p}{s} = \frac{\rho V c_p}{s} = \rho L c_p \quad (4.21)$$

Toplotna kapaciteta 10cm plasti CO_2 na m^2 je tako približno $148 \frac{J}{K}/m^2$. To pomeni, če 10cm debeli plasti CO_2 s površino $1m^2$ pri stalnem tlaku povišamo temperaturo za 1K, za to potrebujemo 148J toplote. Snov, ki ima veliko toplotno kapaciteto torej sprejme veliko količino toplote ob majhni spremembi temperature. Enako debela plast betona ima toplotno kapaciteto $230400 \frac{J}{K}/m^2$, kar pomeni da se beton veliko počasneje segreva in ohlaja, ker je za spremembo temperature potrebno veliko več toplote. Glede na enačbo (4.20) prejme CO_2 v času prehoda v stacionarno stanje pri danih temperaturnih pogojih $Q/S = 1,18 kJ/m^2$ toplote. Za primerjavo prejme enako debela plast betona pod istimi temperaturnimi pogoji $Q/S = 1843,2 kJ/m^2$ toplote.

Toplotni tok, ki teče v notranjost, torej tok, ki izstopa iz plasti CO_2 , se pri nestacionarnem prehodu toplote spreminja s časom. Konstanten tok čez plast teče šele, ko se vzpostavi stacionarno stanje in se temperature v plasti s časom ne spreminjajo več. Izstopni toplotni tok je v času prehajanja v stacionarno stanje nižji, kot toplotni tok, ki vstopa v plast, v odvisnosti od sposobnosti materiala, da toploto akumulira.

Konstrukcijski sklop brez materiala z veliko toplotno kapaciteto torej nudi majhno toplotno stabilnost, temperatura konstrukcije, notranje površine konstrukcije in temperatura zraka v notranjosti se tako hitro spreminjajo glede na spremembe zunanje temperature.

4.3.2 5 – komorni sistem polnjen s CO_2 in s plastjo PCM

Rešitev za lahke tankoslojne fasadne sisteme brez materiala z veliko toplotno kapaciteto in majhno termično difuzivnostjo je uporaba snovi, ki absorbira ali sprošča toploto pri spremembi agregatnega stanja, to so fazno spremenljivi materiali, PCM. Z uporabo PCM se lahko kompenzira majhna sposobnost shranjevanja toplote tankoslojnega ovoja in s tem regulacija temperature v stavbi.

Analizirani fazni materiali PCM RT21, RT27 in RT31 vgrajeni v zunanjo (A), sredinsko (B) ali notranjo (C) komoro 5-komornega sistema, bodo ocenjeni glede na čas v katerem lahko vzdržujejo konstantno temperaturo ter glede na primernost njihove temperature faznega prehoda v odvisnosti od zunanjih in notranjih temperatur ter izbrane komore. Gre za zelo grobo prvo oceno primernosti

določenega PCM in položaja plasti PCM v konstrukcijskem sklopu, saj so temperaturne razmere zelo poenostavljene.

4.3.2.1 Ocena časa taljenja plasti PCM z debelino b ob pri znani temperaturi roba plasti PCM

Materialu s fazno spremembo se med taljenjem temperatura kljub segrevanju ne povečuje, ampak se dovedena toplota porablja za prehod iz trdnega v kapljevinsko agregatno stanje. Čas taljenja plasti PCM je torej čas, ko deli konstrukcijskega sklopa na notranji strani glede na lego PCM ohranjajo konstantno temperaturo.

Ocena časa taljenja bo določena za primer, ko je na začetku celotna plast PCM v trdnem agregatnem stanju v toplotnem ravnotežju pri temperaturi faznega prehoda T_{fp} , ob času $t = 0$ pa se na zunanji robni ploskvi PCM temperatura poviša na $T_0 > T_{fp}$, ki je potem stalna. PCM se začne na tem robu taliti. Najprej se stali robna ploskev, nato pa meja $x_M(t)$ potuje v notranjost plasti PCM in ločuje dve območji: območje trdnega in območje kapljevinskega PCM.

Obravnani problem prenosa toplote imenujemo Stefanov problem. Klasičen Stefanov problem poskuša opisati porazdelitev temperature v homogeni snovi, ki zapolnjuje polprostor $x \geq 0$, med faznim prehodom z reševanjem enačbe za prevajanje toplote, kjer se določi začetna porazdelitev temperature in robni pogoj o nastajanju meje med dvema fazama. Ta meja med trdno in kapljevinsko fazo $x_M(t)$ je neznana ploskev, Stefanov problem pa imenujemo tudi robni problem s pomično mejo.

Diferencialno enačbo prehoda toplote moramo v primeru gibajoče meje zapisati v dveh enačbah:

$$- \text{ Za trdno (s) območje: } \quad \frac{\partial T_s}{\partial t} = a_s \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (4.22)$$

$$- \text{ Za kapljevinsko (l) območje: } \quad \frac{\partial T_l}{\partial t} = a_l \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (4.23)$$

kjer je $a_{s,l}$ termična difuzivnost ene in druge faze. Predpostavimo, da se toplota prenaša samo s kondukcijo, v kapljevinskem stanju konvekcijo zanemarimo.

Velja še:

$$- \text{ Robni pogoj pri } x = 0, t > 0: \quad T = T_0$$

$$- \text{ Začetni pogoj pri } t = 0, x > 0: \quad T = T_{fp}$$

$$x_M(0) = 0$$

- Na meji med fazama $x = x_M$ velja zakon o ohranitvi energije, kjer predpostavimo približno enaki gostoti kapljevine in trdne snovi, tako da ni potrebno upoštevati spremembe prostornine pri taljenju in strjevanju ter gibanja snovi. Sledi,

$$\left[\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \Big|_M - \lambda_l \frac{\partial T_l}{\partial x} \Big|_M \right] dt = \rho q_t dx_M \quad (4.24)$$

Enačbo (4.24) delimo z dt na obeh straneh in dobimo enačbo (4.25), ki jo imenujemo enačba za potovanje meje x_M ali Stefanov pogoj na meji med fazama.

$$\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \Big|_M - \lambda_l \frac{\partial T_l}{\partial x} \Big|_M = q_t \rho \frac{dx_M}{dt} \quad (4.25)$$

$\frac{dx_M}{dt}$ je hitrost gibanja medfazne meje in je sorazmerna gradientu temperature na meji. Hitrost meje je sorazmerna s toplotno prevodnostjo, saj je logično, da se meja premika tem hitreje, čim več toplote priteka nanjo in čim manj je odteka v strjeno plast. Obratno sorazmerna pa je z gostoto in specifično talilno toploto.

- Robni pogoj za temperaturo na trdno - tekoči meji pri $x = x_M(t)$, $t > 0$: $T_s = T_l = T_{fp}$

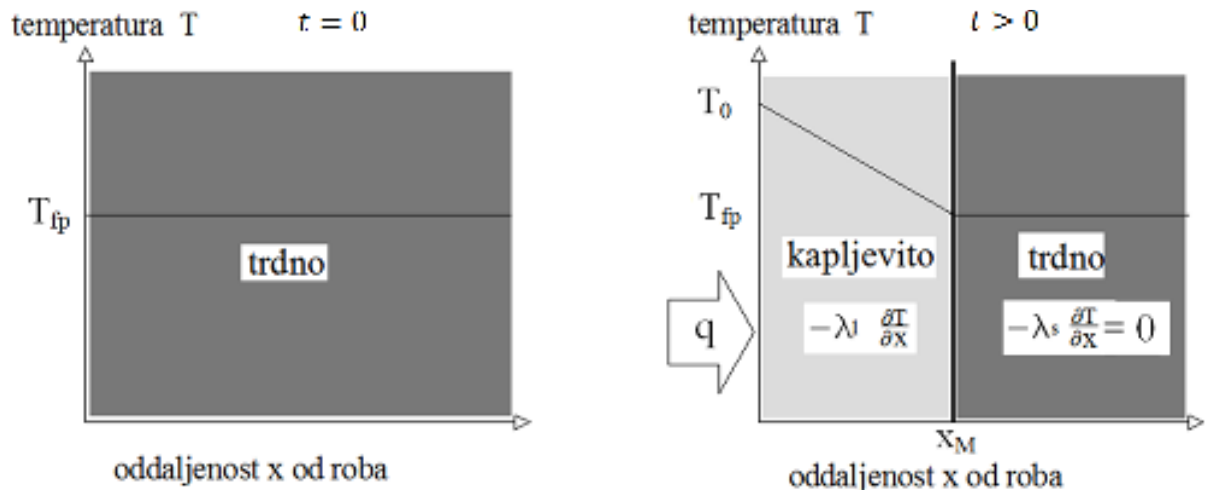
Stefanov problem je analitično rešljiv v zelo malo primerih. Upoštevati moramo namreč še temperaturno odvisnost specifične toplote in gostote; poleg tega meja ni ostra, ampak je ob njej tako imenovano kašasto območje; gostota materiala ni konstantna, v kapljevinski fazi pride do konvekcije... Splošna rešitev $T(x, t)$, tako imenovana Neumannova rešitev, je dostopna v literaturi, na primer v [27].

