

UNIVERZITET "UNION-NIKOLA TESLA" U BEOGRADU

FAKULTET ZA GRADITELJSKI MENADŽMENT

JOVANA Đ. JOVANOVIĆ

UNAPREĐENJE PERFORMANSI
ENERGETSKI EFIKASNOG
PROJEKTOVANJA EKSPERIMENTALNIM I
SIMULACIONIM ISTRAŽIVANJIMA PCM
MATERIJALA I UGRADNJOM
FOTONAPONSKIH SISTEMA U OMOTAČE
GRAĐEVINSKIH OBJEKATA

DOKTORSKA DISERTACIJA

BEOGRAD, 2017.

UNIVERSITY „UNION-NIKOLA TESLA“ OF BELGRADE
FACULTY OF CONSTRUCTION MANAGEMENT

JOVANA Đ. JOVANOVIĆ

IMPROVING THE PERFORMANCE OF
ENERGY EFFICIENT DESIGN BY
EXPERIMENTAL AND SIMULATION
RESEARCHES OF PCM MATERIALS AND
INSTALLATION OF PHOTOVOLTAGE
SYSTEMS IN BUILDING ENVELOPES

DOCTORAL DISSERTATION

BELGRADE, 2017.

INFORMACIJE O MENTORU I ČLANOVIMA KOMISIJE

Predsednik komisije:

1. Prof. dr **Slavko Božilović** redovni profesor - emeritus Univerziteta "UNION - Nikola Tesla" u Beogradu

Mentor:

2. Prof. dr **Dubravka Mijuca**, redovni profesor Univerziteta " UNION - Nikola Tesla" u Beogradu,

Članovi komisije:

3. Prof. dr **Zoran Cekić**, redovni profesor Univerziteta " UNION - Nikola Tesla" u Beogradu,

4. Prof. dr **Suzana Koprivica**, redovni profesor Univerziteta " UNION - Nikola Tesla" u Beogradu,

5. Doc. dr **Xiaoqin Sun** , docent Changsha University of Science & Technology, Faculty of Energy and Power Engineering, Changsha , Kina.

UNIVERZITET "UNION-NIKOLA TESLA" U BEOGRADU
FAKULTET ZA GRADITELJSKI MENADŽMENT

KLJUČNA DOKUMENTACIONA INFORMACIJA

Vrsta rada	Doktorska disertacija
Autor (A)	Jovana Jovanović
Mentor (MN)	Prof. dr Dubravka Mijuca
Naslov (NA)	Unapređenje performansi energetski efikasnog projektovanja eksperimentalnim i simulacionim istraživanjima PCM materijala i ugradnjom fotonaponskih sistema u omotače građevinskih objekata
Jezik publikacije (JP)	Srpski
Geografsko područje (GP)	Srbija
Godina izdavanja (GI)	2017.
Izdavač (I)	Autorski reprint
Mesto izdavanja (MI)	Beograd
Fizički opis (FO), (broj poglavlja/ strana/ literaturnih jedinica/ tabela/ slika/ grafikona/ šema	6 поглавља, 132 стране, 112 литературних јединица, табела 8, 46 слика, графикана и шема
Naučna oblast (NO)	Energetska efikasnost
Naučna disciplina (ND)	Energetska efikasnost u graditeljstvu
Ključne reči	Energetska efikasnost,, fotonaponski moduli, PCM materijali
UDK	
Čuva se (ČU)	Biblioteka Univerzitet „UNION - Nikola Tesla“ Beograd Fakultet za graditeljski menadžment
Izvod (IZ)	U ovoj disertaciji je dokazano je da se primjenom PV modula u Trombovom zidu redukuje srednja godišnja proizvedena električna snaga za 35% u odnosu na snagu pri optimalnom uglu nagiba modula prema tlu. Takođe, dokazano je da je uticaj porasta radne temperature PV modula na količinu proizvedene električne energije zanemarljiv, pogotovo u poređenju sa uticajem ugla nagiba PV modula. Sa aspekta veće proizvodnje električne energije PV panela, korisnije i ekonomski isplativije ga je instalirati ne u Trombovom zidu, nego na drugom mjestu van Trombovog zida, obezbjeđujući optimalan ugao nagiba, Takođe, u disertaciji su eksperimentalnim putem, za različite toplotne flukseve, identifikovane optimalne dimenzije izolacionih zidova, odn. optimalne pozicije stiroporskih izolacionih slojeva sa PCM kuglicama. Pri optimalnim vrednostima se dobijaju optimalna podešavanja sobnih temperatura, čime se redukuje potrošnja energije za zagrijavanje i hlađenje prostorije..
Datum prihvatanja teme	26.10.2016.god.
Članovi Komisije (KO)	Prof. dr Slavko Božilović , predsednik komisije Prof. dr Dubravka Mijuca , mentor Prof. dr Zoran Cekić , član Prof. dr Suzana Koprivica, član Doc. dr Xiaoqin Sun , spoljni član
Datum odbrane	

UNIVERSITY „UNION-NIKOLA TESLA“ OF BELGRADE
FACULTY OF CONSTRUCTION MANAGEMENT

KEY DOCUMENTATION

Contents code (CC):	Doctoral dissertation
Author (A)	Jovana Jovanović
Mentor (MN)	Prof. dr Dubravka Mijuca
Title (TI)	Improving the performance of energy efficient design by experimental and simulation researches of PCM materials and installation of photo voltage systems in building envelopes
Language of text (LT)	Serbian
Country of publication (CP)	Serbia
Publication year (PY)	2017.
Publisher (PU)	The authors reprint
Publication place (PP)	Belgrade
Physical description (number of chapters/ pages/references/tables/figures/graphs/diagrams)	6 chapters, 132 pages, 112 references, 8 tables, 46 figures, graphs and diagrams
Scientific field (SF)	Energy Efficiency
Scientific discipline (SD)	Energy Efficiency in Civil Engineering
Keywords (KW)	Energy efficiency, Photo voltage module, PCM materials
UC	
Holding data (HD)	Library of the University `UNION- Nikola Tesla` Faculty of Civil Engineering Management
Summary	<p>In this dissertation, it has been shown that using PV modules in Tromb's wall reduces the average annual produced electric power output by 35% versus power at the optimum tilt angle of the module to the ground. It has also been shown that the influence of PV module working temperature increase on the amount of electricity produced is negligible, especially in comparison with the impact of the tilt angle of the PV module. From the point of view of the larger PV production of PV panels, it is more energetically and cost effective to install it not in Tromb's wall, but in the other place outside of Tromb's wall, providing an optimum tilt angle.</p> <p>Also, in the desertification are experimentally, for the different heat flows, the optimal dimensions of the isolation walls, optimum positions of styrofoam insulation layers with PCM balls, are identified. Optimal values provide optimum room temperature settings, thus reducing the energy consumption for heating and cooling the room</p>
Acceptance date (AD)	26.10.2016.god.
Committee members (CM)	Prof. dr Slavko Božilović , president of the commission Prof. dr Dubravka Mijuca , mentor Prof. dr Zoran Cekić , member Prof. dr Suzana Koprivica, member Doc. dr Xiaoqin Sun , external member
Defended on	

UNAPREĐENJE PERFORMANSI ENERGETSKI EFIKASNOG PROJEKTOVANJA EKSPERIMENTALNIM I SIMULACIONIM ISTRAŽIVANJIMA PCM MATERIJALA I UGRADNJOM FOTONAPONSKIH SISTEMA U OMOTAČE GRAĐEVINSKIH OBJEKATA

Rezime: Jedan od najvećih problema svijeta danas je pitanje energije. Inženjeri i naučnici istražuju najefikasnije načine proizvodnje, transporta i potrošnje energije. Građevinarstvo je jedna od oblasti gdje se najviše energije troši. Istraživanja u smislu racionalizacije energetske potrošnje u građevinarstvu su su izuzetno aktuelna i opravdana.

Oko 40 % svjetske potrošnje energije otpada na građevinske objekte (rezidencijalni i nerezidencijalni- uslužni sektor) odn. za grijanje, hlađenje, rasvjetu, kućne aparate, itd. Sem toga ovaj dio utrošene energije ima značajan uticaj na okolinu proizvodeći skoro 25% globalne emisije CO₂. Stoga je povećanje energetske efikasnosti građevinskih objekata jedan od primarnih zadataka.

Jedan od predmeta istraživanja u doktorskoj disertaciji je ocjena nivoa energetske efikasnosti pri primjeni fotonaponskih (PV-PhotoVoltage) modula u Trombovom zidu (takozvani PV-Trombov zid) sa aspekta proizvodnje električne energije, tj. stepena iskorišćenja PV modula. U tom smislu određena je srednja godišnja i srednja mjesečna vrednost generisane električne energije od strane PV modula za različite uglove nagiba PV modula prema tlu, odn. identifikovani su optimalni uglovi nagiba pri kojima je maksimalna generisana električna energija od strane PV modula. Električna energija proizvedena putem PV panela, integrisanih u PV-Trombov zid, analizirana je putem System Advisor Model (SAM) softvera. Izborom lokacija panela, tj. gradova (Podgorica i Changsha), gdje je PV lociran, izabrani su automatski i fajlovi sa realnim parametrima klimatskih, vremenskih prilika za tu lokaciju (solarna iradijacija, temperatura ambijenta, vjetar, itd.) kojima se datoteke SAM-a snabdijevaju u vremenskim sekvencama od 1h. Pri simulaciji i proračunu su uzeti u obzir i drugi relevantni podaci iz datoteka SAM-a koji se odnose na PV (konkretni izabrani tip PV modula, odn. panela, sa odgovarajućim kataloškim parametrima, uglovi nagiba PV, radne temperature PV modula, itd.). Zaključak je da je sa aspekta veće proizvodnje električne energije PV panela, korisnije i ekonomski isplativije instalirati ga ne

u Trombovom zidu, nego na drugom mjestu van Trombovog zida, obezbjeđujući optimalan ugao nagiba. Odnosno, inkorporiranje PV modula u omotač Trombovo zida, degradira stepen korisnosti PV modula.

Drugi predmet istraživanja se odnosi na istraživanja primjene, ugradnje PCM (Phase Change Material - fazno-promjenljivi materijali, tj. materijali koji mijenjaju agregatno stanje) u omotače građevinskih objekata radi poboljšanja energetske efikasnosti stambenih objekata, tj. redukcije grijanja i hlađenja, odn. poboljšanja toplotnih performansi i smanjenja energetske potrošnje unutar stambenih objekata. Primjenom ovih materijala povećava se toplotni kapacitet, tj. sposobnost skladištenja toplote, čak do 14 puta više po jedinici mase od konvencionalnih materijala. Redukcija uključenja dodatnih izvora za zagrijavanje i hlađenje, da bi se temperatura održavala u zoni temperaturnog komfora, vrši se zahvaljujući sposobnosti PCM materijala da akumuliraju latentnu toplotu tokom procesa topljenja i otpuštaju toplotu tokom procesa solidifikacije. Eksperimentalna istraživanja su obuhvatila određivanje optimalnih pozicija izolacionih slojeva sa PCM materijalom (PCM kuglicama) u omotačima građevinskih objekata, tj. pozicija u kojima je maksimalan njihov učinak. Takav učinak podrazumijeva optimalnu regulaciju temperature prostorije u smislu postizanja temperaturnog komfora, uz redukciju upotrebe dodatnih sistema za grijanje i hlađenje. Eksperimentalna istraživanja su sprovedena u laboratoriji Univerziteta za nauku i tehnologiju, u Changsha, Kina. Radi ispitivanja prenosa toplote i njihovog uticaja na fluktuacije temperatura korišćena su kao uzorci tri gipsana zida sa odgovarajućom mjernom instrumentacijom korišćenom u toku eksperimenta. Eksperimenti su vršeni za izvor toplote sa konstantnim i tranzijentnim toplotnim fluksom. Pozicije slojeva sa PCM kuglicama i šupljinama su simultano varirane i dovođene u istu poziciju u odnosu na grejnu foliju, radi poređenja i nalaženja njihovih optimalnih pozicija u kojima je maksimalan njihov učinak, tj. maksimalna redukcija temperature u toku dana, a maksimalni porast temperature u toku noći. Dobijeni rezultati i analiza treba da doprinesu unapređenju efikasnog projektovanja i energetskih performansi izolacionog zida, tj. omotača zgrade sa ugrađenim PCM materijalima.

Ključne reči: Energetska efikasnost,, fotonaponski moduli, PCM materijali

IMPROVING THE PERFORMANCE OF ENERGY EFFICIENT DESIGN BY EXPERIMENTAL AND SIMULATION RESEARCHES OF PCM MATERIALS AND INSTALLATION OF PHOTOVOLTAGE SYSTEMS IN BUILDING ENVELOPES

Abstract: One of the biggest problems of the world today is the question of energy. Engineers and scientists explore the most efficient ways to produce, transport, and consume energy. Buildings are one of the areas where most energy is consumed. Research in terms of the rationalization of energy consumption in construction is extremely current and justified.

About 40% of the world's energy consumption is spent in buildings (residential and non-residential - service sector) i.e. for heating, cooling, lighting, home appliances, etc. Moreover, this part of the energy consumed has a significant impact on the environment, producing almost 25% of global CO₂ emissions. Therefore, increasing the energy efficiency of buildings is one of the primary tasks.

One of the subjects of research in the doctoral dissertation is the assessment of the level of energy efficiency in the application of photovoltaic (PV-PhotoVoltage) modules in the Trombe wall (the so-called PV-Trombe wall) from the aspect of electricity generation, the coefficient of efficiency of PV modules. In this sense, the average annual and monthly values of the generated electricity by the PV module for different tilt angles of the PV module toward the ground, are determined. Optimal tilt angles are identified, where generated electricity from the PV module is maximal. Electricity produced by PV panels integrated into the PV- Trombe wall was analyzed through the System Advisor Model (SAM) software. By selecting the location of the panel, i.e. cities (Podgorica and Changsha), where PV is located, automatically are selected files with real parameters of climatic, weather conditions for that location (solar irradiation, ambient temperature, wind, etc.) to which SAM files are supplied in time sequences from 1h. Simulation and calculation also take into account other relevant data from the SAM files related to PV (the specific type of PV module, ie the panel, with the appropriate catalog parameters, the tilt angle of the PV, the operating temperature of the PV module, etc.) . The conclusion is that,

from the points of view of the larger production electricity and the cost-efficiency of the PV panels, it is effective and useful to install PV modules not in Trombe wall, but outside the Trombe wall, providing an optimal tilt angle.

The second subject of the research is related to the application, the installation of PCM (Phase Change Material - phase-change materials, ie materials that change the aggregate state) into the building envelopes in order to improve the energy efficiency of residential buildings, i.e. reduction of heating and cooling, or improving heat performance and reducing energy consumption within buildings. Using these materials increases the heat capacity, i.e. the ability to store heat, up to 14 times more per unit of mass than conventional materials. Reduction of the inclusion of additional sources for heating and cooling in order to maintain the temperature in the temperature comfort zone is done thanks to the ability of PCM materials to accumulate latent heat during the melting process and release heat during the solidification process. The experimental research included determining the optimum positions of the layers with the PCM material (PCM balls) in the building envelope in which their effect is maximized. Such an effect implies optimal room temperature regulation in terms of achieving temperature comfort while reducing the use of additional heating and cooling systems. Experimental research was conducted at the University of Science and Technology, Changsha, China. For the purpose of testing heat transfer and their influence on fluctuations of temperatures, samples of three gypsum walls with appropriate measuring instruments during the experiment were used. Experiments were carried out for a heat source with constant and transient heat flux. The positions of the layers with PCM balls and cavities were simultaneously varied and placed in the same position relative to the heating film, in order to compare and find their optimal positions in which their effect is maximized achieving maximum temperature reduction during the day, and maximum temperature rise during the night. The obtained results and analysis should contribute to the improvement of efficient design and energy performance of the insulation wall, i.e. building envelope with embedded PCM materials.