Za oceno časa taljenja PCM bo obravnavan preprostejši primer. Predpostavimo, da se snov tali počasi in se v kapljevini pri $x \leq x_M$ vzpostavi kvazistacionarno stanje s temperaturo, ki jo podaja enačba:

$$T_l(x) = T_0 - \frac{T_0 - T_{fp}}{x_M} x, \quad (4.26)$$

temperatura trdne faze pa je stalna in enaka T_{fp} .

Za vse analizirane PCM RT31, RT27 in RT21 po podatkih proizvajalca Rubitherm GmbH velja $\lambda_l \equiv \lambda_s = 0,2 \frac{W}{mK}$.



Slika 44: Segrevanje polneskončne plasti PCM. Ko se temperatura dvigne nad temperaturo faznega prehoda T_{fsp} se začne robna plast PCM taliti. Meja taljenja se je po nekem času premaknila za x_M od roba.

Toplota, ki priteka iz kapljevinske faze se v celoti porablja za taljenje, rob PCM $x = b$ je izoliran in med taljenjem velja $q(t, b) = 0$, če je PCM med $0 < x < b$.

Iz enačbe (4.25) v kateri upoštevamo $T_s = T_{fsp} = \text{konst.}$ in enačbe (4.26) sledi,

$$q_t \rho \frac{dx_M}{dt} = -\lambda_l \left. \frac{\partial T_l}{\partial x} \right|_M = \lambda_l \frac{T_0 - T_{fsp}}{x_M} \quad (4.27)$$

Enačbo (4.27) obrnemo:

$$x_M dx_M = \frac{\lambda_l (T_0 - T_{fsp})}{q_t \rho} dt \quad (4.28)$$

Integriramo obe strani enačbe (4.28) in dobimo:

$$t = \frac{x_M^2 q_t \rho}{2\lambda_l (T_0 - T_{fsp})} \quad (4.29)$$

Ker poznamo debelino plasti PCM $b = 2\text{cm}$, je celoten PCM stopljen ko fazna meja x_M doseže b , torej $x_M = b$. Čas v katerem se stali celotna plast PCM v odvisnosti od temperaturne razlike med temperaturo fazne spremembe izbranega PCM ter konstantno temperaturo T_0 na zunanjem robu plasti PCM:

$$t_{\text{melt}} = \frac{b^2 q_t \rho}{2\lambda_l (T_0 - T_{fsp})} \quad (4.30)$$

Da lahko opredelimo predpostavko o linearnem poteku temperature v kapljevinski fazi, vpeljemo Stefanovo število za kapljevinsko fazo $Ste(L)$:

$$Ste(L) = \frac{c_{pl}(T_0 - T_{fp})}{q_t} \quad (4.31)$$

Če je $Ste(L) \ll 1$ in je tako senzibilna toplota v primerjavi z latentno zanemarljiva sledi, da ima mehanizem prenosa toplote v kapljevinski fazi dovolj časa, da se vzpostavi kvazistacionarno stanje.

T_0 je odvisna od komore vstavitve PCM in predstavlja temperaturo zunanega roba plasti PCM. Ob vstavitvi PCM v sredinsko ali notranjo komoro 5-komornega sistema moramo upoštevati, da zunanja površina PCM meji na CO_2 s temperaturo $T_{CO_2} = T_0 > T_{fp}$. Ko na zunanjem robu 5-komornega sistema temperaturo površine stene dvignemo iz T_{fp} na $T_z = 40^\circ C$, temperaturo $T_0(t) > T_{fp}$ določimo ob predpostavki stacionarnega prehoda toplote čez CO_2 , ki se glede na račun v poglavju 4.3.1 vzpostavi zelo hitro:

$$\frac{\lambda_{CO_2}}{b_{CO_2}} (T_z - T_0(t)) = \frac{\lambda_1}{x_M(t)} (T_0(t) - T_{fp}) \quad (4.32)$$

$$T_0(t) = \frac{\frac{\lambda_{CO_2} T_z + \lambda_1 T_{fp}}{b_{CO_2} + \frac{\lambda_1}{x_M(t)}}}{\frac{\lambda_{CO_2}}{b_{CO_2}} + \frac{\lambda_1}{x_M(t)}} \quad (4.33)$$

Čas taljenja $b = 2\text{cm}$ debele plasti PCM, torej čas ko fazna meja doseže $x_M(t) = b$ ob temperaturi taljenja $T_0(t)$, določimo z enačbo (4.37), ki jo izpeljemo:

$$P = \frac{T_z - T_{fp}}{R_{CO_2} + R_1} ; \quad \frac{T_z - T_{fp}}{\frac{b_{CO_2} + x_M}{\lambda_{CO_2}} + \frac{x_M}{\lambda_1}} = q_t \rho \frac{dx_M}{dt} \quad (4.34)$$

Enačbo (4.34) preuredimo:

$$\left[\frac{T_z - T_{fp}}{q_t \rho} \right] dt = \left[\frac{b_{CO_2}}{\lambda_{CO_2}} + \frac{x_M}{\lambda_1} \right] dx_M \quad (4.35)$$

Enačbo (4.35) integriramo:

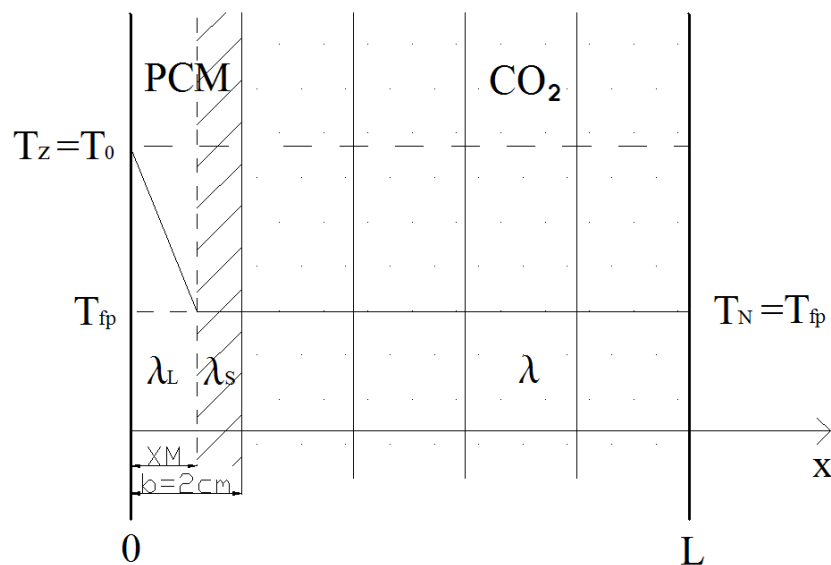
$$\left[\frac{T_z - T_{fp}}{q_t \rho} \right] t = \frac{b_{CO_2}}{\lambda_{CO_2}} x_M + \frac{x_M^2}{2\lambda_1} \quad (4.36)$$

In dobimo:

$$t_{\text{melt}} = \frac{b^2 q_t \rho}{2\lambda_1(T_z - T_{fp})} \left[1 + \frac{2\lambda_1 b_{\text{CO}_2}}{\lambda_{\text{CO}_2} b} \right] \quad (4.37)$$

Če je PCM v zunanji coni in zunanja plast PCM ne meji na CO₂ ($b_{\text{CO}_2} = 0$), je $T_0 = T_z$ in enačba (4.37) se poenostavi v enačbo (4.30).

A) PCM vgrajen v zunanjo komoro



Slika 45: Taljenje PCM-ja v zunanji komori. Na začetku je cel konstrukcijski sklop pri temperaturi faznega prehoda ($T_{fp}(A1)=30^{\circ}\text{C}$, $T_{fp}(A2)=26^{\circ}\text{C}$, $T_{fp}(A3)=21^{\circ}\text{C}$), ko temperaturo na površini $x=0$ povečamo na $T_z=T_0=40^{\circ}\text{C}$, se PCM prične taliti. Ko $x_M = b$ je staljena celotna plast PCM.

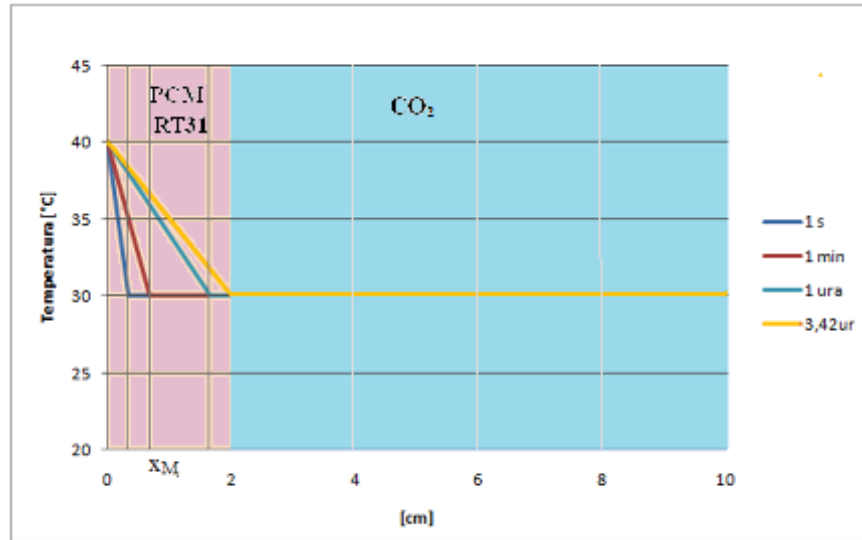
A1) RT 31

Čas taljenja 2cm debele plasti PCM RT31, ko je na začetku celotna plast PCM v trdnem agregatnem stanju v toplotnem ravnotežju pri temperaturi faznega prehoda $T_{fp} = 30^{\circ}\text{C}$, ob času $t = 0$ pa na zunanji robni ploskvi temperaturo povišamo na $T_z = T_0 = 40^{\circ}\text{C}$, ki je potem stalna, določen z enačbo (4.30):

$$t_{\text{melt}} = 12300\text{s} = 3,42\text{ur}$$

$$\text{Ste}(L) = 0,16 \ll 1$$

Količina shranjene toplote pri taljenju $Q = 2460\text{kJ/m}^2$.



Slika 46: Premikanje fazne meje x_M , dokler po 3,42 urah ni staljena celotna plast PCM RT31

A2) RT 27

Čas taljenja 2cm debele plasti PCM RT27, ko je na začetku celotna plast PCM v trdnem agregatnem stanju v toplotnem ravnotežju pri temperaturi faznega prehoda $T_{fp} = 26^\circ\text{C}$, ob času $t = 0$ pa na zunanji robni ploskvi temperaturo povišamo na $T_z = T_0 = 40^\circ\text{C}$, ki je potem stalna, določen z enačbo (4.30):

$$t_{\text{melt}} = 8200\text{s} = 2,28\text{ur}$$

$$\text{Ste}(L) = 0,15 \ll 1$$

$$\text{Količina shranjene toplote pri taljenju } Q = 2296\text{kJ/m}^2.$$

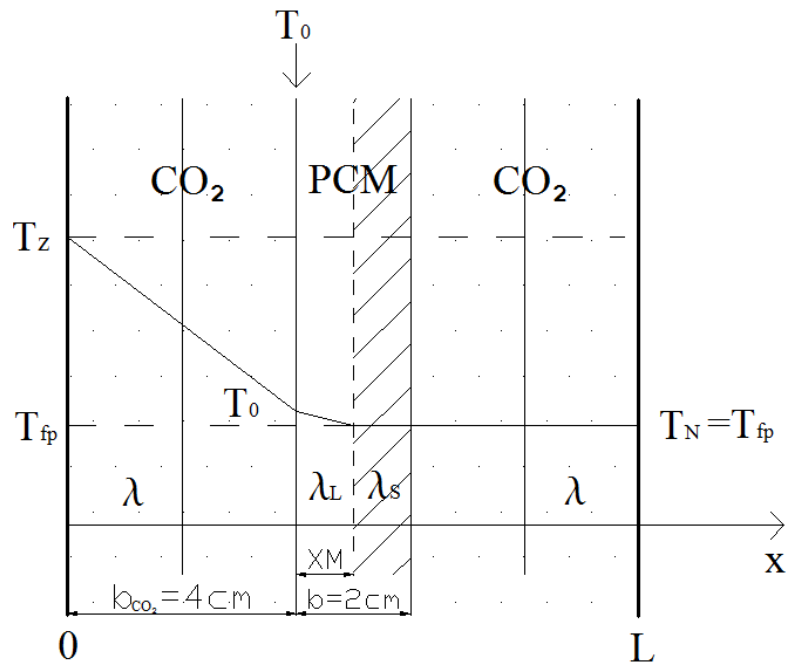
A3) RT 21

Čas taljenja 2cm debele plasti PCM RT21, ko je na začetku celotna plast PCM v trdnem agregatnem stanju v toplotnem ravnotežju pri temperaturi faznega prehoda $T_{fp} = 21^\circ\text{C}$, ob času $t = 0$ pa na zunanji robni ploskvi temperaturo povišamo na $T_z = T_0 = 40^\circ\text{C}$, ki je potem stalna, določen z enačbo (4.30):

$$t_{\text{melt}} = 4776\text{s} = 1,33\text{ur}$$

$$\text{Ste}(L) = 0,17 \ll 1$$

$$\text{Količina shranjene toplote pri taljenju } Q = 1815\text{kJ/m}^2.$$

B) PCM vgrajen v sredinsko komoro

Slika 47: Temperaturno stanje v 5-komornem sistemu med taljenjem PCM-ja v sredinski komori. Na začetku je cel konstrukcijski sklop pri temperaturi faznega prehoda ($T_{fp}(B1)=30^{\circ}\text{C}$, $T_{fp}(B2)=26^{\circ}\text{C}$, $T_{fp}(B3)=21^{\circ}\text{C}$), ko temperaturo na površini $x=0$ povečamo na $T_z=40^{\circ}\text{C}$, se robna plast PCM $x = b_{\text{CO}_2} = 4\text{cm}$ segreje do $T_0 > T_{fp}$ in PCM se prične taliti. Ko $x_M = b$ je staljena celotna plast PCM.

B1) RT 31

Čas taljenja 2cm debele plasti PCM RT31 vgrajene med dve 0,04m debeli plasti CO_2 , ko je na začetku celoten 5-komorni sistem pri temperaturi faznega prehoda PCM RT31 $T_{fp} = 30^{\circ}\text{C}$ in je PCM v trdnem agregatnem stanju, ob času $t = 0$ pa na zunanji robni ploskvi analiziranega konstrukcijskega sklopa temperaturo povišamo na $T_z = 40^{\circ}\text{C}$, je določen z enačbo (4.37). Temperatura na zunanjem robu PCM se v času taljenja dvigne iz $T_0(t = 0) = 30^{\circ}\text{C}$ na $T_0(t = t_{\text{melt}}) = 30,40^{\circ}\text{C}$ po enačbi (4.33). Za izračun Stefanovega števila kapljevinske faze za T_0 upoštevam srednjo vrednost med $T_0(t = 0)$ in $T_0(t = t_{\text{melt}})$.

$$t_{\text{melt}} = 607221\text{s} \approx 169\text{ur}$$

$$\text{Ste}(L) = 0,003 \ll 1$$

$$\text{Količina shranjene toplote pri taljenju } Q = 2460\text{kJ/m}^2.$$

B2) RT 27

Čas taljenja 2cm debele plasti PCM RT27 vgrajene med dve 0,04m debeli plasti CO₂, ko je na začetku celoten 5-komorni sistem pri temperaturi faznega prehoda PCM RT27 $T_{fp} = 26^{\circ}\text{C}$ in je PCM v trdnem agregatnem stanju, ob času $t = 0$ pa na zunanji robni ploskvi analiziranega konstrukcijskega sklopa temperaturo povišamo na $T_z = 40^{\circ}\text{C}$, je določen z enačbo (4.37). Temperatura na zunanjem robu PCM se v času taljenja dvigne iz $T_0(t = 0) = 26^{\circ}\text{C}$ na $T_0(t = t_{\text{melt}}) = 26,56^{\circ}\text{C}$ po enačbi (4.33). Za izračun Stefanovega števila kapljevinske faze za T_0 upoštevam srednjo vrednost med $T_0(t = 0)$ in $T_0(t = t_{\text{melt}})$.

$$t_{\text{melt}} = 404814\text{s} \approx 112\text{ur}$$

$$\text{Ste}(L) = 0,003 \ll 1$$

$$\text{Količina shranjene toplote pri taljenju } Q = 2296\text{kJ/m}^2.$$

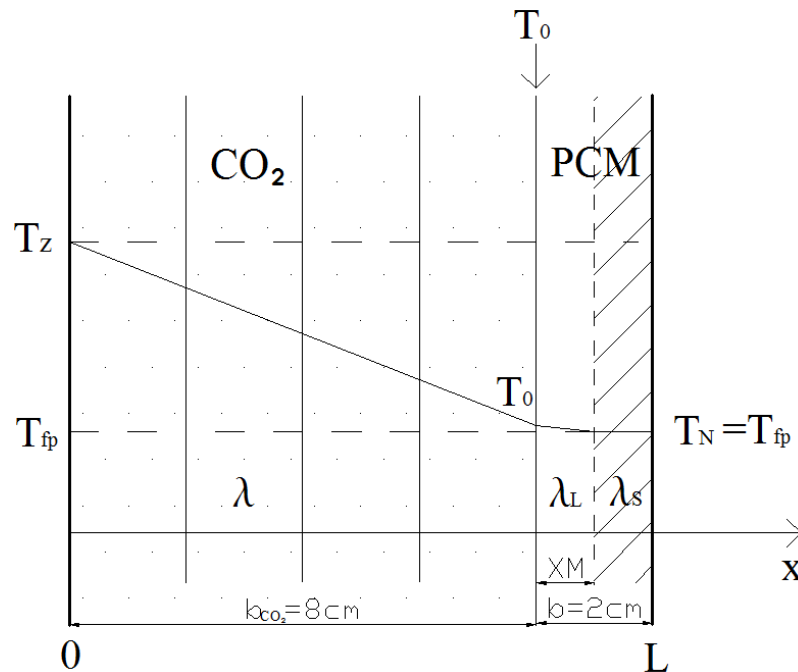
B3) RT 21

Čas taljenja 2cm debele plasti PCM RT21 vgrajene med dve 0,04m debeli plasti CO₂, ko je na začetku celoten 5-komorni sistem pri temperaturi faznega prehoda PCM RT27 $T_{fp} = 21^{\circ}\text{C}$ in je PCM v trdnem agregatnem stanju, ob času $t = 0$ pa na zunanji robni ploskvi analiziranega konstrukcijskega sklopa temperaturo povišamo na $T_z = 40^{\circ}\text{C}$, je določen z enačbo (4.37). Temperatura na zunanjem robu PCM se v času taljenja dvigne iz $T_0(t = 0) = 21^{\circ}\text{C}$ na $T_0(t = t_{\text{melt}}) = 21,75^{\circ}\text{C}$ po enačbi (4.33). Za izračun Stefanovega števila kapljevinske faze za T_0 upoštevam srednjo vrednost med $T_0(t = 0)$ in $T_0(t = t_{\text{melt}})$.