Keywords: Energy efficiency, Photo voltage module, PCM materials

SADRŽAJ

1. UVOD.....	13
1.1 Predmet istraživanja.....	15
1.2 Cilj istraživanja.....	17
1.3 Metode istraživanja.....	18
1.4 Način izbora, veličina i konstrukcija uzorka, laboratorijska oprema.....	18
1.5 Mjesto eksperimentalnog istraživanja	19
1.6 Očekivani rezultati, značaj i doprinos rada	19
2. PRINCIPI ENERGETSKE EFIKASNOSTI U GRAĐEVINARSTVU.....	22
2.1. Energetska potrošnja u građevinskim objektima.....	22
2.2. Energetska efikasnost i njeni indikatori	23
3. ANALIZA ENERGETSKE EFIKASNOSTI TROMBOVOG ZIDA SA UGRAĐENIM FOTONAPONSKIM MODULIMA	27
3.1 Uvod	27
3.2 Trombov zid.....	28
3.3 Poređenje Trombovog zida sa troslojnim zidom.....	30
3.4 Stepen iskorišćenja PV modula zavisno od ugla nagiba α prema tlu	33
3.4.1 Godišnja proizvodnja električne energije PV modula zavisno od ugla nagiba α	42
3.4.2 Mjesečna proizvodnja električne energije PV modula zavisno od ugla nagiba α	45
3.5 Analiza uticaja radne temperature PV modula na njegov stepen korisnog dejstva i veličinu generisane električne energije.....	51
3.6 Zaključak.....	54
4. UNAPREĐENJE PERFORMANSI ENERGETSKI EFIKASNOG PROJEKTOVANJA EKSPERIMENTALNIM ISTRAŽIVANJIMA PCM MATERIJALA UGRAĐENOG U OMOTAČE GRAĐEVINSKIH OBJEKATA.....	56
4.1 Teorijski dio	56
4.1.1 Akumuliranje toplote u omotačima građevinskih objekata.....	56
4.1.2 Način funkcionisanja PCM (fazno-promjenljivih) materijala.....	59
4.1.3 Vrste PCM materijala	65
4.1.3.1 Neorganski PCM materijali.....	66

4.1.3.2 Organski PCM materijali	67
4.1.3.3 Eutektički PCM materijali	68
4.1.4 Tehnike ugradnje PCM materijala	69
4.1.4.1 Apsorpcija PCM materijala	69
4.1.4.2 Direktna ugradnja PCM materijala	70
4.1.4.3 Enkapsulacija	70
4.1.4.4 Makroenkapsulacija	71
4.1.4.5 Mikroenkapsulacija	71
4.1.4.6 Stabilni PCM materijali	72
4.1.5 Primjeri primjene PCM materijala	74
4.2 Eksperimentalni dio	78
Eksperimentalna istraživanja PCM materijala	78
4.2.1 Uvod	78
4.2.2 Konceptualna postavka eksperimenta i ciljevi eksperimentalnog istraživanja	79
4.2.3 Mjerna oprema i instrumenti	81
4.2.4 Ispitivanje uticaja stacionarnog toplotnog režima na PCM materijale	84
4.2.5 Ispitivanje uticaja tranzijentnog toplotnog režima na PCM materijale	100
4.2.6 Analiza rezultata	106
4.2.7 Zaključak	113
5. ZAKLJUČAK	116
6. LITERATURA	121

1. UVOD

Jedan od najvećih problema čovječanstva danas je pitanje energije. Inženjeri i naučnici istražuju najefikasnije načine proizvodnje, transporta i potrošnje energije. Problemi energetskih resursa su vezani za ekonomske, ekološke i socijalne probleme. Prema tekućim trendovima čovječanstvo će kroz 35 godina trebati dva puta više energije nego što je sada koristi. Pri sadašnjoj stopi potrošnje, rezerve fosilnih neobnovljivih izvora energije procjenjuju se da će trajati: nafta oko 40 godina, gas oko 67 godina, a uglj oko 164 godine [1,2,3]. Međutim, nije samo problem u ograničenosti resursa fosilnih neobnovljivih izvora energije (nafte, gasa i uglja). Povećana emisija ugljen-dioksida, metana i drugih gasova je direktna posljedica prekomjernog korišćenja fosilnih goriva. Sagorijevanje fosilnih goriva, uključujući nusprodukte industrijskih postrojenja, preradu otpada, itd., sve više zagađuje atmosferu i uništava kvalitet zemljišta i vazduha. Zagađen vazduh, sem što je štetan za čitav živi svijet i njegova staništa, vodi i do globalnog zagrijavanja, čije su posljedice klimatske promjene. Aktuelni problem globalnog zagrijavanja objašnjava se teorijom tzv. efekta staklene bašte ("greenhouse") u atmosferi, a koji nastaje kao posljedica povećane emisije dominantno ugljen-dioksida, zatim metana i drugih gasova, usljed sagorijevanja fosilnih goriva. Ovi gasovi se nazivaju gasovi sa efektom staklene bašte ili staklenički gasovi (GHG - Green House Gases). Emisija tih gasova je prisutna pogotovo u razvijenim zemljama zadnjih 250 godina, odnosno od početka industrijske revolucije. Teorija efekta globalnog zagrijavanja se zasniva na tome da planeta Zemlja ne može održati ravnotežu između toplote koju dobija od Sunca i toplote koju isijava u svemir, odn. da prima više toplote nego što odaje.

Istraživanja pokazuju da je rast prosječne temperature na površini Zemlje od 2°C maksimalno dopušten. Rast iznad ove vrijednosti doveo bi do dugoročne katastrofalne promjene klime (topljenja leda i podizanja nivoa mora, poplava, orkanskih vjetrova, itd), kao i odumiranja mnogih bioloških vrsta i uništenja ekosistema na Zemlji [4]. Put za sprečavanje klimatskih promjena je prelaz sa neobnovljivih na obnovljive izvore, ili druge

izvore koji ne zagađuju atmosferu, pogotovo sa CO₂ koji je najzastupljeniji u stvaranju efekta staklene bašte, kao i racionalizacija potrošnje energije.

Porast temperatura je evidentan na cijeloj planeti i značajniji je na većim sjevernim geografskim širinama. Procjenjuje se da se od 1900. do 2005. godine temperatura na Zemlji povećala u prosjeku između 0.4 i 0.8°C, da bi krajem 2015.g. dostigla maksimalnu vrijednost povećanja.

Godine 2011.-2015. predstavljaju najtoplije ikad zabilježeno petogodišnje razdoblje (otkako su se 1880.g. počela vršiti mjerenja), sa mnogim ekstremnim klimatskim događanjima nastalim pod uticajem klimatskih promjena, navodi se u analizi petogodišnjeg perioda od strane WMO (World Meteorological Organization) [5]. To je bio najtopliji petogodišnji period, ikad zabilježen u Aziji, Evropi, Južnoj i Sjevernoj Americi i Okeaniji. Na nivou čitave 2014. godine, prosječna temperatura kopna i okeana bila je za 0.69 °C viša od prosjeka 20. vijeka, premašivši prethodne rekorde iz 2005. i 2010. za 0.04 °C [6].

Globalna prosječna temperatura površine Zemlje u 2015.g. dostigla je rekord kao najviša do sada zabilježena. Time se približavamo granici povećanja srednje temperature Zemlje od 1°C u odnosu na temperaturu predindustrijskog doba [7].

Zabluda, koja je dugo trajala, podrazumijevala je da se polutanti vazduha, jednom kada dospiju u atmosferu, razblažuju do zanemarljivih koncentracija. Rezultati mjerenja neumoljivo dokazuju razmjere takvih zabluda. Godine 2015. je izmjerena najveća srednja koncentracija CO₂ u vazduhu od kada se mjerenja vrše: 400 ppm CO₂, (400 čestica (molekula) CO₂ na milion čestica vazduha).

Na osnovu navedenog, jasno je zašto sve više postaju aktuelni kako obnovljivi izvori energije bazirani na energiji sunca, vjetra, biomase, geotermalnih izvora, okeana, tako i racionalna potrošnja energije, odn. povećanje energetske efikasnosti u funkciji održivog razvoja [8,9,10,11,12,13]. Učešće obnovljive energije u globalnoj potrošnji finalne energije za 2015.g. iznosilo je 19,3% [112]. Učešće obnovljivih izvora energije u

ukupnoj proizvodnji energije u svijetu raste, tako da su predviđanja da će u 2100.g. učešće obnovljivih izvora biti 95%, a fosilnih goriva svega 5% [15].

Građevinarstvo je jedna od oblasti gdje se troši najviše energije. Istraživanja u smislu racionalizacije energetske potrošnje u građevinarstvu su opravdana i vrlo aktualna. Kina i Indija imaju najveći porast utrošene rezidencijalne energije [3]. U 2040.g. njihov utrošak rezidencijalne energije (uključujući električnu i energiju prirodnog gasa) će biti dupliran u odnosu na 2012.g. i iznosiće 27% od ukupne utrošene rezidencijalne energije u svijetu. Stoga je težnja da se u građevinskim objektima redukuje korišćenje energije na bazi fosilnih goriva (prirodni gas, nafta i ugalj) čime bi se redukovala emisija CO₂ gasa, a takođe da se novim metodama gradnje i novim vrstama materijala poveća energetska efikasnost građevinskih objekata, odn. redukuje potrošnja energije u njima. Električna energija postaje sve značajniji energetski izvor koji se koristi u građevinskim objektima. Udio električne energije u ukupno utrošenoj finalnoj energiji u građevinskim objektima na svjetskom nivou raste od 39% u 2012.g. do 43% koliko se predviđa u 2040.g. Pri tome se planira da već 2025. godine potrošnja električne energije premaši potrošnju prirodnog gasa kao vodećeg izvora energije isporučene za potrebe građevinskih objekata, što ide u prilog smanjenju emisije CO₂ [3].

1.1 Predmet istraživanja

Na osnovu prethodnih razmatranja i navedenih činjenica proistekla je i motivacija autora ove disertacije da za predmet istraživanja izabere istraživanje i unapređenje performansi energetske efikasnosti kroz dva najsavremenija modula projektovanja održivog građevinarstva: fotonaponskih panela i PCM materijala kao konstruktivnih elemenata.

U Glavi.2 su analizirani principi energetske efikasnosti i potencijalne energetske uštede u građevinskom sektoru. Dat je pregled građevinskih normativa Evropske komisije za standardizaciju. Razmotreni su indikatori za ocjenu energetske efikasnosti, forme

geometrije energetski efikasnih objekata, kao i faktori od bitnog uticaja na energetsku efikasnost objekata.

Primjena Trombovog zida u kombinaciji sa fotonaponskim PV (Photo Voltage) modulima, takozvani PV-Trombov zid, je predmet istraživanja niza savremenih naučnih radova. U radovima se analiziraju temperature zgrada sa različitim tipovima PV panela, toplotne i energetske performanse objekta sa PV-Trombovim zidom. Generalno, integrisanje PV panela se tretira kao obećavajući pravac razvoja u povećanju energetske efikasnosti Trombovog zida. Za razliku od navedenih i ostalih dostupnih literaturnih izvora, u Glavi.3 disertacije predmet istraživanja je energetska efikasnost, tj. stepen korisnog dejstva PV panela integrisanog u PV-Trombov zid. Istražuje se nivo energetske efikasnosti primjene fotonaponskih modula u Trombovom zidu sa aspekta proizvodnje električne energije PV modula. Predmet proučavanja su fiksni uglovi nagiba PV modula prema tlu i njihov uticaj na srednju godišnju i srednju mjesečnu vrijednost generisane električne energije od strane PV modula. Takođe, predmet proučavanja je uticaj porasta radne temperature PV modula na količinu proizvedene električne energije.

Drugi predmet izučavanja (Glava.4) disertacije čine eksperimentalna istraživanja primjene, ugradnje PCM (Phase Change Material - fazno-promjenljivi materijali, tj. materijali koji mijenjaju agregatno stanje) u omotače građevinskih objekata radi poboljšanja energetske efikasnosti, tj. radi poboljšanja toplotnih performansi i smanjenja energetske potrošnje unutar stambenih objekata. Primjena PCM materijala je jedna od najaktuelnijih tema u savremenom graditeljstvu. Njoj su posvećena mnogobrojna istraživanja i naučni radovi, koji na teoretskom ili eksperimentalnom planu analiziraju različite vrste i forme PCM materijala inkorporirane u omotače građevinskih objekata. Nepodijeljeni su stavovi svih istraživača i naučne javnosti da primjena PCM materijala u konstrukcijama zgrada povećava stepen iskorišćenja eksterne solarne energije i smanjuje korišćenje sistema za hlađenje i grijanje unutar prostorija. Primjenom ovih materijala povećava se toplotni kapacitet, tj. sposobnost skladištenja toplote, čak do 14 puta više po jedinici mase od konvencionalnih materijala. Redukcija uključenja dodatnih izvora za grijanje i hlađenje, da bi se temperatura održavala u zoni temperaturnog komfora, vrši se

zahvaljujući sposobnosti PCM materijala da akumuliraju latentnu toplotu tokom procesa topljenja i otpuštaju toplotu tokom procesa očvršćavanja (kristalizacije, tj. solidifikacije).

Za ovaj perspektivni pravac u poboljšanju performansi energetske efikasne zgrade posebno su važna eksperimentalna istraživanja, koja za određene klimatske uslove i konkretne konstrukcije mogu da nađu optimalna rešenja u vezi primjene PCM materijala. U Glavi 4. disertacije, upravo su eksperimentalnim putem, za različite toplotne flukseve i pozicije stiropornih slojeva sa inkorporiranim PCM kuglicama, istraživane fluktuacije temperatura u gipsanim zidovima sa i bez ugrađenih PCM materijala.

1.2 Cilj istraživanja

Jedan od ciljeva istraživanja je unapređenje performansi energetske efikasne projektovanja simulacionim istraživanjima PV-Trombovog zida, radi identifikacije optimalnih uglova nagiba PV modula (panela) pri kojima je maksimalno srednje godišnje i mjesečno generisanje električne energije od strane PV modula. Takođe, cilj je ocjena racionalnosti ugradnje PV modula u Trombov zid sa aspekta stepena korisnog dejstva u generisanju električne energije.

Drugi cilj istraživanja se bazira na nalaženju optimalnih dimenzija izolacionog zida sa PCM kuglicama u omotačima zgrade, kao i nalaženje optimalne pozicije sloja stiropora sa ugrađenim PCM kuglicama u cilju regulacije temperature prostorije, tj. redukcije upotrebe sistema za hlađenje i grijanje. Ovaj cilj je ostvaren eksperimentalnim istraživanjima sa različitim nivoima toplotnog fluksa, za stacionarni i tranzijentni toplotni režim, uz analizu eksperimentalno dobijenih vremena topljenja i solidifikacije zavisno od pozicije sloja sa PCM kuglicama.

1.3 Metode istraživanja

Za istraživanja Trombovog zida u kombinaciji sa fotonaponskim PV (Photo Voltage) modulima, takozvani PV-Trombov zid, korišćen je softver System Advisor Model (SAM) radi simulacija, odn. određivanja srednjih godišnjih i mjesečnih vrednosti proizvedene električne energije. Izborom lokacija panela, tj. gradova (Podgorica i Changsha), gdje je PV lociran, izabrani su automatski i fajlovi sa realnim parametrima klimatskih, vremenskih prilika za tu lokaciju (solarna iradijacija, temperatura ambijenta, vjetar, itd.) kojima se datoteke SAM-a permanentno snabdijevaju u vremenskim sekvencama od 1h. Pri simulaciji i proračunu su uzeti u obzir i drugi relevantni podaci iz datoteka SAM-a koji se odnose na PV (konkretni izabrani tip PV modula, odn. panela, sa odgovarajućim kataloškim parametrima, uglovi nagiba PV, radne temperature PV modula, itd.).

Za istraživanja efekta ugradnje PCM materijala u omotače zgrada korišćen je eksperimentalni metod. Radi ispitivanja prenosa toplote i njihovog uticaja na fluktuacije temperatura ispitivani su kao uzorci tri gipsana zida sa odgovarajućom mjernom instrumentacijom korišćenom u toku eksperimenta. Prvi referentni zid je sa 5 izolacionih slojeva stiropora, drugi sa 4 izolaciona sloja stiropora i jednim slojem stiropora s PCM kuglicama, treći sa 4 izolaciona sloja stiropora i jednim slojem stiropora sa šupljinama. Eksperimenti su vršeni za izvor toplote sa konstantnim i tranzijentnim toplotnim fluksom. Pozicije slojeva sa PCM kuglicama i šupljinama su simultano varirane i dovođene u istu poziciju u odnosu na grejnu foliju, radi poređenja i nalaženja njihovih optimalnih pozicija u kojima je maksimalan njihov učinak, tj. optimalna regulacija temperature.

1.4 Način izbora, veličina i konstrukcija uzorka, laboratorijska oprema

Za PV inkorporiran u PV-Trombov zid: za obje lokacije su uzeta po 2 PV modula tipa "SunPower SPR-X21-335" čije su ćelije od monokristala silicijuma, sa 96 ćelija po modulu. Moduli su spojeni paralelno, snage 335.205 Wdc/ modulu (670.5 Wdc za oba

modula), sa nominalnim stepenom korisnog dejstva 20.55%. Ukupna površina oba modula je 3.3m². Jednosmjerni napon DC koji se dobija sa na krajevima modula transformiše se (invertuje) u naizmjenični AC pomoću dva paralelno vezana invertora (type ABB: Micro-0.3-1-OUTD-US-208 208V) koji su sa koeficijentom korisnog dejstva 95%. Simulacijom na SAM (System Advisor Model (SAM) softveru analizirana je proizvodnja električne energije navedenih PV modula, južno orijentisanih, u funkciji različitih uglova nagiba prema tlu α° , za dva različita grada (Podgorica i Changsha).

Za PCM inkorporiran u omotač zgrade kao uzorci korišćena su tri gipsana zida: referentni, zid sa PCM kuglicama i zid sa šupljinama. Korišćene plastične PCM kuglice su bile hermetički zatvorene i ispunjene PCM materijalom - parafinskom smješom marke OP28E, koja je ubrizgana u kuglice pri temperaturi oko 50°C. Toplotna provodnost PCM kuglica je 0.32 W/(m °C). Naponski generator promjenljivog napona, sa oznakom tipa STG-1000W korišćen je za napajanje grejne folije. Termoparovi, korišćeni u eksperimentu, napravljeni su od bakra i konstantana, sa oznakom tipa TT-T-30-SLE, prečnika D=2X0.511 mm. Termoparovi su grupisani u 19 različitih termokanala spojenih sa instrumentom za bilježenje podataka (Data Logger) tipa Agilent 34972A LXI, koji je vezan za PC računar. Na PC računaru je, pod Windows sistemom, instaliran softver Agilent BenchLink Data Logger 3 koji sakuplja podatke u Exel tabelama, pogodnim za analizu i grafičke prikaze.

1.5 Mjesto eksperimentalnog istraživanja

Laboratorija Univerziteta za nauku i tehnologiju u Changsha, Kina.