$$t_{\text{melt}} = 235795\text{s} \approx 65\text{ur}$$

$$\text{Ste}(L) = 0,003 \ll 1$$

$$\text{Količina shranjene toplote pri taljenju } Q = 1815\text{kJ/m}^2.$$

C) PCM vgrajen v notranjo komoro

Slika 48: Temperaturno stanje v 5-komornem sistemu med taljenjem PCM-ja v notranji komori. Na začetku je cel konstrukcijski sklop pri temperaturi faznega prehoda ($T_{fp}(C1)=30^{\circ}\text{C}$, $T_{fp}(C2)=26^{\circ}\text{C}$, $T_{fp}(C3)=21^{\circ}\text{C}$), ko temperaturo na površini $x=0$ povečamo na $T_z=40^{\circ}\text{C}$, se robna plast PCM $x = b_{CO_2} = 8\text{cm}$ segreje do $T_0 > T_{fp}$ in PCM se prične taliti. Ko $x_M = b$ je staljena celotna plast PCM.

C1) RT 31

Čas taljenja 2cm debele plasti PCM RT31 vgrajene za 0,08m debelo plasti CO_2 , ko je na začetku celoten 5-komorni sistem pri temperaturi faznega prehoda PCM RT31 $T_{fp} = 30^{\circ}\text{C}$ in je PCM v trdnem agregatnem stanju, ob času $t = 0$ pa na zunanji robni ploskvi analiziranega konstrukcijskega sklopa temperaturo povišamo na $T_z = 40^{\circ}\text{C}$, je določen z enačbo (4.37). Temperatura na zunanjem robu PCM se v času taljenja dvigne iz $T_0(t = 0) = 30^{\circ}\text{C}$ na $T_0(t = t_{\text{melt}}) = 30,20^{\circ}\text{C}$ po enačbi (4.33). Za izračun Stefanovega števila kapljevinske faze za T_0 upoštevam srednjo vrednost med $T_0(t = 0)$ in $T_0(t = t_{\text{melt}})$.

$$t_{\text{melt}} = 1202143\text{s} \approx 334\text{ur}$$

$$\text{Ste}(L) = 0,002 \ll 1$$

Količina shranjene toplote pri taljenju $Q = 2460\text{kJ/m}^2$.

C2) RT 27

Čas taljenja 2cm debele plasti PCM RT27 vgrajene za 0,08m debelo plasti CO₂, ko je na začetku celoten 5-komorni sistem pri temperaturi faznega prehoda PCM RT31 $T_{fp} = 26^{\circ}\text{C}$ in je PCM v trdnem agregatnem stanju, ob času $t = 0$ pa na zunanji robni ploskvi analiziranega konstrukcijskega sklopa temperaturo povišamo na $T_z = 40^{\circ}\text{C}$, je določen z enačbo (4.37). Temperatura na zunanjem robu PCM se v času taljenja dvigne iz $T_0(t = 0) = 26^{\circ}\text{C}$ na $T_0(t = t_{\text{melt}}) = 26,28^{\circ}\text{C}$ po enačbi (4.33). Za izračun Stefanovega števila kapljevinske faze za T_0 upoštevam srednjo vrednost med $T_0(t = 0)$ in $T_0(t = t_{\text{melt}})$.

$$t_{\text{melt}} = 801428\text{s} \approx 223\text{ur}$$

$$\text{Ste}(L) = 0,002 \ll 1$$

$$\text{Količina shranjene toplote pri taljenju } Q = 2296\text{kJ/m}^2.$$

C3) RT 21

Čas taljenja 2cm debele plasti PCM RT21 vgrajene za 0,08m debelo plasti CO₂, ko je na začetku celoten 5-komorni sistem pri temperaturi faznega prehoda PCM RT31 $T_{fp} = 21^{\circ}\text{C}$ in je PCM v trdnem agregatnem stanju, ob času $t = 0$ pa na zunanji robni ploskvi analiziranega konstrukcijskega sklopa temperaturo povišamo na $T_z = 40^{\circ}\text{C}$, je določen z enačbo (4.37). Temperatura na zunanjem robu PCM se v času taljenja dvigne iz $T_0(t = 0) = 21^{\circ}\text{C}$ na $T_0(t = t_{\text{melt}}) = 21,34^{\circ}\text{C}$ po enačbi (4.33). Za izračun Stefanovega števila kapljevinske faze za T_0 upoštevam srednjo vrednost med $T_0(t = 0)$ in $T_0(t = t_{\text{melt}})$.

$$t_{\text{melt}} = 466814\text{s} \approx 130\text{ur}$$

$$\text{Ste}(L) = 0,002 \ll 1$$

$$\text{Količina shranjene toplote pri taljenju } Q = 1815\text{kJ/m}^2.$$

4.3.2.2 Izbira najprimernejšega PCM in položaja plasti PCM glede na izračunan čas taljenja

Pri interpretaciji dobljenih rezultatov za čas taljenja 2cm debele plasti PCM z različnimi položaji v konstrukcijskem sklopu moramo biti zelo previdni, saj analiza temelji na poenostavljenih temperaturnih razmerah. Dnevne temperature namreč nihajo s spreminjajočo 24-urno periodo, v poletnih mesecih v najbolj vročem delu dneva dosežejo na površini konstrukcijskega sklopa tudi preko 60°C, ponoči pa padejo do 15°C. Ves čas se spreminja tudi temperatura T_0 na zunanjem robu PCM. Temperatura torej ne naraste v trenutku in je nato konstantna, ampak se stalno spreminja. Tudi začetni pogoj, da je konstrukcija v toplotnem ravnotežju pri temperaturi tališča je poenostavitev, ker se prehod toplote in temperaturni profil konstrukcijskega sklopa ves čas spreminjata. V našem primeru je bil opazovan čas taljenja plasti PCM v sklopu s CO₂ le pri enem, zelo poenostavljenem stanju okolja. Nam pa izbrani poenostavljeni dinamični model bolj približa odziv konstrukcijskega sklopa na dnevne zunanje spremembe temperature kot primeri stacionarnih analiz, ki podajajo kot rezultat enake vrednosti količin kot so toplotna prehodnost, toplotna zakasnitev in temperaturno dušenje za konstrukcijske sklope s toplotno izolacijo na zunanji ali notranji strani. Stacionarna analiza ne pokaže razlik v toplotnem odzivu stavbe, ki so posledica položaja toplotne izolacije in drugih sestavnih delov konstrukcijskega sklopa.

Tudi analizirana sestava konstrukcijskega sklopa v računu je poenostavljena. Poleg neupoštevanih plasti: zunanje stekla, notranje mavčne plošče in pregradnih aluminijastih folij, je prehod toplote v modularnem stavbnem ovoju odvisen tudi od stikov med fasadnimi elementi. Poenostavljene so tudi lastnosti materiala PCM, gostota v odvisnosti od temperature in agregatnega stanja, temperatura tališča, kjer je zvezni prehod med agregatnima stanjema podan z eno temperaturo ter sam izračun časa taljenja PCM. Realen matematični model nestacionarnega prehoda toplote skozi konstrukcijski sklop s fazno spremenljivim materialom v odvisnosti od časovno spremenljivega sončnega sevanja in zunanjih temperatur je namreč za pravo oceno toplotnega odziva konstrukcijskega sklopa zelo kompleksen in zahteven. Izbran računski model torej služi kot priprava na eksperimentalni model in analizo, ki je pred oceno končnega izdelka, tankoslojnim fasadnim panelom s plastjo PCM kot regulatorjem toplotnega toka in stabilizatorjem notranje temperature, nujna.

Stacionarna toplotna upornost dela izbranega konstrukcijskega sistema s štirimi komorami polnjenimi s CO₂ ter eno komoro polnjeno s PCM je v vseh primerih enaka, ne glede na lokacijo komore s PCM in izbranega PCM. Izbrani so namreč PCM z enako toplotno prevodnostjo, v računu so uporabljene konstante karakteristike plina CO₂ in znotraj konstrukcijskega sklopa v vseh primerih izbrana materiala zavzemata enako debelino. To pa ne pomeni, da se različni konstrukcijski sklopi enako odzivajo tudi na časovne spremembe temperature in se v primeru nenadnega povišanja temperature zunanje roba enako hitro segrevajo.

Preglednica 14: Primerjalna preglednica rezultatov A, B in C

	Začetna temperatura konstrukcijskega sklopa = T_{fp} [°C]	Temperatura T_0 [°C] na zunanjem robu plasti PCM, zaradi katere se PCM tali	Čas taljenja plasti PCM t_{melt} [ur]	Stefanovo število $Ste(L)$	Shranjena toplota Q [kJ/m ²]
A - PCM vgrajen v zunanjo cono					
A1) RT 31	30	40	3,42	0,16	2460
A2) RT27	26	40	2,28	0,15	2296
A3) RT21	21	40	1,33	0,17	1815
B - PCM vgrajen v sredinsko cono					
B1) RT 31	30	30,40	169	0,003	2460
B2) RT27	26	26,56	112	0,003	2296
B3) RT21	21	21,75	65	0,003	1815
C - PCM vgrajen v notranjo cono					
C1) RT 31	30	30,20	334	0,002	2460
C2) RT27	26	26,28	223	0,002	2296
C3) RT21	21	21,34	130	0,002	1815

Stefanovo število kapljevinske faze, kot predpogoj za uporabo izbrane enačbe (4.37) za čas taljenja PCM, v vseh primerih A, B in C ustreza kriteriju, da mora biti manjše od 1. Pod danimi pogoji se vsi izbrani PCM talijo dovolj počasi, da se vzpostavi kvazistacionarno stanje. Stefanovo število v primerih B in C je veliko manjše, kot v primeru A, saj je temperaturna razlika $T_0 - T_{fp}$ v enačbi (4.31) v primerih B in C toliko manjša kot v primeru A. Temperatura T_0 v primerih B in C je le malo višja (manj kot 1°C) od temperature faznega prehoda PCM, zato je $Ste(L) \ll 1$ in PCM se tali zelo počasi.

Če so časi taljenja v primeru A nekaj ur, so v primeru B in C nekaj dni ob enakih temperaturnih pogojih. Ob upoštevanju dnevnega nihanja zunanje temperature se PCM ciklično tali in strjuje. Zunanje temperature presegajo temperaturo fazne spremembe PCM kvečjemu 12 ur dnevno, kar pomeni, da se v tem času v primerih B in C stali samo del PCM in ne celotna 2cm debela plast. Opazimo tudi, da se časi taljenja PCM ob prestavitvi PCM iz sredinske v notranjo cono podvojijo. V primerih B je oddaljenost plasti PCM od zunanje strani 5-komornega sistema $b_{CO_2}=4\text{cm}$, v primerih C pa $b_{CO_2}=8\text{cm}$, kar pomeni polovico manjšo temperaturno razliko $T_0 - T_{fp}$ glede na izračun T_0 po enačbi (4.37). V vseh primerih A, B in C enak PCM shrani enako količino toplote, saj je upoštevana samo latentna toplota, ki se shrani v času, ko se stali celotna plast PCM – to je lastnost materiala, saj je talilna toplota definirana s kJ/kg.

Glede na izbrane pogoje se najhitreje stalijo PCM-ji vgrajeni v zunanjo komoro, to so primeri A1, A2, A3. Taliijo se v odvisnosti od temperature $T_0 = 40^\circ\text{C}$ do katere se zaradi sončnega sevanja poleti povprečno segreje zunanja plast konstrukcijskega sklopa. Kot rezultat analize dobimo, da je čas konstantne temperature notranje površine enak času taljenja plasti PCM zaradi povišane temperature samo na zunanji strani konstrukcijskega sklopa. V primeru A1 je to 3,42 ure, v primeru B1 2,28 ure in v primeru C1 1,13 ure. Do razlik v času taljenja pride zaradi različnih temperatur taljenja PCM-jev v primerih A1, A2 in A3. Glede na rezultate in dobljene čase taljenja, so za primer vgradnje PCM v zunanji sloj konstrukcijskega sklopa za blaženje poletnih temperatur boljši PCM z višjimi temperaturami tališč, to so temperature, ki so podobne oziroma nekaj stopinj nižje od temperatur do katerih se segreje zunanja površina konstrukcijskega sklopa. Sposobnost latentnega shranjevanja toplote PCM z nižjimi temperaturami je pri izbranih dimenzijah v vročih sončnih dneh zelo hitro izčrpana. Vendar visoka temperatura tališča pomeni uporabnost sistema le največ nekaj mesecev v letu, ko se temperature dvignejo nad temperaturo tališča izbranega PCM. Vsi izbrani PCM, RT31, RT27 in RT21, se ob položaju v zunanji komori stalijo prehitro, da bi ob visokih poletnih zunanjih temperaturah za dovolj časa upočasnili toplotni tok v notranjost, če upoštevamo 24-urno dinamiko temperature. V času taljenja PCM je izstopni toplotni tok, ki prehaja v prostor minimalen, saj se toplota, ki priteka v konstrukcijski sklop porablja za taljenje PCM. PCM ima sposobnost akumulacije latentne toplote. V primeru A zunanjega položaja PCM v konstrukcijskem sklopu se najdlje od vseh analiziranih PCM tali RT31, kar pomeni, da za najdlje časa upočasnjuje segrevanje konstrukcijskega sklopa nad temperaturo tališča PCM RT31.

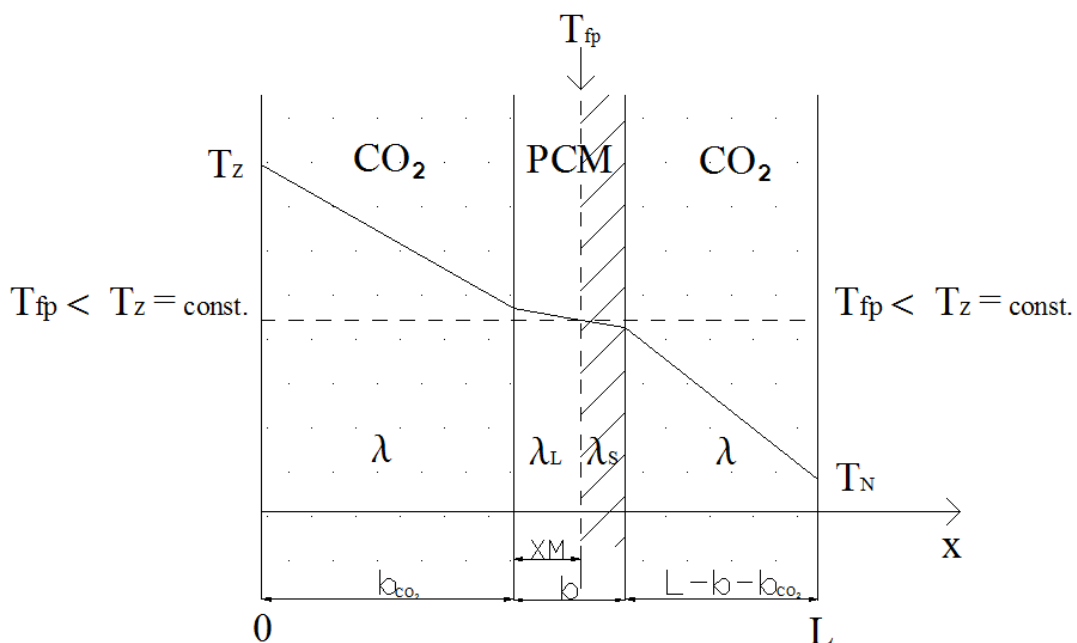
V primeru A je toplotno izolacijska plast na notranji strani, kar preprečuje prehod toplote v obeh smereh, preprečuje tako toplotne izgube kot toplotne doprinose pozimi. Tak položaj toplotne izolacije poleti upočasnjuje prehod toplote v notranjost prostora oziroma pozimi prehod toplote iz prostorov, vendar se površinska temperatura notranjih obodnih površin zaradi sončnega sevanja skozi steklene površine in nizkih nočnih temperatur hitro spreminja s časom. 8cm debel toplotno izolacijski sloj CO_2 ima majhno toplotno kapaciteto in ni sposoben shraniti velike količine toplote v primerjavi z masivnejšimi materiali. V računskem modelu je predvidena konstantna temperatura notranje površine 5-komornega sistema, segrevanje zaradi sončnega sevanja skozi steklene površine in spreminjanje temperature notranje mejne plasti ni upoštevano. V realnosti se v primeru notranjega položaja toplotne izolacije in odsotnosti materiala, ki se počasi segreva, temperature notranje površine konstrukcijskega sklopa spreminjajo v odvisnosti od notranjih virov in direktnega zajema sončnega sevanja, na kar PCM vgrajen v zunanjo komoro ne vpliva. S tega stališča je vgradnja PCM na zunanjo stran konstrukcijskega sklopa vprašljiva, saj ob visokih zunanjih temperaturah v času taljenja PCM sicer prepreči hiter dvig temperature konstrukcijskega sklopa, nima pa funkcije vzdrževalca čim bolj konstantne temperature notranje površine.