1.6 Očekivani rezultati, značaj i doprinos rada

Jedan od očekivanih rezultata disertacije je bio da odgovori na pitanje opravdanosti integrisanja PV modula u Trombov zid. U tom smislu doprinos disertacije se ogleda u činjenici da su na osnovu navedenog simulacionog softvera određeni optimalni fiksni

uglovi nagiba PV modula prema tlu, pri kojima je najveća srednja godišnja i srednja mjesečna vrednost generisane električne energije od strane PV modula, odn. najveći stepen iskorišćenja PV modula. Dokazano je da se primjenom PV modula u Trombovom zidu, u toku 12 mjeseci, redukuje srednja proizvedena električna snaga u odnosu na snagu pri optimalnom ili njemu bliskom uglu nagiba, za 35% i 45.8%., za Podgoricu i Changsha, respektivno. Značaj i doprinos disertacije je dokaz da je, sa aspekta veće proizvodnje električne energije PV modula, korisnije i ekonomski isplativije PV modul instalirati ne u Trombovom zidu, nego na drugom mjestu van Trombovog zida pri optimalnom uglu nagiba modula. Takođe, dokazano je da je uticaj porasta radne temperature PV modula na količinu proizvedene električne energije zanemarljiv, pogotovo u poređenju sa uticajem ugla nagiba PV modula. Dobijeni rezultati su publikovani u časopisu sa SCI liste [16].

Drugi važan doprinos disertacije ogleda se u nalaženju dimenzija izolacionog zida u omotaču zgrade, odn. identifikovanju pozicija slojeva stiropora sa PCM kuglicama u oviru tog zida, koje obezbjeđuju optimalnu regulaciju unutrašnje temperature prostorije. Mjerene su fluktuacije temperatura PCM kuglica i šupljina, sem u funkciji njihovog položaja u izolacionom zidu, i u funkciji promjenljivog toplotnog fluksa kojim se simulira sunčevo zračenje. Simulacija sunčevog zračenja je vršena kako za stacionarni toplotni režim, tako i za tranzijentni tokom koga se simulira promjenljivo sunčevo zračenje tokom dana. Eksperimentalnim putem su nađene, za razmatrani uzorak sa PCM kuglicama, maksimalne redukcije temperatura u toku dana, kao i maksimalni porasti temperatura u toku noći.

Analizom mjernih rezultata se identifikuje, na konkretnom laboratorijskom modelu, koje oblasti gipsanih zidova, odn. koji izolacioni slojevi sa PCM kuglicama unutar tih zidova, su podvrgnuti i u kojoj mjeri faznim prelazima (topljenja i solidifikacije) parafinskog rastvora unutar PCM kuglica. Na osnovu toga se nalazi u kojim slojevima je svrsishodno postavljati impregnisane stiroporne slojeve sa PCM kuglicama, da bi efikasno obavljali funkciju regulatora temperature, odn. smanjili angažovanje dodatnih sistema za zagrijavanje i hlađenje. Dobijeni rezultati i predložena metodologija su značajni za unapređenje efikasnog projektovanja i energetske performansi omotača zgrade, tj.

izolacionog zida koji sadrži sloj sa ugrađenim PCM kuglicama i predstavljaju obećavajuću strategiju u smanjenju energetske potrošnje u zgradama. Rezultati istraživanja su dati u [17].

2. PRINCIPI ENERGETSKE EFIKASNOSTI U GRAĐEVINARSTVU

2.1. Energetska potrošnja u građevinskim objektima

Energetska potrošnja u zgradama je oko 40 % na globalnom nivou. U Velikoj Britaniji, tokom svog životnog ciklusa zgrade utiču čak i do 47 % na emisije ugljen-dioksida. U zemljama, članicama Evropske Unije, svake godine vrši se restrukturiranje energetske efikasne akcionih planova i skaliranje energetske ušteda postignutih u građevinskoj industriji. Tzv. bottom-up modeliranjem utvrđeni su procenti potencijalnih energetske ušteda u građevinskom sektoru po zemljama i to 58% u Italiji, 63 % u Irskoj, 71 % u Sloveniji i 77 % u Austriji [18,19]. Stoga se teži integrisanoj, višekriterijumskoj analizi energetske potrošnje unutar građevinskih objekata i dekarbonizaciji istih.

Odluke koje se tiču dizajna objekata posljedica su holističkog pristupa i imaju dugoročne i višestruke uticaje i na društvo i na prirodno okruženje. Modelovanje i monitoring energetske potrošnje unutar građevinskih objekata su veoma kompleksne studije i predmet su izučavanja renomiranih institucija kao Fraunhofer Instituta (Frajburg), Gouveia model koji se koristi za procjenu energetske potrošnje u stambenom sektoru Portugala do 2050. godine [20], itd., i generalno predstavljaju jedan od najvećih izazova u savremenoj struci i nauci. Preliminarna procjena energetske dizajna građevinskog objekta vrši se utvrđivanjem životnog ciklusa objekta ili tzv. „ life-cycle approach (LCA)“ [21].

Evropska komisija za standardizaciju građevinskih normativa je 2004.godine formirala tehnički komitet TC350, koji je bio ustanovljen radi razvoja niza evropskih propisa koji su se ticali održivih građevinskih tehnologija i materijala. Evropski standardi EN15804, EN15643 su samo neki od evropskih standarda koji procjenjuju performanse građevinskih objekata kroz prizmu održivog razvoja.

Glavni normativi koji se tiču energetske efikasnosti, a koji su postojali u prošlosti u EU su: Evropska direktiva o energetske efikasnosti 2012/27/EU i Evropska direktiva o energetske efikasnosti 2006/32/EC. Prema tzv. BAU scenariju, globalna, primarna energetska potrošnja u građevinskim objektima, industriji i transportu predviđa se da će biti oko 450 EJ (450×10^{18} J) do 2030.godine [22].

Energetski efikasan način izgradnje građevinskih objekata ogleda se u projektovanju objekata sa niskom energetske potrošnjom. Koncept strategije izgradnje ovakvih objekata leži u posebnim urbanističkim planovima, koji se uklapaju u osmišljene gradske i regionalne urbanističke planove. Postoje dva tipa energetski-efikasnih objekata: objekti sa godišnjom potrebnom toplotom za grijanje od 40-50 kWh/m² i objekti označeni kao „pasivne kuće” sa godišnjom potrebnom toplotom za grijanje do 15 kWh/m² korisne stambene površine. Energetski efikasan način izgradnje građevinskih objekata je zapravo laka gradnja, kojom se u odnosu na masivnu gradnju, utiče na manje emitovanje ugljendioksida od strane objekata ili njihovu dekarbonizaciju. Laka gradnja je gradnja drvetom, šupljikavom opekom, slamom, recikliranim materijalima kao i gradnja u kombinaciji sa ekološkim izolacionim materijalima. Masivna gradnja je gradnja kamenom, betonom, punom opekom. U jednoj studiji pokazalo se, da se lakom gradnjom porodične kuće od 500 m² postiglo čak 33 hiljade kilograma ugljen-dioksida manje ispuštenog u atmosferu nego u slučaju masivne gradnje ovakvog objekta [23,24]. Kod projektovanja energetski-efikasnih objekata, mora se zadovoljiti niz preduslova i kriterijuma, koji vode ka maksimalizaciji dobiti i minimalizaciji toplotnih i drugih gubitaka takvog objekta.

2.2. Energetska efikasnost i njeni indikatori

Energetska efikasnost građevinskog objekta je stvarna ili procijenjena količina utrošene energije unutar objekta, koja podliježe racionalizaciji i mjerama štednje, a

obuhvata širok spektar djelatnosti: grijanje, pripremu tople vode, hlađenje, ventilaciju i osvetljenje.

Energetska efikasnost u zgradarstvu ogleda se još i u: definisanju optimalnih konstruktivnih rješenja fasadnog omotača sa aspekta uštede energije i zaštite životne sredine; dizajniranju odgovarajućeg low-energy KGH (klimatizacija, grijanje, hlađenje) sistema; štedljivim sanitarnim instalacijama; upotrebi kućnih aparata sa manjom potrošnjom električne energije; upotrebi ekoloških i manje toksičnih materijala; dobroj zaptivenosti. Energetski efikasna gradnja se označava i kao zelena ili održiva gradnja [25,26]. Energetski efikasan način izgradnje građevinskih objekata smanjuje sveukupne troškove objekta tokom njegovog životnog ciklusa. To su troškovi eksploatacije sirovina, troškovi procesa gradnje, korišćenja objekta, održavanja i konačnog uklanjanja. U cilju unapređenja energetske karakteristika objekata, vrše se intervencije i na postojećim objektima. Veće restauracije objekata su one kada su ukupni troškovi restauracije spoljašnjeg omotača objekta i energetske instalacije objekta veće od 25 % vrijednosti objekta. Unapređenje energetske efikasnosti objekta nikada nije nužno restauracija cjelokupnog objekta već može biti i restauracija samo nekih njegovih dijelova radi povećanja vrijednosti energetske pokazatelja. Restauracija objekta treba da doprinese većem kvalitetu objekta, kvalitetu života, kao i boljem energetskom performansu objekta. Pasivne tehnike grijanja i hlađenja koje su karakteristične za energetski-efikasne objekte doprinose vremenskom odlaganju vršnih, maksimalnih opterećenja elektro-distributivne mreže, smanjenju troškova za električnu energiju i postizanju energetskog bilansa. Pri utvrđivanju zahtjeva za sprovođenje energetske efikasnosti, može se napraviti razlika između novih, postojećih, starih i drugih različitih kategorija objekata.

Indikatori energetske efikasnosti su specifični energetski pokazatelji koji se upotrebljavaju za definisanje potencijala uštede energije kao i za utvrđivanje efekata sprovođenja mjera energetske efikasnosti. Upoređivanjem različitih baza podataka mogu se identifikovati i locirati potencijali za masovne uštede u potrošnji energije kao i prepoznati profili potrošača. Ovi pokazatelji su manje ili više kompleksni i objedinjavaju raznovrsne tipove potrošača. Takođe moguća je obrada ovih indikatora u bilo kom programskom

paketu čija je tematika obrade energetska efikasnost stambenih objekata, uopšte sektora, javnih zgrada, itd.

Indikatori energetske efikasnosti se mogu prepoznati kao:

- termodinamički - stepeni iskorišćenja određenih energetske procesa (kao npr. stepen iskorišćenja kotla ili toplotne pumpe);
- fizičko-termodinamički - ulazi i izlazi iz energetske procesa bilježe se energetske jedinice i čitav mehanizam je poput energetske bilansa. Inputi i outputi se obilježavaju kao kWh/m³ (energija po jedinici zapremine), kWh/m² (energija po jedinici površine), kWh/t (energija po toni proizvoda), itd;
- ekonomsko-termodinamički - u kojima se energetske inputi obilježavaju energetske jedinice, a outputi novčanim jedinice (npr. potrošnja energije u mega-džulima po 1\$ bruto nacionalnog dohotka);
- ekonomski - u kojima se i inputi i outputi obilježavaju monetarnim jedinice.

U zavisnosti od stepena složenosti, energetske indikatori imaju različitu hijerarhiju. Indikatori najvišeg hijerarhijske reda su energetske indikatori na nivou države; indikatori srednjeg hijerarhijske reda su energetske indikatori lokalne samouprave, tj. opštine ili preduzeća; dok se najniži indikatori odnose npr. na konkretne instalacije tehničke sistema. Preduzete mjere energetske efikasnosti zahtijevaju određena ulaganja i investicije, pa se vrši detaljna cost-benefit analiza za konkretan objekat. Postoji i metoda zoniranja npr. samog grada, da bi se napravila tipologija zgrada unutar urbanističke plana.

Energetske efikasne objekti bi trebali da imaju jednostavan i kompaktan oblik, kojim se osigurava odgovarajući odnos površine i zapremine objekta. Geometrijske idealne forme objekta bi bile lopta i cilindar, ali to nijesu prikladne forme za izgradnju objekata. Većina pasivnih objekata je stoga izgrađena u obliku kvadra, na dva sprata, sa ravnim krovom ili pult-krovom (krov koji se sastoji od samo jedne kose krovne površine). Idealna forma objekta svodi se na odnos površine i zapremine objekta koji mora biti manji od 0.8, odnosno na njegovu recipročnu vrijednost koja se naziva karakteristična dužina objekta i

iznosi 1.25 m. Jednostavne forme objekata iziskuju i manje troškove gradnje, pa su i sa ekonomskog aspekta povoljnije. Nepovoljna geometrija objekta, tj. forma objekta koja zahtijeva složenije projektovanje, uvijek ima veći stepen toplotne izolacije [27].

Na energetske efikasni objekat utiču: topografski položaj građevinskog zemljišta, orijentacija objekta, osunčanost građevinskog zemljišta, jačina vjetra, zastakljenost objekta, toplotna izolovanost objekta, emisija štetnih materija i buka.

Unutar energetske efikasnog objekta bi trebalo predvidjeti mehanizme za pripremu tople vode, površine sa podnim i zidnim grijanjem, iskorišćavanje kišnice, upotrebu alternativnih izvora energije, uređaje za provjetravanje, itd. Korišćenje savremenih uređaja za ventilaciju sa sistemom za zagrijavanje svežeg vazduha može da uštedi i do 30 % energije potrebne za grijanje. Tačne dimenzije i raspodjela sistema za grijanje utvrđuju se uz konsultacije sa ekspertima iz pomenute oblasti [28,29,30].

Kada je u pitanju sistem grijanja, vodi se računa o izboru energenta. Sistemi grijanja mogu se bazirati na prirodnom gasu (fosilno gorivo), biomasi (komadi drveta i drugih organskih supstanci), grijanje toplotnim pumpama, grijanje obnovljivim izvorima energije tj. korišćenjem sunčeve energije i energije vjetra, itd. Pri tome se mora obratiti pažnja na ekonomske aspekte, tj. investicione i eksploatacione troškove sistema za grijanje, kao i ekološke aspekte njihove upotrebe. Unutar energetske-efikasnog objekta, faktori koji utiču na udobnost boravka stanovnika su: osvijetljenost, vlažnost vazduha, temperatura vazduha, prašina [31].

3. ANALIZA ENERGETSKE EFIKASNOSTI TROMBOVOG ZIDA SA UGRAĐENIM FOTONAPONSKIM MODULIMA

3.1 Uvod

Ukupna godišnja potrošnja energije u građevinskim objektima je sa veoma značajnim udjelom u ukupnoj potrošnji energije. Tako npr. u Kini, ukupna godišnja potrošnja energije u građevinskim objektima ekvivalentna je 16 biliona tona standardnog uglja, što čini oko 20.7% ukupno utrošene energije u Kini [32,33,34]. Stoga je povećanje energetske efikasnosti građevinskih objekata jedan od primarnih zadataka.

Jedan od načina izgradnje građevinskih objekata sa niskom potrošnjom energije su objekti građeni na bazi koncepta Trombovog zida. Ovaj koncept pasivnog solarnog dizajna zgrada, tzv. "pasivne kuće", baziran je na akumulaciji toplotne energije solarnog zračenja sa efikasnim mehanizmima distribucije te energije u objektu. Akumulacija toplotne energije se vrši putem zida sa visokom sposobnošću apsorpcije solarnog zračenja, obično orijentisanog prema južnoj strani [35]. Brojni radovi, teorijski i eksperimentalni su posvećeni ulozi i implementaciji Trombovog zida. U radu [36] je data numerička analiza performansi hlađenja Trombovog zida sa dodatno primijenjenim trakastim zavjesama - venecijanerima, kao i odgovarajući eksperimentalni rezultati. Rad [37] obuhvata numeričku studiju uticaja vrste materijala i debljine Trombovog zida na sobnu temperaturu u slučaju pasivnog solarnog grijanja. Agrawal i Tiwari su predložili optimalnu debljinu betonskog Trombovog zida u opsegu 30-40 cm [38].

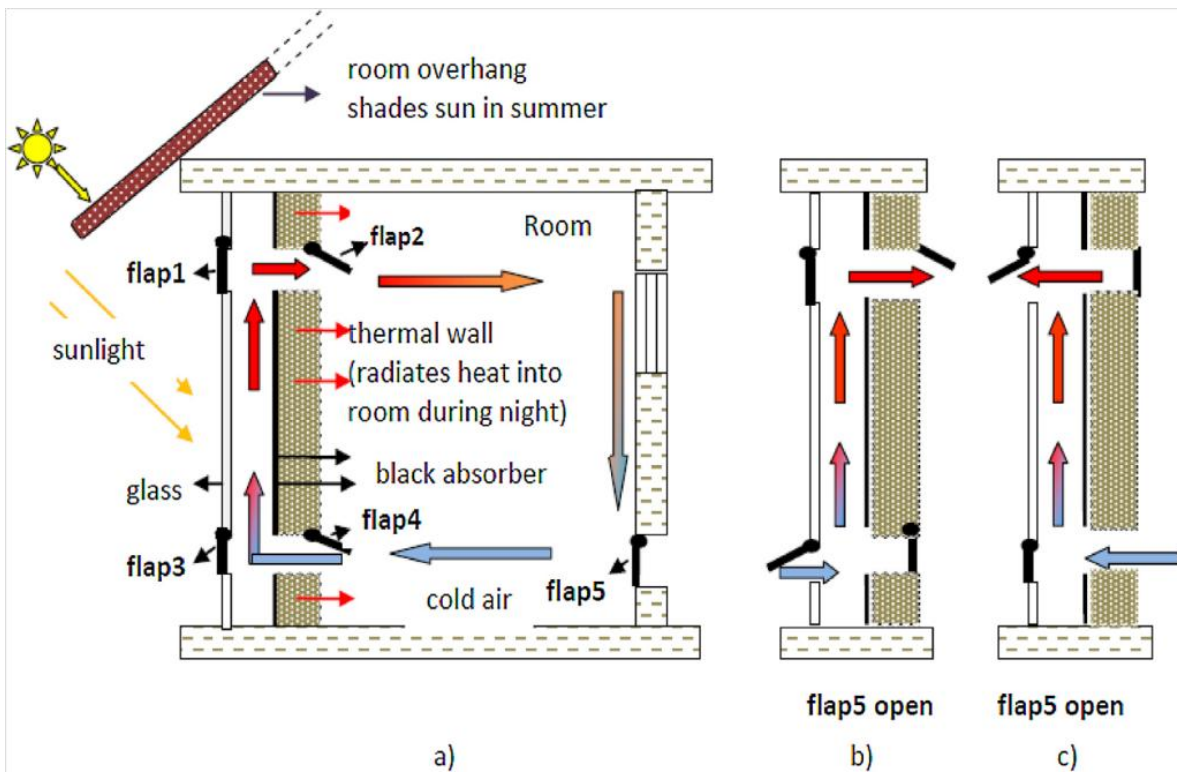
Primjena Trombovog zida u kombinaciji sa fotonaponskim PV (Photo Voltage) modulima, panelima, takozvani PV-Trombov zid, bio je predmet istraživanja niza naučnih radova. PV-Trombov zid, zbog korišćenja PV modula kod kojih se vrši naknadna konverzija napona, struje, odn. električne energije, ne pripada pasivnom solarnom grijanju poput klasičnog Trombovog zida. U radu [39] analizirana je primjena PV-Trombovog zida

sa poluprozirnim PV panelima, u toku zimske sezone u Nju Delhiju. Računarskim metodama autori su identifikovali optimalne parametre toplotne akumulacije, odn. debljinu zida za toplotno grijanje prostorije koja je testirana. Rad [40] je posvećen analizi temperatura zgrade sa južno orijentisanim prozorom na fasadi i Trombovim zidom sa primjenom PV modula na prozoru.