V primeru B, sredinski položaj PCM v 5-komornem sistemu, so časi taljenja PCM ob enakih temperaturnih pogojih in enaki debelini plasti PCM bistveno daljši kot pri zunanem položaju PCM (primer A). Časi taljenja v primeru A so nekaj ur, v primeru B pa nekaj dni, in sicer v primeru B1 169 ur \approx 7 dni, v primeru B2 112 ur \approx 4,7 dni in v primeru B3 165 ur \approx 2,7 dni. Do tako dolgih časov taljenja pride zaradi majhne temperaturne razlike med temperaturo tališča PCM in temperaturo, ki se na stiku CO₂ in zunanje plasti PCM vzpostavi ob danih pogojih. Ob vzdrževani konstantni temperaturi notranje površine, ki je enaka temperaturi tališča, se v primeru B1 temperatura robne plasti v času taljenja dvigne iz 30°C na 30,40°C, v primeru B2 iz 26°C na 26,56°C in v primeru B3 iz 21°C na 21,75°C. Temperaturni potek v konstrukcijskem sklopu se zaradi počasnega taljenja PCM in vzdrževanja konstantne temperature PCM med taljenjem zelo počasi spreminja. Glede na izračunane čase taljenja, ki v vseh treh primerih B1, B2 in B3 presežejo 24-urno periodo nihanja dnevnih temperatur, lahko trdimo, da vsi izbrani PCM vgrajeni v sredinsko cono uspešno ustavijo oziroma za dovolj dolgo zmanjšajo toplotni tok v prostor skozi konstrukcijski sklop in preprečijo pregrevanje konstrukcijskega sklopa zaradi visokih dnevnih zunanjih temperatur. V času taljenja PCM je izstopni toplotni tok, ki prehaja v prostor minimalen, saj se toplota, ki priteka v konstrukcijski sklop porablja za taljenje PCM s sposobnostjo akumulacije latentne toplote. Vendar v vseh treh primerih B1, B2 in B3 efektivna debelina PCM ni 2cm, kolikor meri debelina komore, saj se v času 12 ur (približen časovni interval v enem dnevu, ko je temperatura zunanje površine zaradi sončnega sevanja višja od temperatur faznih prehodov izbranih PCM) stali le del PCM. Kot v primeru A, se temperature notranje površine konstrukcijskega sklopa v primeru notranje pozicije toplotne izolacije in odsotnosti materiala, ki se počasi segreva, hitro spreminjajo v odvisnosti od notranjih virov in direktnega zajema sončnega sevanja, na kar PCM vgrajen v sredinsko komoro ne vpliva. Notranja pozicija toplotne izolacijske plasti CO₂ poleti sicer upočasnjuje prehod toplote v notranjost skozi konstrukcijski sklop, vendar temperatura v notranjosti naraste zaradi direktnega zajema sončnega sevanja, ki v računu ni upoštevan. CO₂ z majhno sposobnostjo akumulacije toplote in veliko termično difuzivnostjo α , ki se hitro odziva na spremembe temperature okolice tako nima sposobnosti vzdrževanja konstantne temperature notranje površine. Tudi vgradnja PCM v sredinsko komoro konstrukcijskega sklopa je tako vprašljiva, saj ob visokih zunanjih temperaturah za čas taljenja sicer prepreči pregrevanje konstrukcijskega sklopa zaradi indirektnega zajema sončnega sevanja, ne vpliva pa na segrevanje notranje plasti konstrukcijskega sklopa zaradi direktnega zajema sončnega sevanja.

Najdaljši izračunani časi taljenja so v primeru C, notranji položaj PCM, in sicer v primeru C1 334 ur \approx 14 dni, v primeru C2 223 ur \approx 9,3 dni in v primeru C3 1130 ur \approx 5,4 dni. Ob vzdrževani konstantni temperaturi notranje površine konstrukcijskega sklopa, ki je enaka temperaturi faznega prehoda izbranega PCM, se v primeru C1 temperatura robne plasti v času taljenja dvigne iz 30°C na 30,20°C, v primeru C2 iz 26°C na 26,28°C in v primeru B3 iz 21°C na 21,34°C. PCM upočasnjuje segrevanje konstrukcijskega sklopa zaradi indirektnega zajema sončnega sevanja, saj se dovedena toplota porablja

za taljenje PCM in ne za njegovo segrevanje. Kot v primeru B tudi v primeru C časi taljenja presežejo 24-urno periodo nihanja dnevnih temperatur in debelina PCM 2cm ni učinkovita. To velja le ob predpostavki, da je notranja temperatura stalna in enaka temperaturi tališča PCM

Za plast PCM s funkcijo stabilizatorja notranje temperature je najbolj primeren položaj na notranji strani konstrukcijskega sklopa. PCM omogoča shranjevanje toplote, ob majhni temperaturni spremembi sprejme veliko količino toplote in se počasi odziva na spremembe temperature okolice. Temperatura, ki jo PCM ohranja med taljenjem je znotraj ozkega temperaturnega intervala v okolici temperature faznega prehoda. Za oceno časa taljenja obravnavanih PCM RT31, RT27 in RT21 je začetna temperatura konstrukcijskega sklopa in temperatura, ki jo vzdržujemo na notranji strani 5-komornega sistema enaka temperaturam faznega prehoda izbranega PCM, kar pomeni v primeru RT31 $T_n = 30^\circ\text{C}$, v primeru RT27 $T_n = 26^\circ\text{C}$ in v primeru RT21 $T_n = 21^\circ\text{C}$. Vzdrževani temperaturi notranje površine 5-komornega sistema v primerih izbranih PCM RT31 in RT27 ($T_n = 30^\circ\text{C}$ oziroma $T_n = 26^\circ\text{C}$) sta visoki v primerjavi s temperaturami notranjih obodnih površin prostorov, ki jih uporabniki stavbe želijo poleti in glede na zahtevo SIST CR 1752, da je optimalna občutena temperatura približno 20°C in najvišja dovoljena projektna občutena temperatura do katere se sme stavba poleti pregrete 27°C . V primeru, da na notranji strani 5-komornega sistema vzdržujemo temperaturo površine, ki je nižja od temperature faznega prehoda PCM $T_n < T_{fp}$, je od temperature faznega prehoda PCM T_{fp} in od položaja PCM v konstrukcijskem sklopu odvisno, ali se bo PCM ob temperaturi zunanje površine $T_z > T_{fp}$ sploh talil.



Slika 49: Primeren položaj $b=2\text{cm}$ debele plasti PCM v konstrukcijskem sklopu, da pride do taljenja PCM in shranjevanja latentne toplote, če je temperatura zunanje površine $T_z = \text{const.} > T_{fp}$ in temperatura notranje površine $T_n = \text{const.} < T_{fp}$.

Preveriti želimo, če sta PCM RT31 in RT27 primerna za vgradnjo v notranjo komoro 5-komornega sistema. Primerno oddaljenost plasti PCM od zunanega roba 5-komornega sistema b_{CO_2} določimo ob upoštevanju stacionarnih pogojev z enačbama (4.41) in (4.42) izpeljanima v nadaljevanju.

Območje znotraj katerega mora ležati b_{CO_2} določimo na naslednji način:

Označimo $x_M(\text{stac. stanje}) = \widetilde{x}_M$; $\Delta T_z = T_z - T_{fp}$; $\Delta T_n = T_{fp} - T_n$ in upoštevamo, da je toplotni tok skozi vsak prečni presek konstrukcijskega sklopa v stacionarnih pogojih enak $\frac{d\widetilde{x}_M}{dt} = 0$, sledi

$$\frac{\Delta T_z}{\frac{b_{CO_2} + \widetilde{x}_M}{\lambda_{CO_2}} + \frac{\widetilde{x}_M}{\lambda_1}} = \frac{\Delta T_n}{\frac{b - \widetilde{x}_M}{\lambda_s} + \frac{L - b_{CO_2} - b}{\lambda_{CO_2}}} \quad (4.38)$$

Enačbo (3.38) preuredimo in delimo z $\lambda_1 \lambda_s$:

$$\Delta T_z \lambda_1 \left[b - \widetilde{x}_M + \frac{\lambda_s}{\lambda_{CO_2}} (L - b_{CO_2} - b) \right] = \Delta T_n \lambda_s \left[\widetilde{x}_M + \frac{\lambda_1}{\lambda_{CO_2}} b_{CO_2} \right] \quad (4.39)$$

Enačbo (4.39) preuredimo in delimo z $\Delta T_z \lambda_1 [\Delta T_z \lambda_1 + \Delta T_n \lambda_s]$:

$$\widetilde{x}_M = \frac{b + \frac{\lambda_s}{\lambda_{CO_2}} (L - b_{CO_2} - b) - \frac{\Delta T_n}{\Delta T_z} \frac{\lambda_s}{\lambda_{CO_2}} b_{CO_2}}{1 + \frac{\Delta T_n \lambda_s}{\Delta T_z \lambda_1}} \quad (4.40)$$

- a) Izberemo $\widetilde{x}_M = b$. Določimo $b_{CO_2,1}$, ki določa položaj robne plasti PCM, če je staljena celotna plast PCM in je temperatura T_{fp} v konstrukcijskem sklopu na notranjem robu plasti PCM. V enačbo (4.40) vstavimo $\widetilde{x}_M = b$, sledi

$$b_{CO_2,1} = \frac{(L-b) - b \frac{\lambda_{CO_2}}{\lambda_1} \frac{\Delta T_n}{\Delta T_z}}{1 + \frac{\Delta T_n}{\Delta T_z}} \quad (4.41)$$

- b) Izberemo $\widetilde{x}_M = 0$. Določimo $b_{CO_2,2}$, ki določa položaj robne plasti PCM, če se plast PCM še ni začela taliti in je temperatura T_{fp} v konstrukcijskem sklopu na zunanjem robu plasti PCM. V enačbo (4.39) vstavimo $\widetilde{x}_M = 0$, sledi

$$b_{CO_2,2} = \frac{(L-b) + b \frac{\lambda_{CO_2}}{\lambda_s}}{1 + \frac{\Delta T_n}{\Delta T_z}} > b_{CO_2,1} \quad (4.42)$$

PCM se bo talil le, če je b_{CO_2} manjši od $b_{CO_2,2}$. Če je $b_{CO_2,2} < b_{CO_2,1}$, se bo stalil celoten PCM.

Preglednica 15: Potrebna oddaljenost izbranega PCM od zunanjega roba 5-komornega sistema stavbnega ovoja ob temperaturi zunanje površine $T_z=40^\circ\text{C}$ in temperaturi notranje površine $T_n=24^\circ\text{C}$

	T_{fp} [$^\circ\text{C}$]	T_z [$^\circ\text{C}$]	T_n [$^\circ\text{C}$]	$b_{CO_2,1}$ [cm]	$b_{CO_2,2}$ [cm]
RT31	30	40	21	4,9	5,1
RT27	26	40	21	7,0	7,1

PCM RT31 in RT27 nista primerna za položaj v notranjosti konstrukcijskega sklopa, saj imata glede na temperature notranjih obodnih površin, ki predstavljajo udobne toplotne razmere, previsoke temperature faznega prehoda. Ob vzdrževanju temperature površine v notranjosti $T_n=24^\circ\text{C}$ in temperature zunanje površine $T_z=40^\circ\text{C}$ se PCM RT31 in RT27 v notranji komori ne talita. Položaj notranje komore je definiran z $b_{CO_2,1} = 8\text{cm}$, glede na rezultate v preglednici 15 pa morata biti oba PCM RT31 in RT27 z debelino $b = 2\text{cm}$ postavljena bližje zunanjemu robu 5-komornega sistema. Za PCM RT31 izračunamo po enačbah (4.41) in (4.42) največjo oddaljenost plasti PCM od zunanjega roba, da se bo PCM začel taliti $b_{CO_2,1} \cong 4,9\text{cm}$, kar pomeni da je smotno PCM RT31 vgraditi le v zunanjo ali sredinsko komoro ali komoro med njima. Za PCM RT27 izračunamo največjo oddaljenost plasti PCM od zunanjega roba 5-komornega sistema $b_{CO_2,1} \cong 7\text{cm}$, kar pomeni da je PCM RT27 smotno vgraditi v zunanje 4 komore, ne pa tudi v notranjo. Ob nepravilnem položaju v konstrukcijskem sklopu se PCM ne bo talil, sistem ne bo omogočal shranjevanja latentne toplote in s tem z vgradnjo PCM ne bomo pridobili nič.

Glede na to, da zaradi previsokih temperatur faznega prehoda PCM RT31 in PCM RT27 nista primerna za vgradnjo v notranjo komoro 5-komornega sistema, kot stabilizator temperature v notranjosti pa je najbolj primerna postavitev PCM ravno v notranjo komoro, je najboljša rešitev med obravnavanimi PCM RT21 v notranji komori. Čas taljenja 2cm debele plasti PCM RT21 na notranji strani, če temperaturo zunanjega roba 5-komornega sistema iz 21°C dvignemo na 40°C je 130 ur $\approx 5,4$ dni (primer C3). Kot smo omenili v 3. poglavju je bistven problem v tem, kakšno debelino lahko sprememba faze doseže ob zunanjih temperaturah, ki so v pasivnih sistemih časovno omejene na 24-urno dinamiko. Ob eno-dnevnem nihanju zunanjih temperatur se po enačbi (4.37) stali le 2mm PCM RT21. Temperatura v notranjosti se spreminja zaradi direktnega zajema sončnega sevanja skozi okna in ni konstantna, kot je predvideno v računskem modelu. Čim je temperatura v prostoru višja od temperature faznega prehoda PCM $T_{fp}=21^\circ\text{C}$, se začne PCM taliti tudi iz notranje strani. Ko se začne prehod PCM v kapljevinsko fazo, se shranjuje latentna toplota in PCM se v času taljenja ne segreva. Direktni zajem sončnega sevanja torej ne povzroči povišanja temperatur notranjih površin, ampak se toplota porabi za taljenje PCM. PCM RT21 z notranjim položajem v 5-komornem sistemu tako preprečuje pregrevanje konstrukcijskega sklopa zaradi indirektnega in direktnega zajema sončnega

sevanja. V času fazne spremembe notranja stena deluje kot sevalna površina pri bolj konstantni in nižji temperaturi kot ob odsotnosti plasti PCM. Toplotno kapaciteto notranje površine z vstavitvijo PCM povečamo, temperatura se manj spreminja zaradi toplotne izmenjave z okolico in notranja temperatura prostora se manj spreminja s časom.

ZAKLJUČEK

V modernih lahkomontažnih stavbah s tankoslojnim ovojem so temperature poleti zelo visoke in spremenljive. Zaradi majhne toplotne kapacitete se stavbe v skladu s 24-urnim nihanjem zunanjih temperatur in sončnim sevanjem podnevi hitro segrevajo in ponoči ohlajajo. Ob primerni stavbni zasnovi, senčenju, prezračevanju s hladnim nočnim zrakom in toplotni stabilnosti stavbe hlajenje zraka s klimatskimi napravami ni potrebno. Velika toplotna stabilnost je lastnost debelih masivnih sten iz betona ali opeke, večjo toplotno stabilnost tankoslojnih stavbnih ovojev pa lahko dosežemo s fazno spremenljivimi materiali (PCM – Phase Change Material), ki shranijo oziroma oddajo toploto ob spremembi agregatnega stanja pri konstantni temperaturi.

V diplomski nalogi smo obravnavali modularni fasadni sistem Qbiss.Air podjetja Trimo d.d. Fasadni panel sestavlja na notranji strani mavčno- kartonasta plošča, na zunanji strani steklo, vmes pa 5-komorni sistem polnjen s plinom CO₂ kot toplotnim izolatorjem. V notranjo, sredinsko ali zunanjo komoro je možno vgraditi plast PCM. Glede na to, kako se zaradi taljenja PCM upočasnijo segrevanje konstrukcijskega sklopa in katera temperatura tališča PCM omogoča steni poleti najbolj ugodno sevalno temperaturo, smo določili najprimernejšo komoro vgradnje PCM in najprimernejši PCM.

PCM v 5-komornem sistemu se talijo v odvisnosti od temperature, do katere se zaradi sončnega sevanja segreje zunanja plast sistema. V času taljenja PCM je izstopni toplotni tok, ki prehaja v prostor minimalen, saj se toplota, ki priteka v konstrukcijski sklop porablja za taljenje PCM. PCM vgrajen v zunanjo komoro se stali v roku nekaj ur, kar pomeni, da je sposobnost shranjevanja toplote vseh analiziranih PCM prehitro izčrpana, če upoštevamo 24-urno dinamiko temperature. PCM vgrajen v srednjo ali notranjo komoro se tali dovolj počasi, da ob visokih zunanjih temperaturah prepreči hiter dvig temperature notranjega dela konstrukcijskega sklopa.

Temperature notranje površine konstrukcijskega sklopa se v primeru vgradnje PCM v zunanjo ali sredinsko komoro in notranjega položaja toplotne izolacije CO₂, hitro spreminjajo v odvisnosti od notranjih virov toplote in direktnega zajema sončnega sevanja. Plast PCM ima funkcijo stabilizatorja temperature, če je na notranji strani konstrukcijskega sklopa. V času fazne spremembe notranja stena deluje kot sevalna površina konstantne temperature. Izmed analiziranih PCM s temperaturami faznega prehoda 21°C, 26°C in 30°C je za vgradnjo v notranjo komoro 5-komornega sistema najbolj primeren PCM s temperaturo faznega prehoda 21°C. Če vzdržujemo notranje temperature nižje od temperature faznega prehoda PCM, je od položaja PCM v 5-komornem sistemu odvisno, ali se bo izbran PCM sploh talil. PCM-ja s temperaturo faznega prehoda 26°C in 30°C imata za vgradnjo v notranjo komoro previsoko temperaturo faznega prehoda, da bi omogočala toplotno udobne razmere.