Sa aspekta boljeg iskorišćenja PV panela sa boljim energetske pokazateljima, neophodno je dalje izučiti performanse PV-Trombovog zida. Ovaj dio disertacije posvećen je analizi parametara PV modula, primijenjenih u PV-Trombovom zidu i njihovog uticaja na efikasnost proizvodnje električne energije. Električna energija proizvedena putem PV panela, integriranih u PV-Trombov zid, analizirana je putem System Advisor Model (SAM) softvera. Ovaj softver omogućava projektovanje i ocjenu tehničkih performansi obnovljivih izvora energije (solarni kolektori za grijanje vode, fotonaponski sistemi, vjetrogeneratori, sistemi na bazi biomase, geotermalni izvori) kao i ocjenu finansijskih pokazatelja (ulaganja, roka isplativosti, itd). Analiziran je uticaj nagiba panela prema tlu, kao i geografske širine gdje je lociran panel, na količinu električne energije koju proizvodi PV panel. Takođe, analiziran je uticaj radne temperature PV ćelija, odn. modula, na nivo proizvedene električne energije.

3.2 Trombov zid

Trombov zid je kompleksna građevinska konstrukcija koja je efikasna za hlađenje i ventilaciju unutrašnjeg prostora ljeti i zagrijavanje istog zimi. Tipičan Trombov zid se sastoji od debelog zida (20-40 cm), sa crnim slojem na njegovoj površini okrenutoj vani radi bolje apsorpcije toplote, odn sunčeve energije. On služi za akumulaciju toplote tokom dana i odavanje iste tokom noći. Ovaj zid je uokviren sa dvostrukim ili trostrukim slojem stakla, pri čemu je vazdušni prostor između stakla i zida 2-10 cm [35,41]. Trombov zid može biti od različitih materijala: betona, opeke, kamena, itd., sa površinskim slojem od maltera, gipsa, metalnih folija različite debljine i sl.



Sl. 3.2.1 Trombov zid i njegove potencijalne funkcije: a) grijanje (zimi), b) ventilacija sa toplim vazduhom (zimi), c) ventilacija sa hladnim vazduhom (ljeti)

Postoji veliki broj varijacija Trombovog zida, sa potencijalnim funkcijama grijanja i hlađenja. Jedna od mogućih šema za regulaciju temperature prostorije data je na Sl.3.2.1 Protok vazduha, a time i distribucija toplote je omogućena preko malih ventilacionih otvora lociranih na donjem i gornjem dijelu masivnog termalnog zida. Regulacija i usmjeravanje prirodnog kretanja vazduha kroz ventilacione otvore, vrši se pomoću serije preklopnika montiranih na ventilacionim otvorima. Položaj preklopnika može se podešavati ručno zavisno od sezone, vremenskih uslova i zahtjeva. Preporučuje se da ukupna površina ventilacionih otvora iznosi oko 2% površine termalnog zida. Time, npr. za površinu termalnog zida od 100m^2 , za dva ventilaciona otvora na dnu i dva pri vrhu, njihova ukupna površina iznosi 2m^2 , odn. svakog posebno 0.5m^2 [42].

Kombinacijom preklopnika dobijaju se različiti režimi, tj. funkcije Trombovog zida. Neke od kombinacija položaja preklopnika, a zavisno od toga i funkcije Trombovog zida, date su na Sl.3.2.1. Na Sl.3.2.1.a prikazan je položaj preklopnika za slučaj grijanja (zimski period). Usljed sunčevog zračenja zagrijava se termalni zid i vazduh u tankom međuprostoru između termalnog zida i staklene površine. Tako zagrijan vazduh postaje ređi, podiže se ka vrhu gdje preko preklopnika 2 ulazi u prostoriju koja ima nižu temperaturu. Zagrijani vazduh predaje toplotu prostoriji, hladi se i kao gušći pada na dno prostorije, da bi se preko preklopnika 4 ponovo našao u međuprostoru. U međuprostoru preuzima toplotu sa termalnog zida i diže se naviše. Time je uspostavljena konvekcija, odn. ciklični prenos toplote cirkulacijom vazduha [43-45]. Oko 50% solarne energije se akumulira u termalnom zidu, dok se ostali dio prenosi cirkulacijom u unutrašnjost prostorije. Dio toplote predate spoljnjem dijelu termalnog zida prolazi kroz zid zbog razlike temperatura (kondukcija) i predaje se hladnijoj unutrašnjoj prostoriji. Pored toga zid, kao svako tijelo zagrijano na određenu temperaturu zrači toplotu sa obje strane zida. Za šemu na Sl.3.2.1.b cirkulacija toplog vazduha u hladnom periodu se obavlja preko otvorenih preklopnika 3,2 i 5. Rashlađivanje prostorije, tj. ventilacija hladnim vazduhom u toku ljeta se vrši preko otvorenih preklopnika 5,4 i 1 (Sl.3.2.1.c).

Kao pomoćno sredstvo za ograničenje sunčevog zračenja ljeti može služiti nastrešnica (Sl.3.2.1a). Nastrešnica treba da bude odgovarajuće dizajnirana, omogućavajući ljeti zasjenčenje južno orijentisanog stakla Trombovog zida, ali dozvoljavajući u toku zimskog perioda što veću ekspoziciju prema suncu.

3.3 Poređenje Trombovog zid a sa troslojnim zidom

Toplotna izolacija zida je regulator toplotnog režima i zavisi od konstrukcionih elemenata samog zida. Od tih elemenata krucijalno zavise: toplotni gubici, ventilacioni gubici, gubici vazduha koji prolaze kroz dilatacije i spojeve materijala. Zid može biti jednoslojni ili višeslojni. Višeslojni zidovi bolje zadovoljavaju konstrukcione zahtjeve i

standarde [46]. U radu je razmatran višeslojni zid na primjeru troslojnog zida. Pretpostavljeno je da se kroz troslojni zid toplota prenosi iz unutrašnjosti ka spoljnjem dijelu u toku zimskog perioda. U slučaju Trombovog zida, usljed postojanja Trombovog kanala (zid-staklo) cirkulacija vazduha se može usmjeravati u više pravaca.

Pretpostavljeno je da se prenos toplote kroz kompozitni zid vrši u ustaljenom, stabilnom, režimu. Pod ovim uslovom korišćen je koncept toplotnog otpora radi određivanja toplotnog transfera kroz kompozitne zidove (Trombovog troslojnog zida i običnog troslojnog zida). Dodatna pretpostavka je da je svaki od kompozitnih materijala, koji ulazi u sastav troslojnog zida, homogen, kao i idealno ravan, tj. da imaju međusobno idealno prijanjanje. Za oba slučaja, za n-slojni zid, ukupni termalni otpor R za sve slojeve se može izračunati po jednačini (3.3.1):

$$R = 1/h_i + d_1/\lambda_1 + d_2/\lambda_2 + \dots + d_n/\lambda_n + 1/h_e \quad (3.3.1)$$

Razmatran je slučaj troslojnog zida ($n=3$), ukupne debljine 30cm. Debljine d_i i odgovarajući koeficijenti toplotne provodnosti λ_i materijala pojedinih slojeva dati su u Tabeli 3.3.1.

Tabela 3.3.1 Termo-fizička svojstva materijala

Materijal sloja	Debljina sloja d (m)	Toplotne provodnosti sloja λ (W/mK)
unutrašnji sloj maltera	0.02	0.85
Zid od armiranog betona	0.25	2.04
Spoljni sloj maltera	0.03	0.87

Koeficijent h odgovara tzv. koeficijentu kombinovanog toplotnog transfera (u literaturi obično označen kao h_{comb}), koji uključuje oba efekta prenosa toplote: putem

radijacije i konvekcije. U jednačini (3.3.2) h_{rad} i h_{conv} označavaju koeficijente radijacije i konvekcije, respektivno [47]:

$$h = h_{comb} = h_{conv} + h_{rad} \quad (3.3.2)$$

Postoje dva koeficijenta kombinovanog toplotnog transfera: jedan za unutrašnji prostor h_i (W/m^2K) i drugi za spoljašnji prostor h_e (W/m^2K). Za ove koeficijente kombinovanog toplotnog transfera uzete su vrijednosti: $h_i=8$ (W/m^2K) i $h_e=23$ (W/m^2K) [46]. U vezi zavisnosti ovih koeficijenata od temperature: veličina h_{rad} je mnogo više zavisna od temperatura (temperature površine zida T_s i temperature okruženja T_{surr}) u odnosu na h_{conv} , što je očigledno iz formula (3.3.3) i (3.3.4).

$$h_{rad} = \frac{Q_{rad}}{A_s (T_s^4 - T_{surr}^4)} = \varepsilon \sigma (T_s^2 + T_{surr}^2)(T_s + T_{surr}) \quad (3.3.3)$$

$$h_{conv} = \frac{Q_{conv}}{A_s (T_s - T_{surr})} \quad (3.3.4)$$

Za razmatrani troslojni zid ukupni toplotni otpor je

$$R = 1/h_i + d_1/\lambda_1 + d_2/\lambda_2 + d_3/\lambda_3 + 1/h_e \quad (3.3.5)$$

odn. njegova vrijednost iznosi $R=0.349$ m^2K/W . Vrijednost koeficijenta ukupne toplotne provodnosti je $U=1/R=2.865$ W/m^2K .

U poređenju sa običnim troslojnim zidom Trombov zid, razmatran u ovom radu, ima identičnu unutrašnju strukturu, sem što pored troslojnog zida uključuje duplo staklo širine 2cm. Uzimajući u obzir međuprostor zid-staklo od 8cm, ukupna debljina Trombovog zida iznosi 40cm. U prilog povećane energetske efikasnosti kod Trombovog zida postoje podesivi ventilacioni otvori koji obezbjeđuju grijanje i ventilaciju toplim vazduhom, odn. ventilaciju hladnim vazduhom [48].

Usljed postojanja staklene površine i međuprostora zid-staklo ispunjenog vazduhom, povećava se ukupni toplotni otpor R , odn. smanjuje se koeficijent toplotne provodnosti U . Dodatno, toplotni otpor usljed staklene površine je $0.025\text{m}^2\text{K/W}$, čime se za ukupni toplotni otpor R i koeficijent toplotne provodnosti U dobijaju vrijednosti $0.374\text{m}^2\text{K/W}$ i $2.674\text{W/m}^2\text{K}$, respektivno. Ukupni toplotni otpor Trombovog zida je veći, tj. Trombov zid akumulira, odn. otpušta više toplote od običnog troslojnog zida.

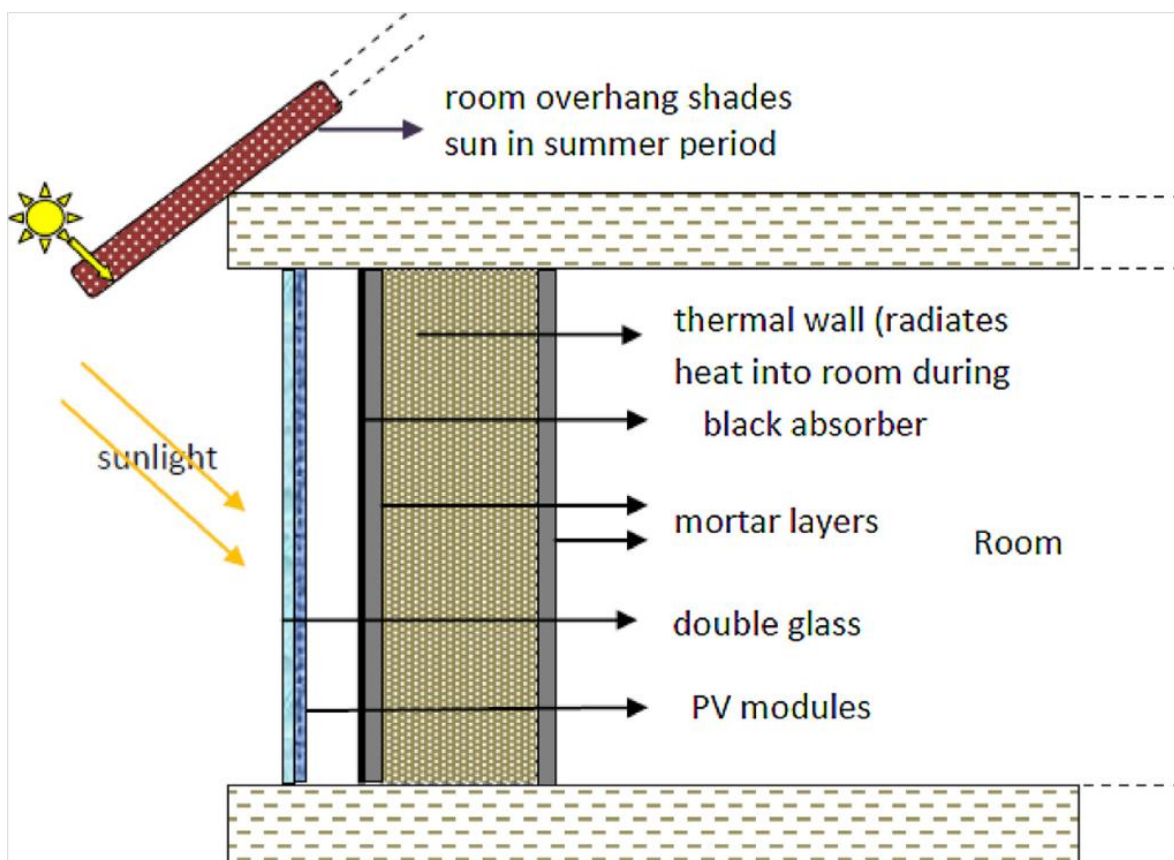
Solarno zračenje u vidu talasa kratke talasne dužine Trombov zid apsorbuje. On se ponaša kao toplotni akumulator, odn. akumulira toplotu u porama svog materijala. Toplotna energija predana zidu prolazi kroz njega toplotnom kondukcijom zbog razlike temperatura (unutrašnjost prostorije je hladnija). U unutrašnjosti prostorije toplota se otpušta zračenjem putem talasa duge talasne dužine.

3.4 Stepen iskorišćenja PV modula zavisno od ugla nagiba α prema tlu

Kombinacija Trombovog zida i PV modula, tzv. PV-Trombov zid, prikazana je na Sl.3.4.1. PV moduli su instalirani u Trombovom zidu (orijentisanom ka južnoj strani) i nalaze se u vertikalnoj poziciji (ugao nagiba prema tlu je $\alpha=90^\circ$). Vertikalna pozicija PV modula odgovara PV modulu postavljenom na unutrašnju površinu staklenog zida u Trombovom zidu. Pošto su dimenzije PV modula mnogo veće od širine vazdušnog procjepa između termalnog i staklenog zida (2-10 cm), ugao nagiba PV modula se ne može podešavati preme tlu, tj ugao nagiba je 90° [49-52].

Nivo sunčeve iradijacije na PV modul zavisi ne samo od vremenskih uslova, nego i od upadnog ugla sunčevih zraka na solarni modul. Upadni ugao se može varirati podešavanjem ugla nagiba modula prema tlu (Sl.3.4.2). Fotonaponski efekat zavisi od normalne komponente direktne sunčeve iradijacije (N), koja pada pod uglom 90° na površinu modula i jednaka je $N=D \cos\beta$. Upadni ugao β sučevih zraka na solarni modul, zavisi osim od nagibnog ugla PV modula prema tlu α i od godišnjeg doba: zimi je ovaj ugao manji nego ljeti usljed različite pozicije sunca na nebu.