VIRI

- [1] Krainer, A., Orel., B, Maček, M. 1993. Advance phase change (PCM) material for heat storage application in buildings. Florence, Italy. 3rd European conference on architecture.
- [2] Stritih, U. 1997. Prenos toplote v steni s fazno spremembo in transparentno izolacijo. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo: 104 f.
- [3] Mehling, H., Cabeza, L. 2008. Heat and cold storage with PCM, An up to date introduction into basics and applications. Berlin. Springer: 303 str.
- [4] Kladnik, R. 1989. Visikošolska fizika, 1. Del, Mehanski in toplotni pojavi. Ljubljana, Državna založba Slovenije: 231 str.
- [5] Rubitherm Technologies GmbH. Innovative Wärmetechnik mit PCM, Anwendungen. 2001. <http://www.rubitherm.de> (pridobljeno 26. 7. 2011)
- [6] Rubitherm Technologies GmbH. Product information. 2001. http://www.rubitherm.de/english/download/techdata_RT27_en.pdf
http://www.rubitherm.de/english/download/techdata_RT31_en.pdf
http://www.rubitherm.de/english/download/techdata_RT42_en.pdf
(pridobljeno 10. 8. 2011)
- [7] Aranovitch, E. 1981. Design and technology of solar heating and cooling systems for Buildings. Joint research centre of the commission of the European communities. Ispra, Italy: 279 str.
- [8] Mehling, H., Cabeza, L. 2008. Heat and cold storage with PCM, An up to date introduction into basics and applications. Das Bayerische Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern).
- [9] Cabeza, L., Heinz, A., Streicher, W. 2005. Inventory of Phase Change Materials (PCM), A Report of IEA Solar Heating and Cooling programme - Task 32 "Advanced storage concepts for solar and low energy buildings", Report C2 of Subtask C. Solar heating & cooling programme, International energy agency: 33 str.
- [10] Peippo, K., Kauranen, P., Lund, P.D. 1991. A multicomponent PCM wall optimized for passive solar heating. Energy and buildings 17, 4: 259-270.
- [11] Globalno sončno obsevanje. Ljubljana. ARSO. 2011. www.arso.si (pridobljeno 11. 7. 2011)
- [12] Kastelec, D., Rakovec, J., Zakšek, K. Sončna energija v Sloveniji. 2011. http://ss1.spletnik.si/4_4/000/000/1dc/698/Sonxe8no-obsevanje-v-Sloveniji.pdf
(pridobljeno 11. 7. 2011)
- [13] Fanger, P.O. 1970. Thermal comfort, Analysis and applications in environmental engineering. Copenhagen. Danish technical press: 244 str.

- [14] Kunič, R. 2009. Mehanizem prehoda toplote skozi konstrukcijske sklope v stavbah (1. del). 2009.
http://www.fragmat.si/download/clanki/Gradbenik%20Prehod%20toplote_1.pdf
(pridobljeno 1. 8. 2011)
- [15] Katedra za stavbe in konstrukcijske elemente. Faktor toplotne prehodnosti, ocena difuzije vodne pare, toplotna stabilnost. 2011.
http://fgg-web1.fgg.uni-lj.si/fgg_katedre/nimages/dynamic_novice/oplotna_prehodnost_difuzija_vodne_pare_toplotna_stabilnost.pdf (pridobljeno 20. 7. 2011)
- [16] Kunič, R. 2009. Mehanizem prehoda toplote skozi konstrukcijske sklope v stavbah (2. del). 2009.
http://www.fragmat.si/download/clanki/Gradbenik%20Prehod%20toplote_2.pdf
(pridobljeno 1. 8. 2011)
- [17] Mavčna plošča z vgrajenim Micronal® PCM podjetja BASF. 2010.
<http://www.micronal.de> (pridobljeno 1. 8. 2011)
- [18] Castellón, C., Nogués, M., Roca, J., Medrano, M., Cabeza, L.F. Microencapsulated phase change material (PCM) for building applications. 2011.
http://intraweb.stockton.edu/eyos/energy_studies/content/docs/FINAL_PAPERS/14B-1.pdf
(pridobljeno 25. 7. 2011)
- [19] Entrop, A.G., Brouwers, H.J.H., Reinders, A.H.M.E., Müthing, F. Experimental research on the use of phase change materials to passive solar energy concepts. 2011.
http://doc.utwente.nl/67252/1/experimental_research.pdf (pridobljeno 25. 7. 2011)
- [20] DuPont: Tehnični podatki produkta Energain® - plošča za stenske obloge. 2010.
http://energain.co.uk/Energain/en_GB/tech_info/index.html (pridobljeno 25. 7. 2011)
- [21] Dörken: Pospekt produkta Delta®-Cool. 2011.
<http://www.doerken.de/bvf-en/pdf/prospekt/Cool.pdf> (pridobljeno 1. 8. 2011)
- [22] Bernard, N., Maunsell, F. Phase change in action, Revival conference, Cambridge University. 2008.
<http://www.revival-eu.net/docs/REVIVAL%20Conference%20Nick%20Barnard%20Fredrik%20Lindahl%20Presentation.pdf> (pridobljeno 1. 8. 2011)
- [23] Koschenz, M., Lehmann, B. 2004. Development of thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings. Energy and buildings 36, 6: 567-578.
- [24] Ilkazell GmbH: Katalog produkta Ilkatherm Air Conditioning Systems. Zwickau, Nemčija. 2011.
http://www.ilkazell.de/pdf/en_prospekt_ilkatherm.pdf (pridobljeno 10. 8. 2011)

- [25] Katalog produkta Qbiss.Air, The ultimate thin facade system for maximal space and energy efficiency. 2010. Trebnje. Trimo d.d.
- [26] Dnevne temperature horizontalne površine za Ljubljano preko enega leta. 2010. Trebnje. Trimo d.d.
- [27] Alexiades, V., Solomon, A. D., 1993. Mathematical modeling of melting and freezing processes, Hemisphere publishing corporation. Washington DC, USA: 323 str.
- [28] Ahmad, M., Bontemps, A., Sallee, H. Quenard, D. 2006. Thermal testing and numerical simulation of prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material. Energy and buildings 38, 6: 673-681.
- [29] <http://www.thermal-engineering.com/> (pridobljeno 22.8.2011)
- [30] Nagano, K., Takeda, S., Mochida, T., Shimakura, K., Nakamura, T. 2005. Study of a floor supply air conditioning system using granular phase change material to augment building mass thermal storage – Heat response in small scale experiments. Energy and buildings 38, 5: 436-446.

Standardi:

ISO 7730:2005. - Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria

SIST EN ISO 6946. - Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation method - Gradbene komponente in gradbeni elementi - Toplotna upornost in toplotna prehodnost - Računska metoda.

SIST CR 1752. – Prezračevanje stavb – Kriteriji načrtovanja notranjega okolja.

PRILOGA A: IZRAČUN POTREBNE DEBELINE PLASTI GRADBENIH MATERIALOV ZA SHRAMBO ENAKE KOLIČINE TOPLOTE

Osnovne fizikalne lastnosti nekaterih gradbenih materialov ter enega od komercialnih PCM:

Parafin Rubitherm RT31 [6] in shranjena toplota:

Lastnost	Simbol	Enota	Vrednost
Specifična talilna toplota temperaturno območje 20°C do 35°C	q_t	kJ/kg	169
Gostota, trdno pri 15°C	ρ_s	kg/m ³	880
Gostota, tekoče pri 45°C	ρ_l	kg/m ³	760

Pri računu dovedene toplote upoštevam gostoto pri 30°C, kar je približno 780kg/m³.

$$Q = 780 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1\text{m}^2 \cdot d \cdot 169 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 131820\text{kJ} \cdot d_1$$

Beton in shranjena toplota pri spremembi temperature iz 20°C na 35°C:

Lastnost	Simbol	Enota	Vrednost
Specifična toplota	c_p	kJ/kgK	0,96
Gostota	ρ	kg/m ³	2400
Sprememba temperature	ΔT	K	15

$$Q = 2400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1\text{m}^2 \cdot d \cdot 0,96 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot 15\text{K} = 34560\text{kJ} \cdot d_2$$

Polna opeka in shranjena toplota pri spremembi temperature iz 20°C na 35°C:

Lastnost	Simbol	Enota	Vrednost
Specifična toplota	c_p	kJ/kgK	0,92
Gostota	ρ	kg/m ³	1600
Sprememba temperature	ΔT	K	15

$$Q = 1600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1\text{m}^2 \cdot d \cdot 0,92 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot 15\text{K} = 22080\text{kJ} \cdot d_3$$

Porobeton in shranjena toplota pri spremembi temperature iz 20°C na 35°C:

Lastnost	Simbol	Enota	Vrednost
Specifična toplota	c_p	kJ/kgK	0,86
Gostota	ρ	kg/m ³	700
Sprememba temperature	ΔT	K	15

$$Q = 700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1 \text{m}^2 \cdot d \cdot 0,86 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot 15 \text{K} = 9030 \text{kJ} \cdot d_4$$

Vode in shranjena toplota pri spremembi temperature iz 20°C na 35°C:

Lastnost	Simbol	Enota	Vrednost
Specifična toplota	c_p	kJ/kgK	4,2
Gostota	ρ	kg/m ³	1000
Sprememba temperature	ΔT	K	15

$$Q = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1 \text{m}^2 \cdot d \cdot 4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot 15 \text{K} = 63000 \text{kJ} \cdot d_5$$

Za enako količino shranjene toplote Q v 1 m² stene, potrebujem različne debeline materialov:

Beton: $d_2 = 3,8 d_1$
Polna opeka: $d_3 = 6 d_1$
Porobeton: $d_4 = 14,6 d_1$
Voda: $d_5 = 2,1 d_1$