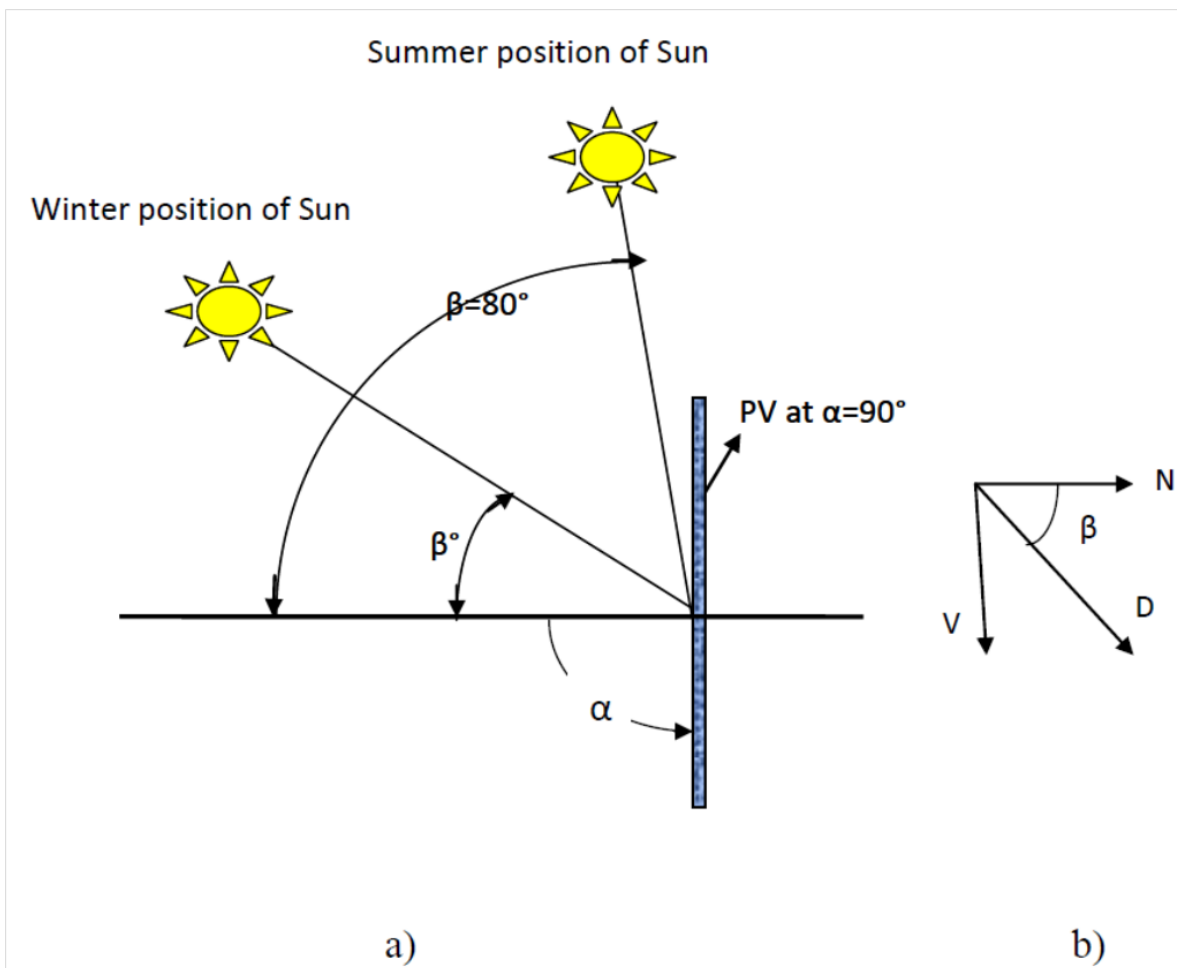
Za analizu je korišćen System Advisor Model (SAM), verzije 2016 i 2017, razvijen od strane USA Department of Energy and National Renewable Energy Laboratory (NREL) [53, 54]. SAM je softver koji simulira i izračunava tehničke performanse kao i finansijske pokazatelje alternativnih obnovljivih izvora energije, za naš slučaj fotonaponskih modula. Takođe, SAM omogućava simulaciju i proračun za solarne sisteme za grijanje vode, vjetrogeneratore, sisteme na bazi geotermalne energije i biomase.



Sl. 3.4.1 PV-Trombov zid

SAM služi za analizu rada mnogobrojnih tipova PV modula, različitih snaga i dimenzija, najpoznatijih svjetskih proizvođača, koji se nalaze u njegovoj datoteci. Svaki od tipova modula iz datoteke sadrži relevantne fizičke parametre tog modula date od

proizvođača, na osnovu kojih SAM simulira rad PV modula sa visokom tačnošću. Izborom tipa PV modula izabrane su njegove fizičke karakteristike, tj. parametri modula koji definišu njegov rad. U programu se bira broj modula i njihova konfiguracija u okviru

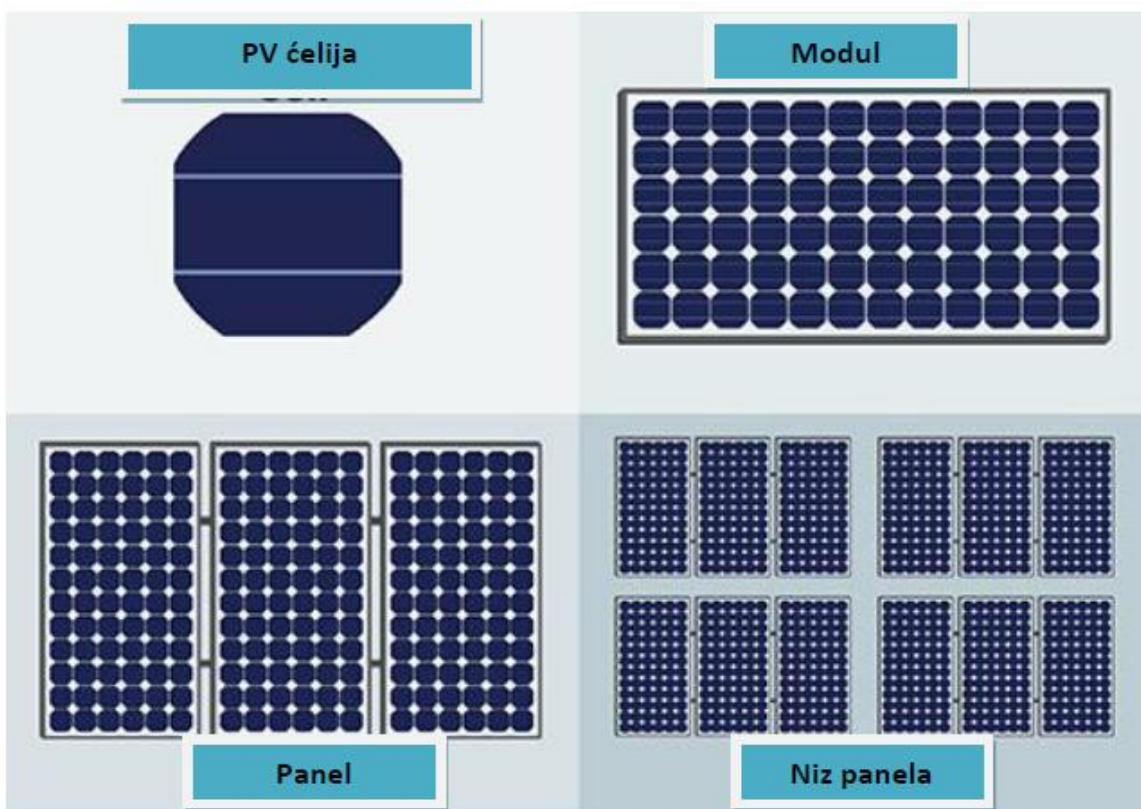


Sl. 3.4.2 a) Pozicija Sunca u toku ljeta i zime, b) normalna (N) i vertikalna (V) komponenta sunčevog zraka (D)

panela, a time i dimenzije panela koji želimo da koristimo. Takođe, parametar koji bitno utiče na rad PV modula, tj. na nivo proizvedene električne energije, je ugao nagiba PV panela u odnosu na tlo, a koji se pri analizi zadaje u SAM softveru kao ulazni parametar. Izborom lokacije panela, tj. mjesta, grada, gdje je on lociran, izabrani su automatski i fajlovi sa realnim parametrima klimatskih, vremenskih prilika za tu lokaciju (solarna radijacija, temperatura, vjetar, itd). Značajno je da SAM softver ima datoteke realnih

solarnih radijacija za veliki broj gradova na Zemlji, a tim podacima, kao i drugim raznovrsnim meteorološkim, snabdijevaju ga mnogobrojni nacionalni USA i međunarodni centri za sakupljanje podataka, pri čemu se ti podaci snimaju u toku svakog časa tokom čitave godine [55].

Osnovni parametar relevantan za generisanje električne enrgije je nivo solarne radijacije (zračenja) (W/m^2). Solarna radijacija može biti data u vidu solarne iradijacije (trenutna vrijednost totalnog solarnog zračenja data za svaki trenutak u toku dana) ili solarne insolacije (srednja vrijednost solarnih iradijacija za neki interval, npr. za godinu, mjesec dana, dnevno, itd). Za dvije razmatrane lokacije PV panela: Podgoricu (Crna Gora) i Changsha (NR Kina) SAM softver ima na raspolaganju datoteke realnih vrijednosti solarnih iradijacija mjenjenih u toku godine u vremenskim sekvencama od 1h, čime se dobija realna slika efikasnosti PV panela u tim gradovima.



Sl. 3.4.3 Prikaz PV ćelije, modula, panela i niza panela (Izvor: [56])

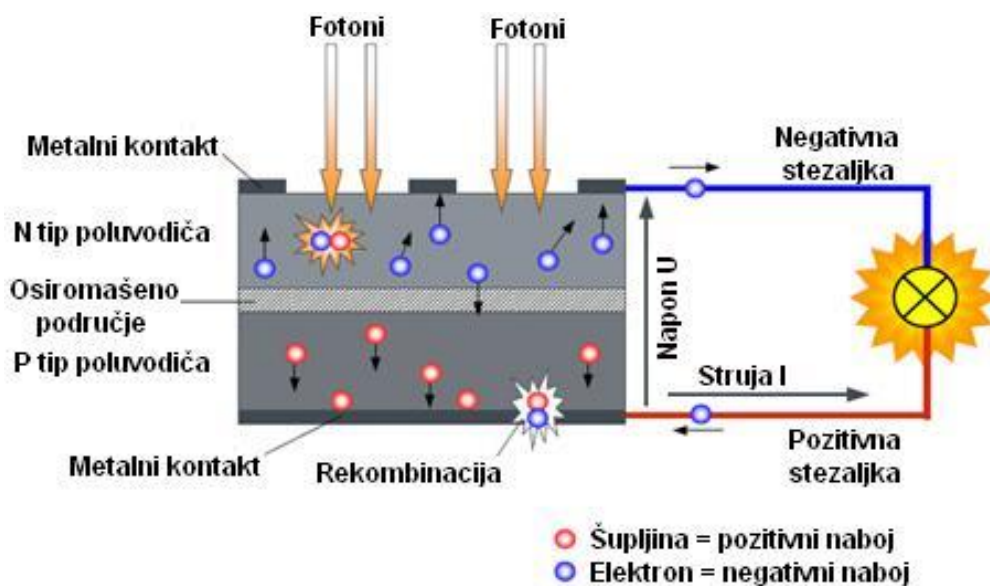
Prikaz solarnih ćelija, modula, panela i niza, tj. polja panela dat je na Sl.3.4.3. Simulacije sa SAM softverom su izvršene za dva paralelno spojena modula tipa "SunPower SPR-X21-335", sa ciljem nalaženja vrijednosti njihove izlazne električne snage pri različitim uglovima nagiba modula prema horizontalnom tlu. Pri simulaciji i proračunu su uzeti u obzir svi relevantni vremenski i drugi podaci iz datoteka SAM-a (realna temperatura ambijenta, vjetar, solarna iradijacija, tip PV modula, odn. panela sa odgovarajućim kataloškim parametrima, uglovi nagiba, radne temperature PV modula, itd.) za izabranu geografsku poziciju. Analizirani su energetske pokazatelji modula za period od 25 godina (koliki je životni ciklus PV modula), uz godišnji pad proizvodnje električne energije usljed starenja modula od 0.5%.

Niz panela čini polje solarnih panela ili solarnu elektranu, koji mogu biti velikih snaga od 1 MW pa čak do 790 MW ("Diablo Canyon", California, USA) (Sl. 3.4.4) [57].



Sl. 3.4.4 Solarna elektrana (Izvor: [57])

Pojava koja ima za posledicu oslobađanje, odnosno emisiju slobodnih nosilaca naelektrisanja (elektrona) pod dejstvom svjetlosti, i stvaranje usmjerenog kretanja elektrona naziva se fotonaponski efekat. Solarna fotonaponska (PV) ćelija predstavlja p-n spoj (diodu) po svojoj strukturi. Ćelija se sastoji od dva poluprovodnička sloja, pozitivnog (p) i negativnog (n) (Sl.3.4.5) [58]. Intenzitet sunčevog zračenja direktno utiče na razliku potencijala između ova dva sloja. U p-n spoju se apsorbiraju fotoni sunčevog zračenja, čija se energija koristi za stvaranje parova šupljina-elektrona. Da bi foton izazvao oslobađanje elektrona, odnosno stvaranje šupljine, potrebno je da mu preda energiju veću od energije vezivanja, kojom je elektron vezan za atom. Slobodni elektron, koji je dobio energiju od fotona naziva se fotoelektron. Tako se na jednom kraju p-n spoja nagomilavaju elektroni, a na drugom šupljine, što prouzrokuje razliku potencijala, tj. napon na krajevima ćelije. Da bi se fotonaponskim efektom dobila električna energija, mora postojati usmjerenno kretanje elektrona, odnosno struja. Na krajevima PV ćelije se dobija jednosmjerni napon, koji se može pretvoriti (invertovati) u naizmjenični.



Sl. 3.4.5 Fotonaponska (PV) ćelija [58]

Na krajevima ćelije, zavisno od snage sunčevog zračenja, se dobija napon 0.3-0.7V, zbog čega se ćelije vežu na red da bi se dobio željeni veći napon, čime se obrazuje fotonaponski modul (Sl.3.4.3). Najčešće se koristi redno vezivanje 36 ćelija da bi se dobio modul za 12V. Više modula se vezuje redno ili paralelno u fotonaponske panele kojima se dobija veća snaga.

Kao poluprovodnički materijal najčešće se koristi silicijum, koji ima povoljne tehničke i komercijalne performanse. U odnosu na kristalografsku strukturu PV ćelije se dijele na monokristalne, polikristalne i amorfne. Kod monokristalnih ćelija koeficijent korisnog dejstva ide do 18%, a kod savremenijih modela i preko 20%, pri čemu je i njihova cijena najviša. Polikristalne PV ćelije imaju stepen korisnosti do 15%, uz nižu cijenu od monokristalnih. Amorfne PV ćelije imaju najniži koeficijent korisnog dejstva (do 8%), najnižu cijenu, ali su pogodne za nanošenje u vidu tankog filma na površine različitih materijala [59]. PV moduli kao konvertori sunčeve energije u toplotnu imaju veliku perspektivu razvoja i primjene. Koliki je značaj sunčeve energije govori i podatak da Sunce kao neiscrpan izvor energije, daje Zemlji više energije u toku jednog časa nego što čovječanstvo potroši energije za godinu dana [59].

Cijena solarnih panela dramatično opada, pogotovo zahvaljujući kineskim proizvođačima kod kojih se proizvođačka cijena kreće oko 2 \$/W. Sa daljim padom cijene do 1.5\$/W PV moduli kao izvori "zelene" energije postaju konkurentni klasičnim izvorima energije na bazi uglja, nafte i gasa, ali ne izazivajući efekat staklene bašte emitovanjem CO₂ i drugih GHG gasova. Problem su i dalje relativno velike maloprodajne cijene. Radi stimulanja što veće proizvodnje "zelene" energije država subvencionira proizvođače ovakve energije. Tako npr., u Crnoj Gori visina naknade za podsticanje proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije u 2016. godini iznosila je 0.058715 €/kWh [60]. Ako je cijena 1 kWh dobijenog iz klasičnih izvora energije (hidroelektrane) oko 0.05 €/kWh, to znači da država plaća dvostruko veću cijenu proizvođaču "zelene" energije da bi ga stimulisala. U razvijenim zemljama ovi stimulansi su bitno veći.

Poseban ekološki problem predstavljaju solarne elektrane, tj PV moduli, na kraju njihovog životnog vijeka koji je 25-30 godina. Stoga se razvijaju čitava prateća reciklažna postrojenja za islužene PV module, koja sem što štite životnu sredinu od zagađenja, smanjuju utrošak električne energije za proizvodnju ovih sirovina.

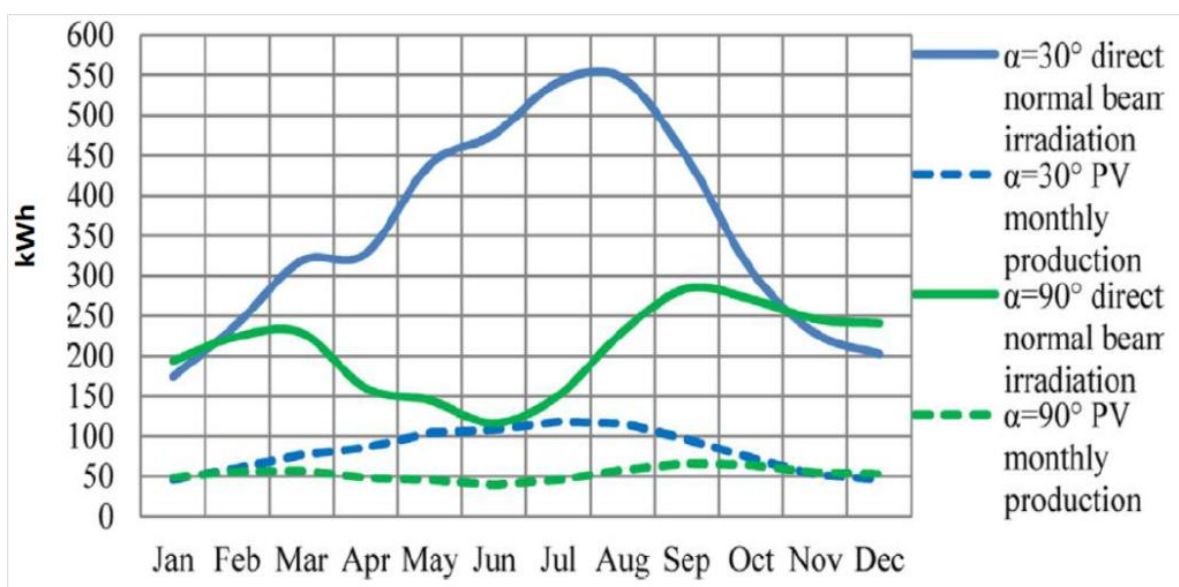
Zavisnost energije normalne komponente (N) sunčeve iradijacije (kWh) i proizvedene električne energije od strane PV modula (kWh), pri $\alpha=30^\circ$ i 90° , u toku godišnjeg perioda za Podgoricu, data je na Sl.3.4.6.

Vrijednosti normalne komponente sunčeve iradijacije (Sl.3.4.2), za uglove nagiba PV modula prema tlu $\alpha=30^\circ$ i 90° , za razmatrani tip i konfiguraciju modula i grad Podgoricu, nakon simulacije u SAM softveru dobijene su u Excel fajlu, za svih 12 mjeseci tokom godine. Sa Sl.3.4.6 zaključuje se da je srednja vrijednost komponente N oko tri puta veća za ljetnji period (jun, jul, avgust) pri uglu nagiba $\alpha=30^\circ$ (511.7kWh) u odnosu na ugao $\alpha=90^\circ$ (165.8kWh). Shodno tome, srednja vrijednost proizvedene električne energije, dobijena simulacijom u SAM-u, u toku naznačenog ljetnog perioda je veća pri $\alpha=30^\circ$ (110.5 kWh) skoro dva i po puta od odgovarajuće električne energije pri $\alpha=90^\circ$ (47.8kWh). Ovi dijagrami su potvrda pomenute činjenice da proizvedena električna energija PV modula zavisi od veličine komponente N. Dijagrami na Sl.3.4.6, na primjeru ljetnjeg perioda, predstavljaju očiglednu ilustraciju neefikasnosti korišćenja PV modula u vertikalnom položaju, tj. pri uglu nagiba prema tlu $\alpha=90^\circ$, što je slučaj kod PV-Trombovog zida.

Za ugao $\alpha=90^\circ$ (Sl.3.4.6) zapaža se da je veličina komponente N manja u toku mjeseci sunčanog, ljetnjeg, perioda godine (maj-jul) nego u toku u hladnijeg perioda (septembar - mart), a samim tim je manja i proizvedena električna energija PV modula u toku sunčanog perioda. Ovaj naizgled paradoks objašnjava se činjenicom da je u toku ljetnjeg perioda sunce pozicionirano na nebu pod uglom β znatno većim od veličine tog ugla u zimskom periodu, pa je posljedično i veličina komponente $N=D \cos\beta$ ljeti znatno manja.

Generalni zaključak je da korišćenje PV modula u Trombovom zidu (ugao nagiba modula $\alpha=90^\circ$), dovodi do manje efikasnosti korišćenja modula, tj manje proizvodnje

električne energije (npr. u odnosu na $\alpha=30^\circ$). Nezavisno od od navedene činjenice, postavljanje PV ćelija između staklenog i toplotnog zida u bilo kojoj formi (bilo kao mreže ćelija fiksirane za staklo bilo kao transparentnih PV modula) redukuje količinu sunčeve energije koja pada na toplotni zid, čime se smanjuje količina toplotne energije koju akumulira taj zid, odn. čime se degradira njegova funkcija akumulatora toplote.



SI. 3.4.6 Zavisnost energije normalne komponente (N) sunčeve iradijacije (kWh) i proizvedene električne energije od strane PV modula (kWh), pri $\alpha=30^\circ$ i 90° , u toku godišnjeg perioda za Podgoricu

Sa SI.3.4.6 očigledno je da se sva energija komponente N ne pretvara u električnu energiju. To je posljedica relativno niskog stepena korisnog dejstva modula (oko 20-25%). Tako naprimjer, na kraju mjeseca avgusta energija komponente N za $\alpha=30^\circ$ iznosi oko 500 kWh, a proizvedena električna energija 100 kWh, pri čemu stepen iskorišćenja iznosi $\eta=(100/500)*100\%=20\%$.

3.4.1 Godišnja proizvodnja električne energije PV modula zavisno od ugla nagiba α

PV moduli su obično fiksirani u određenom položaju i sa južnom orijentacijom što jako utiče na nivo proizvedene električne energije [61-67]. U ovom poglavlju se analizira pri kojim fiksiranim uglovima α je maksimalna srednja godišnja proizvodnja električne energije PV panela. Kao lokacije za pozicioniranje PV modula uzeti su Podgorica (Crna Gora) i Changsha (Kina). Podgorica je locirana u sjevernom dijelu zemljine hemisfere, sa nadmorskom visinom 33m, sa geografskom širinom 42.37°N , dužinom 19.25°E . srednja temperatura u toku godine je 15.1°C . Changsha je takođe locirana na sjevernom dijelu zemljine hemisfere, sa nadmorskom visinom 68m, sa geografskom širinom 28.23°N , dužinom 112.87°E , srednja temperatura u toku godine je 17.4°C .

Za obje lokacije su uzeta po 2 PV modula tipa "SunPower SPR-X21-335" čije su ćelije od monokristala silicijuma, sa 96 ćelija po modulu. Moduli su spojeni paralelno, snage $335.205\text{ Wdc/ modulu}$ (670.5 Wdc za oba modula), sa nominalnim stepenom korisnog dejstva 20.55% . Ukupna površina oba modula je 3.3m^2 . Jednosmjerni napon DC koji se dobija sa na krajevima modula transformiše se - invertuje u naizmjenični AC pomoću dva paralelno vezana invertora (type ABB: Micro-0.3-1-OUTD-US-208 208V) koji su sa koeficijentom korisnog dejstva 95% [53,54]. Simulacijom na SAM softveru analizirana je proizvodnja električne energije navedenih PV modula, južno orijentisanih, u funkciji različitih uglova nagiba prema tlu α° . Opseg varijacije parametra α° je od 0° (horizontalno položeni PV moduli) do 90° (vertikalni položaj PV modula).

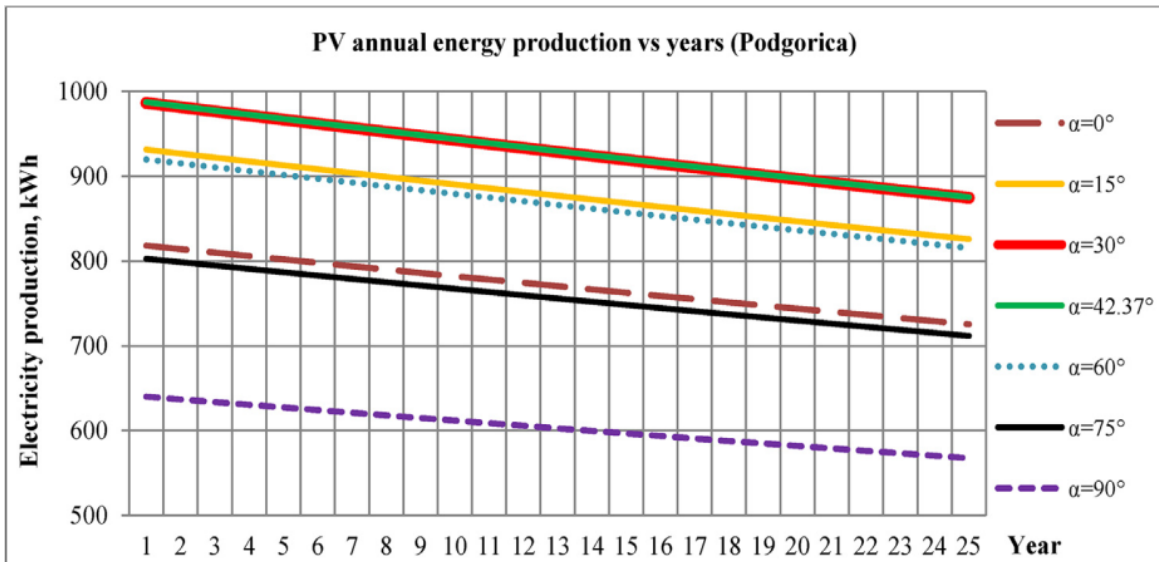
Vertikalni položaj PV modula odgovara PV modulima postavljenim na unutrašnju stranu staklenog dijela Trombovog zida. Kako je vazdušni procjep između staklenog i toplotnog zida samo 2-10 cm i kako se PV moduli nalaze u njemu, ugao nagiba PV modula prema tlu ne može biti podešavan, tj. on je praktično 90° . Simulacija izvršena za ova dva paralelno vezana modula i invertora, daje brojne podatke za vrijednosti izlazne električne energije automatski sačuvane u Excel tabelama, koje su pogodne za grafičke prikaze.

Na Sl.3.4.1.1a,b prikazan je srednja godišnja proizvodnja električne energije navedena dva PV modula u funkciji ugla α° , za period koji odgovara životnom vijeku modula (25 godina), za dva grada Podgoricu i Changsha. Sa dijagrama se zaključuje, za oba grada, da je najveća godišnja proizvodnja električne energije pri uglovima nagiba α° koji odgovaraju njihovim geografskim širinama ($\alpha^\circ = \text{geografska širina}^\circ$). Konkretno, za Podgoricu optimalan ugao nagiba je $\alpha^\circ = \text{geografska širina}^\circ \text{ Podgorice} = 42.37^\circ$, a za Changsha $\alpha^\circ = \text{geografska širina}^\circ \text{ Changsha} = 28.23^\circ$. Dodatno, sa dijagrama se vidi da je najmanja godišnja proizvodnja električne energije za oba grada pri uglu nagiba $\alpha = 90^\circ$, tj. kada su moduli u vertikalnom položaju.

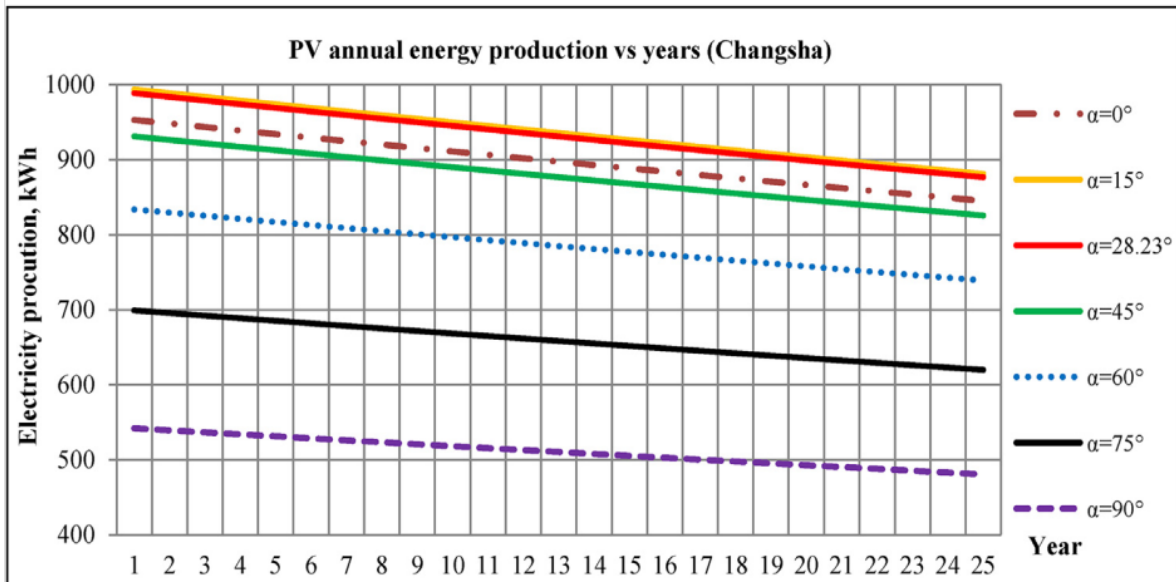
Na Sl.3.4.1.2 data je godišnja proizvodnja električne energije (kWh) PV modula za jednu godinu u funkciji ugla α° za oba grada. Na dijagramima 100% proizvedene električne energije odgovara maksimumu godišnje proizvedene električne energije. Maksimum godišnje proizvedene električne energije odgovara uglovima nagiba α koji su jednaki ili bliski geografskim širinama 42.37° (Podgorica) i 28.23° (Changsha). Udaljavanjem α od ovih vrijednosti opada nivo godišnje proizvedene električne energije.

Za Podgoricu godišnja proizvodnja električne energije pri $\alpha = 90^\circ$ čini samo 65% maksimuma proizvedene električne energije, a u slučaju Changsha 54.8%. Razlog zašto je relativno manja proizvodnja pri uglu $\alpha = 90^\circ$ u Changsha nego u Podgorici nalazi se u činjenici da je ugao $\alpha = 90^\circ$ bliži optimalnom uglu za Podgoricu (42.37°) nego optimalnom uglu za Changsha (28.23°). Generalno, ukoliko su moduli sa fiksiranim uglom nagiba α u toku čitave godine, godišnja proizvodnja električne energije je utoliko veća ukoliko je ugao nagiba PV modula bliži geografskoj širini mjesta u kome je lociran modul.

Na nivo proizvedene električne energije u toku godine utiče broj sunčanih dana (sunčanih intervala). Changsha ima manji broj sunčanih dana (sunčanih intervala) što prouzrokuje manju proizvodnju električne energije u odnosu na Podgoricu. I pored visoke srednje godišnje temperature u Changsha, u pitanju je suprotropska monsunska klima sa čestom oblačnošću i obilnim kišama.

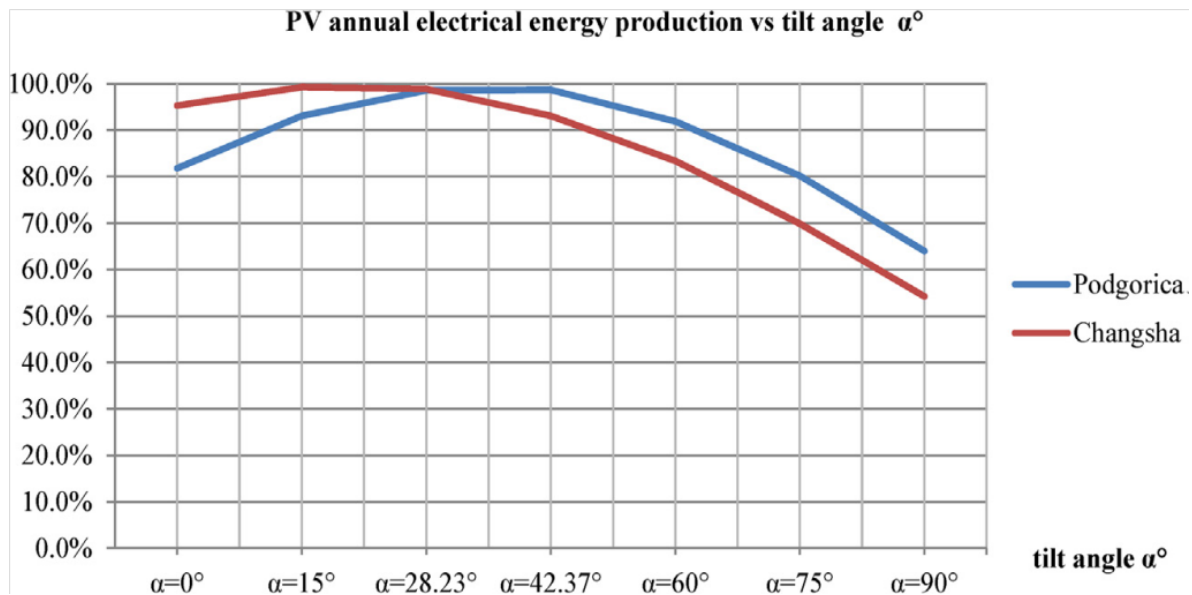


a) city of Podgorica (Montenegro)



b) city of Changsha (China)

Sl. 3.4.1.1 Godišnja proizvodnja električne energije PV modula u funkciji ugla nagiba α° za period od 25 godina a) Podgorica (Crna Gora), b) Changsha (Kina)



Sl. 3.4.1.2 Godišnja proizvodnja električne energije PV modula u funkciji ugla nagiba α°

3.4.2 Mjesečna proizvodnja električne energije PV modula zavisno od ugla nagiba α

U prethodnom poglavlju je zaključeno da je godišnja proizvodnja električne energije PV modula (u slučaju da se radi sa uglovima nagiba α fiksiranim, nepromjenljivim tokom čitave godine) maksimalna pri uglovima nagiba α koji odgovaraju ili su bliski geografskim širinama lokacija PV panela. U ovom dijelu se razmatra mjesečna proizvodnja električne energije zavisno od ugla α , tj. nalaze se optimalni uglovi pri kojima je mjesečna proizvodnja električne energije maksimalna.

U Tabelama 3.4.2.1 i 3.4.2.2 su prikazane srednje vrijednosti proizvedene električne energije po mjesecima (kWh) za Podgoricu i Changsha, respektivno, pri različitim uglovima nagiba razmatranih PV modula .

Tabela 3.4.2.1 Mjesečna proizvodnja električne energije (kWh) PV modula za različito α°
(Podgorica)

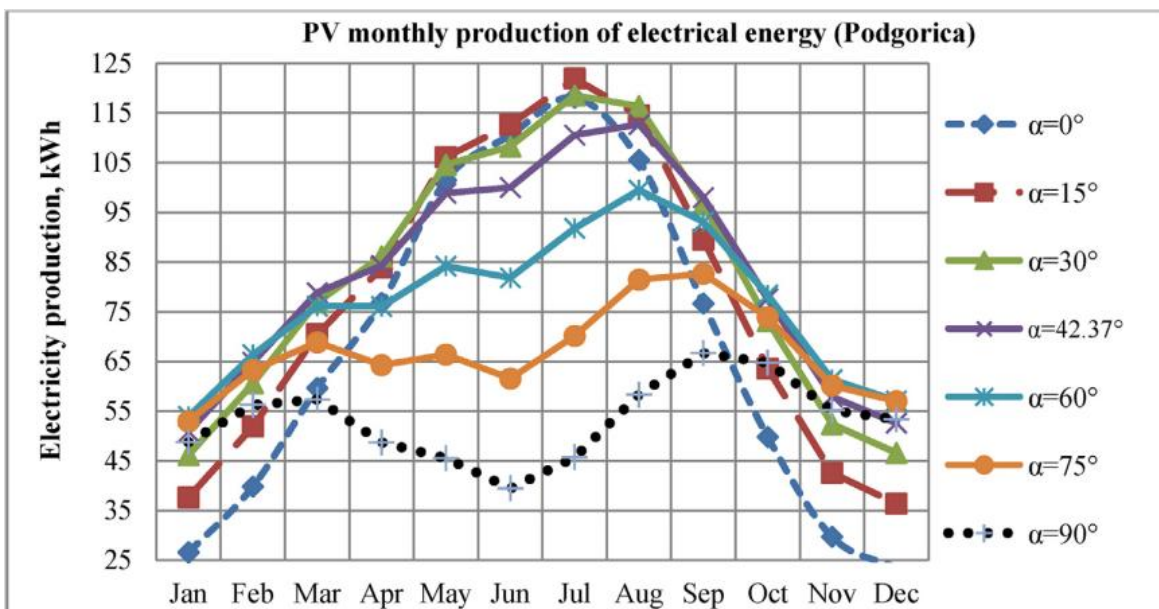
Month	$\alpha=0^\circ$	$\alpha=15^\circ$	$\alpha=30^\circ$	$\alpha=42.37^\circ$	$\alpha=60^\circ$	$\alpha=75^\circ$	$\alpha=90^\circ$
Jan	26.58	37.66	46.13	50.88	53.91	52.95	48.78
Feb	39.82	51.93	60.58	64.89	66.37	63.26	56.28
Mar	59.65	70.49	76.95	78.86	76.12	68.86	57.35
Apr	76.76	83.91	86.15	84.31	76.08	64.26	48.71
May	101.48	106.14	104.59	98.86	84.19	66.40	45.55
Jun	110.57	112.71	108.26	100.02	81.85	61.57	39.47
Jul	118.10	121.94	118.53	110.57	91.79	70.15	45.68
Aug	105.52	114.48	116.39	112.70	99.49	81.47	58.35
Sep	76.68	89.49	96.56	97.99	93.11	82.65	66.68
Oct	49.79	63.58	73.15	77.61	78.40	73.88	64.76
Nov	29.71	42.56	52.39	57.88	61.35	60.14	55.17
Dec	23.48	36.38	46.59	52.60	57.08	57.00	53.35
TOTAL	818.1	931.27	986.25	987.16	919.74	802.61	640.11

Tabela 3.4.2.2 Mjesečna proizvodnja električne energije (kWh) PV modula za različito α°
(Changsha)

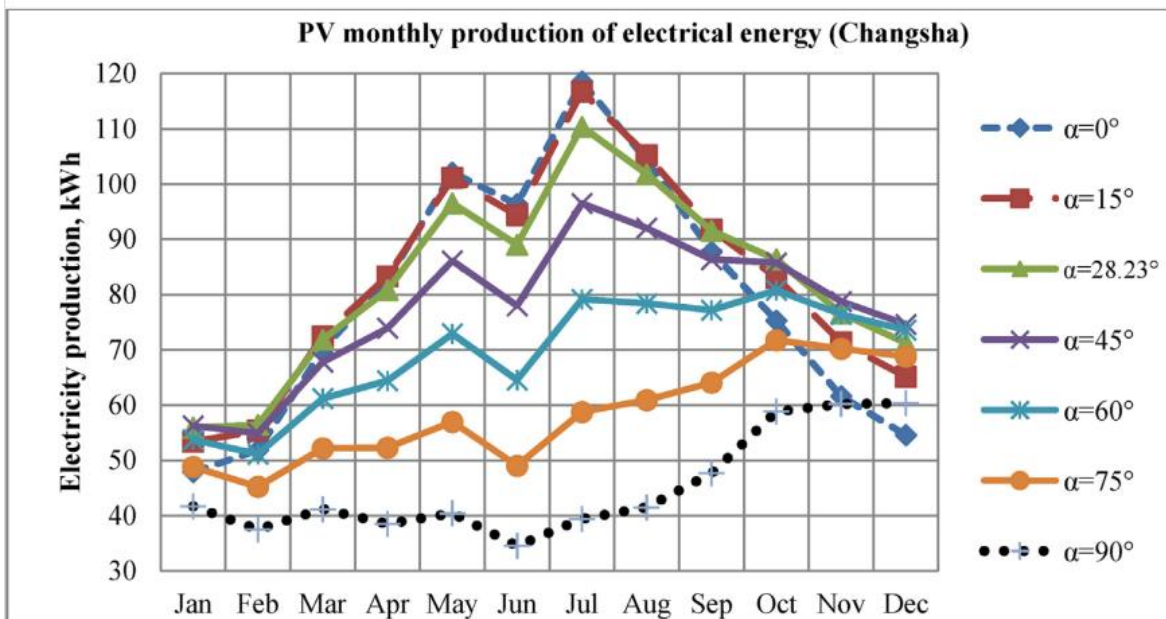
Month	$\alpha=0^\circ$	$\alpha=15^\circ$	$\alpha=28.23^\circ$	$\alpha=45^\circ$	$\alpha=60^\circ$	$\alpha=75^\circ$	$\alpha=90^\circ$
Jan	47.92	53.39	55.97	56.25	53.76	48.84	41.72
Feb	51.88	55.42	56.41	54.93	51.13	45.23	37.52
Mar	70.15	72.48	71.88	67.79	61.21	52.2	41.22
Apr	82.68	83.35	80.87	73.93	64.43	52.31	38.55
May	102.09	101.15	96.55	86.14	72.92	56.98	40.45
Jun	96.38	94.38	89.03	77.99	64.57	49.04	34.54
Jul	118.57	116.75	110.39	96.51	79.16	58.77	39.42
Aug	104.28	105.26	101.83	92.04	78.42	60.92	41.52
Sep	87.75	91.81	91.58	86.36	77.19	64.09	47.7
Oct	75.3	83.14	86.4	85.78	80.8	71.76	58.85
Nov	61.62	71.39	76.64	78.78	76.45	70.22	60.23
Dec	54.59	65.15	71.24	74.63	73.59	68.8	60.38
TOTAL	953.21	993.67	988.79	931.13	833.63	699.16	542.1

Iz tabela se zaključuje da se optimalni uglovi nagiba α° PV modula (pri kojima je maksimalna mjesečna proizvodnja električne energije) mijenjaju u vremenu, tj. zavise od mjeseca u godini, a to znači da bi trebalo podešavati ugao α jednak optimalnom na mjesečnom nivou. Iz Tabele 3.4.2.1 za Podgoricu zaključuje se da optimalni ugao nagiba od januara do jula opada od 60° do 15° . Suprotno, od jula do decembra, optimalni ugao nagiba raste od 15° do 60° . Slična pojava se zapaža za grad Changsha kao što je dato u Tabeli 3.4.2.2. Od januara do maja optimalni ugao opada od 45° do 0° , a od jula do decembra raste od 0° do 45° . U ljetnjim mjesecima, kada je Sunce visoko pozicionirano (Sl.3.4.2), optimalni uglovi nagiba α i upadni uglovi direktnih sunčevih zraka β su mali, čime komponenta $N=D \cos\beta$ raste. Suprotno u zimskim mjesecima povećanje komponente N vrši se na račun povećanja ugla α . Iz Tabele 3.4.2.1 se vidi da je najveća mjesečna proizvodnja električne energije u Podgorici (121.94 kWh) generisana pri uglu $\alpha=15^\circ$ u julu mjesecu. Na osnovu navedene analize, za svaki mjesec u toku godine može se odrediti optimalni ugao nagiba α PV modula za gradove Podgoricu i Changsha, pri kome je maksimalno mjesečno generisanje električne energije.

Najvažniji slučaj za analizu u ovom dijelu rada je ugao nagiba $\alpha=90^\circ$. Sa dijagrama na Sl.3.4.2.1a,b, pri vertikalnom položaju PV modula ($\alpha=90^\circ$), vidi se da je najveća mjesečna proizvodnja električne energije u Podgorici i Changsha za čitavu razmatranu godinu u toku mjeseci oktobra, novembra i decembra, tj. da je veća nego u maju, junu i julu. Mada na prvi pogled paradoksalno, ove činjenice se objašnjavaju pozicijom Sunca u toku ljetnjih i zimskih mjeseci (Sl.3.4.2a,b) i prethodno datim zaključcima u kojima je naglašeno da je u toku ljetnjeg perioda normalna komponenta direktne iradijacije N manja od njene vrijednosti u toku zimskih mjeseci (ugao β je veći ljeti nego zimi). Zato je proizvodnja električne energije za $\alpha=90^\circ$ u Podgorici najmanja u junu (39.4 kWh), tj. manja nego u januaru (48.7 kWh). Slično važi i za Changsha, gdje je proizvodnja najmanja u junu (34.5 kWh), tj. manja nego u januaru (41.7 kWh).



a) city of Podgorica (Montenegro)



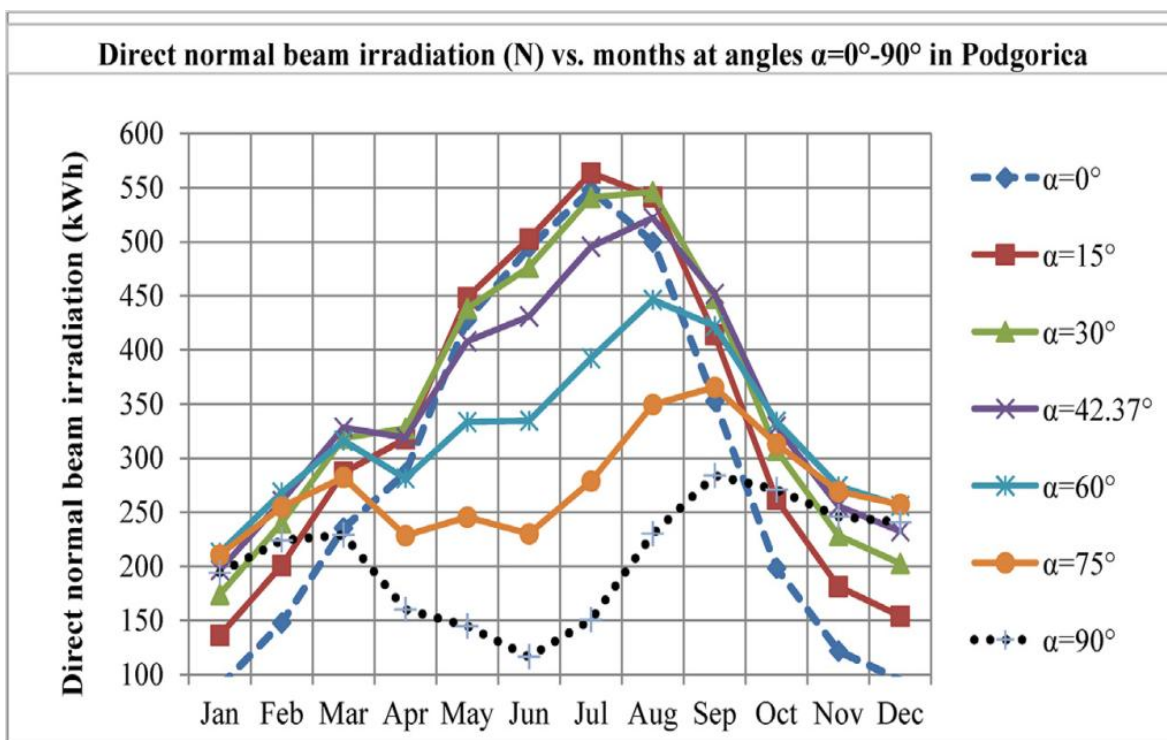
b) city of Changsha (China)

Sl. 3.4.2.1 Mjesečna proizvodnja električne energije PV modula u funkciji različitih uglova nagiba α za a) Podgoricu (Crna Gora), b) Changsha (Kina)

Iz Tabele 3.4.2.1 (za Podgoricu) se vidi da se pri uglu nagiba $\alpha=90^\circ$, za ukupni period od 12 mjeseci, redukuje srednja proizvedena električna snaga, u odnosu na snagu pri

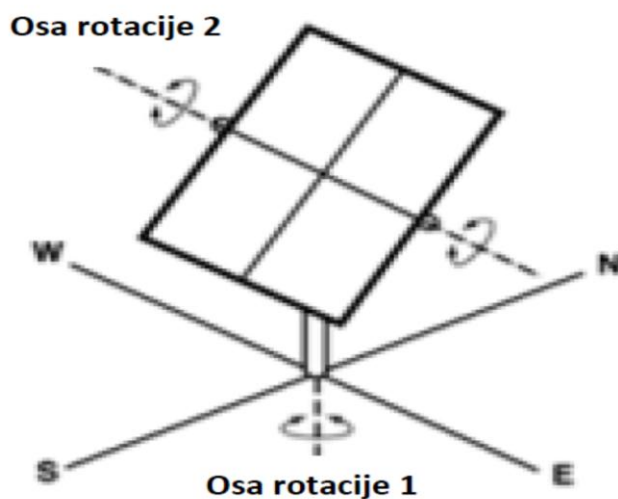
$\alpha = 42.37^\circ$, za 35% ($=1 - (640.11/986.25)$ %). Za Changsha (Tabela 3.4.2.1) redukcija generisane snage PV modula, u toku 12 mjeseci, je još drastičnije izražena: pri $\alpha = 90^\circ$ u odnosu na optimalni ugao $\alpha = 28.23^\circ$, redukcija iznosi 45.2 % ($=1 - 542.1/988.79$ %).

Na Sl.3.4.2.2 dati su dijagrami realnih vrijednosti normalne komponente solarne iradijacije za Podgoricu, koje su na raspolaganju u datotekama SAM softvera. Sa dijagrama je očigledno da se u toku ljetnjeg perioda ima porast komponente N u opsegu $\alpha = 0^\circ \div 42.37^\circ$ i njen pad u opsegu $\alpha = 60^\circ \div 90^\circ$ (iz navedenih razloga). Poredeći dijagrame na sl. 3.4.2.1a i 3.4.2.2 zapaža se da su krive na dijagramima vrlo slične, odnosno da dijagrami proizvedene električne energije prate po obliku dijagrame komponente N. Naravno, proizvedena električna energija je sa nižim vrijednostima kWh zbog niskog stepena iskorišćenja PV modula. Ova činjenica ukazuje da proizvodnja električne energije zavisi najviše od veličine komponente N. U isto vrijeme to potvrđuje zaključak da je uticaj radne temperature PV ćelija, odn. modula, na njihovu proizvodnju električne energije zanemarljiv.



Sl. 3.4.2.2 Nomalna komponenta direktne iradijacije (kWh) u funkciji mjesečnih intervala (Podgorica)

Slično prethodnoj analizi nalaženja fiksnog optimalnog ugla nagiba α na nivou godine ili mjeseca, mogla bi se izvršiti i analiza nalaženja optimalnog ugla nagiba na nivou dana ili časova u toku dana (datoteke se snabdijevaju podacima u sekvencama od 1h). Danas postoje tehnički sistemi za automatsko kontinuirano praćenje položaja Sunca i zavisno od toga podešavanje položaja i orijentacije PV modula kojim se kontinuirano prati položaj Sunca na nebu (tzv. Tracking System). Oni automatski podešavaju položaj PV modula, tako da je komponenta N maksimalna, odn. sunčevi zraci normalni na površinu modula. Time se obezbjeđuje optimalan položaj površine modula u odnosu na sunčeve zrake, odn. maksimalna proizvodnja električne energije. Takav sistem je prikazan na Sl.3.4.2.3 sa dvije ose rotacije [53,54]. Kontinuirano praćenje dnevnog položaja Sunca na nebu se vrši preko ose rotacije 1, čime se vrši rotiranje PV modula od istoka (u jutarnjim časovima) prema zapadu (u popodnevnim časovima). Ose rotacije 2 podešava se položaj PV modula u smjeru sjever-jug da bi se pratilo sezonsko kretanje Sunca tokom godine. Naravno da su ovakvi sistemi najefikasniji i da omogućavaju da PV moduli kontinuirano generišu maksimalnu količinu električne energije. Sa druge strane oni su i najskuplji, jer sadrže složene automatske sisteme (motore, senzore,...) koji su skupi, pa se postavlja pitanje isplativosti investicije, odn. vremena za koje će se investicija isplatiti. Sistem SAM omogućava analizu proizvodnje električne energije i sa sistemom prikazanim na Sl.3.4.2.1.



Sl. 3.4.2.3 Sistem za praćenje položaja Sunca sa dvije ose rotacije (Izvor [53,54])

3.5 Analiza uticaja radne temperature PV modula na njegov stepen korisnog dejstva i veličinu generisane električne energije

PV moduli (fotonaponske ćelije) izloženi sunčevoj svjetlosti pretvaraju samo dio svjetlosne energije u električnu energiju, dio svjetlosti se reflektuje, a dio prelazi u toplotu koja zagrijava modul. Dio solarne energije koji prelazi u električnu definiše se faktorom korisnog dejstva η koji je količnik proizvedene električne i ukupne solarne energije kojoj je izložen modul.. Tipične vrijednosti su $\eta = (10-15) \%$ za PV komercijalne module dok je za visokokvalitetne module $\eta > 20 \%$.

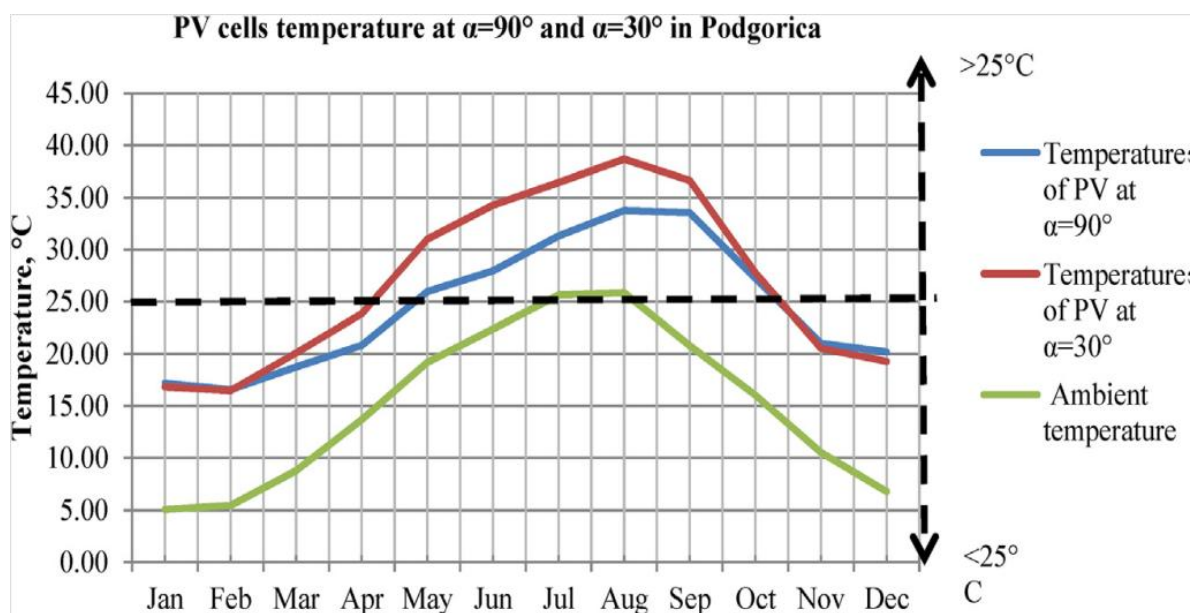
Dio svjetlosti se reflektuje (radi smanjenja refleksije koriste se protivrefleksni prozirni slojevi na ćelijama), a dio se pretvara u toplotu koja zagrijava PV modul, odn. povećava mu radnu temperaturu. Usljed povećanja radne temperature PV modula dolazi do smanjenja njegove efikasnosti u generisanju električne energije, odn. dolazi do pada stepena korisnog dejstva η [68,69]. Koeficijent korisnog dejstva i izlazna električna snaga linearno opadaju sa porastom radne temperature PV modula [70].

U ovom dijelu disertacije je analiziran uticaj radne temperature PV modula na njegove karakteristike. U razmatranje su uzete ćelije monokristala silicijuma SunPower koje su korišćene u prethodnim simulacijama [71]. Podaci za PV modul "SunPower SPR-X21-335", korišćen u prethodnim simulacijama u SAM softveru, su dati u Tabeli 3.4.3.1.

Tabela 3.4.3.1 Podaci za PV modul "SunPower SPR-X21-335"

	Value
Nominal efficiency	20.5521 %
Maximum power	335.205 Wdc (2 modules: 670.41Wdc)
Temperature coefficient	-0.31 %/°C or -1.039 W/°C
Nominal temperature	25 °C
Total irradiance	1000 W

Promjena radne temperature razmatranog PV modula na mjesečnom intervalu, uzimajući u obzir sve faktore uticaja koji su na raspolaganju u datotekama SAM softvera (vremenske prilike uključujući ambijentalnu temperaturu, sunčevo zračenje, vjetar, tip ćelije, itd) data je na Sl. 3.4.3.1. Pri simulaciji su razmatrana dva različita ugla $\alpha=30^\circ$ i $\alpha=90^\circ$ za grad Podgoricu.



Sl. 3.4.3.1 Promjena radne temperature PV ćelija u toku mjeseci, za $\alpha=30^\circ$ i $\alpha=90^\circ$ za grad Podgoricu

Sa dijagrama na Sl.3.4.3.1 jasno je da na radnu temperaturu najviše utiče ambijentalna temperatura. Kako su ambijentalne temperature najviše ljeti, to su u tom periodu najveće i radne temperature. Na radne temperature osim ambijentalnih temperatura utiče i jačina struje koja teče kroz fotonaponsku ćeliju, tj. sa povećanjem struje raste i radna temperatura.

Uticaj radne temperature na karakteristike PV modula može biti određen preko temperaturnog koeficijenta datog u Tabeli 3.4.3.1. On se odnosi na maksimalnu snagu modula, odn. panela. On definiše koliko snaga modula ili panela opada kada radna

temperatura poraste za 1°C iznad nivoa od 25°C . Za razmatrani modul temperaturni koeficijent je: $-1.039\text{ W}/^{\circ}\text{C}$ (odn. $-0.31\text{ \%}/^{\circ}\text{C}$). To znači da za svaki stepen porasta radne temperature PV modula iznad 25°C , maksimalna snaga PV modula "SunPower SPR-X21-335" opada za $1.039\text{ W}/^{\circ}\text{C}$. Kako su u pitanju dva paralelno vezana modula pad snage je dvostruko veći, tj. iznosi $2.078\text{ W}/^{\circ}\text{C}$. Temperatura PV modula za Podgoricu, pri $\alpha=30^{\circ}$, varira u opsegu od 17°C do 38°C (Sl.3.4.3.1). Pri porastu temperature od 25°C do 38°C pad električne snage za oba modula će biti $13 \cdot 2.078\text{ W} = 27.01\text{ W}$, što čini 4% od ukupne snage 670.41 W oba modula. Suprotno, ako postoji pad radne temperature PV modula od 25°C do 17°C porast ukupne snage oba PV modula će biti 16.6 W . Sa porastom radne temperature PV modula iznad 25°C generisana električna snaga modula, odn. koeficijent korisnog dejstva opada, dok se pri padu radne temperature ispod 25°C javlja suprotan efekat. Slični rezultati su dobijeni i za grad Changsha, sa manjim padom snage usljed manjih varijacija temperature u toku godine. Tokom godine, u dobrom dijelu klimatskih područja, gubici i dobici na snazi usljed promjena ambijentalnih temperatura će biti izjednačeni. To je u slučaju Podgorice i Changsha, gdje su radne temperature u toku skoro pola godine ispod 25°C .

Takođe sa slike 3.4.3.1 se uočava da radna temperatura PV modula raste približno 4°C kada ugao nagiba α opadne sa 90° na 30° . Povećanje radne temperature pri $\alpha=30^{\circ}$ u odnosu na $\alpha=90^{\circ}$ nastaje usljed veće generisane električne snage, odn. struje fotoćelije. U tom slučaju promjena ugla nagiba sa 90° na 30° dovodi do redukcije izlazne snage $4 \cdot 2.078\text{ W}$, odn. do redukcije ukupne snage oba modula za svega 1.24%. Takav pad snage je zanemarljiv u odnosu na činjenicu da se pri uglu nagiba $\alpha=90^{\circ}$, u toku 12 mjeseci, redukuje srednja proizvedena električna snaga u odnosu na snagu pri $\alpha=30^{\circ}$ za 35% (Podgorica), odn. 45.2% (Changsha). Stoga, uticaj radne temperature na koeficijent korisnog dejstva i generisanu električnu snagu na izlazu PV modula, u razmatranom slučaju može biti zanemarena u odnosu na uticaj upadnog ugla sunčevih zraka β , odn. na ugao nagiba PV modula α .

Primjena PV modula u Trombovom zidu zahtijeva ugao nagiba od 90° . Pod tim uglom nagiba redukovana je srednja godišnja proizvodnja električne energije za 35% u odnosu na optimalni ugao nagiba 42.37° za Podgoricu. Za slučaj grada Changsha (Kina) ta redukcija iznosi 45.8%. Na osnovu toga jasno je da je primjena PV modula u Trombovom zidu, sa aspekta stepena iskorišćenja PV modula, sa niskom energetsom efikasnošću, odn. ona je neracionalna. Stoga je i sa ekonomskog aspekta, investicija u ugradnju PV modula u Trombov zid, bitno manje isplativa u odnosu na slučaj kada se PV koristi pod optimalnim ili bliskim optimalnom uglu nagiba.

3.6 Zaključak

U poglavlju 3. data je analiza karakteristika Trombovog zida, posebno njegovog tipa koji uključuje PV module i po kojima se naziva PV-Trombov zid. Električna energija proizvedena putem PV panela, integrisanih u PV-Trombov zid, je analizirana putem System Advisor Model (SAM) softvera. Izborom lokacije panela, tj. mjesta, grada, gdje je on lociran, izabrani su automatski i fajlovi sa realnim parametrima klimatskih, vremenskih prilika za tu lokaciju (solarna iradijacija, temperatura ambijenta, vjetar, itd.) kojima se datoteke SAM-a snabdijevaju u vremenskim sekvencama od 1h. Pri simulaciji i proračunu su uzeti u obzir i drugi relevantni podaci iz datoteka SAM-a koji se odnose na PV modul (konkretni izabrani tip PV modula, odn. panela, sa odgovarajućim kataloškim parametrima, uglovi nagiba PV, radne temperature PV modula, itd.).

Posebno je analiziran uticaj ugla nagiba α PV modula prema horizontalnom tlu, s obzirom da su PV moduli u Trombovom zidu u vertikalnom položaju. Detaljna analiza, koja je uključila i dvije različite lokacije (gradove Podgoricu i Changsha) pokazala je da primjena PV modula u Trombovom zidu, što zahtijeva njihov vertikalni položaj, nije opravdana sa aspekta proizvodnje električne energije, tj stepena iskorišćenja PV modula. U tom slučaju stepeni iskorišćenja PV modula iznose svega 65% i 54.8% u odnosu na pozicioniranje sa optimalnim uglovima nagiba, za ispitivane gradove Podgoricu i

Changsha, respektivno. Sa aspekta veće proizvodnje električne energije korisnije je instalirati PV module ne u Trombovom zidu, nego na drugom mjestu van Trombovog zida, obezbjeđujući optimalan ugao nagiba. Pored navedenog izvedeni su sljedeći zaključci [72]:

- Optimalni fiksni ugao nagiba PV modula, pri kome je najveća srednja godišnja vrijednost generisane električne energije, odgovara uglu geografske širine razmatrane lokacije. Kada je u pitanju najveća srednja mjesečna proizvodnja električne energije, optimalna vrijednost ugla nagiba se mijenja po mjesecima, zavisno od realnih vremenskih prilika tokom razmatranih mjeseci.
- Generisanje električne energije u fotonaponskim ćelijama, odn. PV modulima, zavisi od veličine normalne komponente sunčeve radijacije N . Komponenta N zavisi od upadnog ugla β sunčevih zraka na površinu modula, koji se mijenja sa uglom nagiba PV modula prema tlu.
- Dokazano je da je uticaj porasta radne temperature PV modula na količinu proizvedene električne energije zanemarljiv u poređenju sa uticajem ugla nagiba PV modula prema tlu.

Sa aspekta poboljšanja energetske efikasnosti Trombovog zida daleko je perspektivniji pravac istraživanja i realizacije Trombovog zida kod koga se konvencionalni termalni zid velike mase zamjenjuje sa PCM termalnim zidom [73], koji može da skladišti čak do 14 puta više toplote po jedinici mase od konvencionalnih materijala. Primjena PCM materijala u konstrukcijama zgrada povećava stepen iskorišćenja eksterne solarne energije i smanjuje korišćenje HVAC (heating, ventilation and air conditioning) sistema. PCM zidovi su male težine i lako se integrišu u nove ili postojeće konstrukcije zgrada. Ovaj perspektivni pravac u poboljšanju performansi energetske efikasne zgrada upravo je predmet izučavanja sljedeće, 4. glave disertacije.

4. UNAPREĐENJE PERFORMANSI ENERGETSKI EFIKASNOG PROJEKTOVANJA EKSPERIMENTALNIM ISTRAŽIVANJIMA PCM MATERIJALA UGRAĐENOG U OMOTAČE GRAĐEVINSKIH OBJEKATA

4.1 Teorijski dio

4.1.1 Akumuliranje toplote u omotačima građevinskih objekata

Aktivno grijanje i hlađenje građevinskih objekata predstavljaju oko 50 procenata energetske potrošnje u Evropi. Naprimjer, u Francuskoj građevinski sektor je odgovoran za oko 45 procenata ukupne energetske potrošnje i za 23 procenta CO₂ emisija na državnom nivou [74]. Stoga je težnja da se u građevinskim objektima redukuje korišćenje energije na bazi fosilnih goriva (prirodni gas, nafta i ugalj) čime bi se redukovala emisija CO₂ gasa, a takođe da se novim metodama gradnje i novim vrstama materijala poveća energetska efikasnost građevinskih objekata, odn. redukuje potrošnja energije u njima.

Fundamentalni principi termodinamike građevinskih objekata zasnivaju se prevashodno na postojanju tzv. toplotne (termalne) mase građevinskih objekata. U skeletu građevinske konstrukcije, građevinski materijali (svaki ponaosob) posjeduju toplotnu ili termalnu masu. Postojeća toplotna masa, skoncentrisana u građevinskom objektu, znatno redukuje temperaturna variranja, povećava toplotni kapacitet konstruktivnih elemenata objekta, ali i cjelokupnog objekta, podiže toplotni komfor prostora, povećava toplotni otpor (termalnu inerciju) objekta i smanjuje energiju potrebnu za pokretanje regulacionih mehanizama grijanja i hlađenja. Veća toplotna masa građevinskih materijala uzrokuje i veći toplotni kapacitet građevinskog objekta tj. veći kapacitet za skladištenje, akumuliranje, toplote unutar tzv. omotača objekta [75].

U ranijem periodu toplotna masa građevinskih konstrukcija je realizovana građenjem masivnih konstrukcija, što se danas smatra prevaziđenim i skupim. Poslednjih decenija, toplotni kapacitet građevinskih objekata se povećava implementacijom savremenih tehnologija i materijala sa sposobnošću akumuliranja latentne toplote i otpuštanja iste unutar građevinskih objekata.

Skladištenje i odavanje toplote u građevinskim materijalima se može odvijati putem senzibilne i latentne toplote. Kada su pitanju klasični građevinski materijali (kamen, beton, granit, cigla,...) dio sunčeve energije koji direktno zagrijava ove materijale, skladišti se u njima u vidu senzibilne toplote. Zbog malih toplotnih kapaciteta ovih materijala uskladištena senzibilna toplota nije značajna. Značajno veći efekat skladištenja toplote postiže se primjenom materijala koji omogućavaju skladištenje latentne toplote. Materijali koji omogućavaju skladištenje latentne toplote su PCM materijali (Phase Change Material - fazno-promjenljivi materijali, tj. materijali koji mijenjaju agregatno stanje). U početnoj fazi zagrijavanja, dok su u čvrstom stanju, skladište senzibilnu, dok u fazi topljenja skladište latentnu toplotu koja je značajno veća od prethodne. Oni mogu da skladište čak do 14 puta više toplote po jedinici mase od konvencionalnih [76].

Već oko 40 godina, naučnici i istraživači osmišljavaju napredniji termički dizajn građevinskih objekata i ispituju načine kako da efikasno uvećaju toplotnu masu građevinskih objekata umetanjem PCM materijala u unutrašnju konfiguraciju omotača građevinskog objekta [77,78,79,80]. PCM materijali su primjenjivani u širokom spektru aplikacija, ali se u građevinarstvu primjenjuju u novije vrijeme zahvaljujući poboljšanju njihovih performansi, a posebno dugovječnosti, odn. postojanosti njihovih karakteristika u dužem periodu eksploatacije. Danas, napredne tehnologije koje se bave omotačem građevinskih objekata predlažu čak da bi širom SAD stambeni objekti mogli biti uskoro rutinski konstruisani sa PCM-om u cilju povećanja efektivnosti toplotne izolacije i održanja niskih stopa implementacije grijanja i hlađenja [81].

Tipični PCM materijali su voskovi, ulja, hidratisane soli, neke vrste alkohola (dodekanol, tetradekanol), mješavine masnih kiselina (kaprinsko-laurinska kiselina,

kaprinsko-palmitinska, ...), parafin kao i brojni drugi. Oni su po prirodi, laki materijali koji značajno ne uvećavaju ni masu ni težinu građevinske konstrukcije. PCM su fazno-promjenljivi materijali, koji podliježu faznim tranzicijama, tj. faznim prelazima (mijenjanju agregatnih stanja) u specifičnim temperaturnim opsezima u zavisnosti od uslova u kojima se nađu, od čega zavisi i njihova konkretna primjena.

Konvencionalni građevinski materijali kao što su gips, beton, cement su najčešće impregnisani svakojakim kompozitima PCM-a: mikroenkapsuliranim PCM-om u polimeričnim ljuskama, PCM-om pomiješanim sa polietilenom, masnim kiselinama i njihovim estrima koji se u novije vrijeme smatraju valjanim PCM kompozitima (kaprinsko-stearinska, palmitinsko-stearinska mješavina masnih kiselina, ...). U građevinskoj praksi, vrši se i inkluzija PCM materijala u beton, najčešće impregnisanjem samog agregata betona, koji kasnije biva pomiješan sa cementom

Primjenom PCM materijala poboljšavaju se toplotne karakteristike građevinskog objekta i smanjuje energetska potrošnja. PCM materijali mogu uskladištiti mnogo više toplote po jedinici mase od nekih uobičajeno korišćenih građevinskih materijala u praksi, zahvaljujući visokom toplotnom kapacitetu $C = \Delta Q / \Delta T$ [J/°C], odn. specifičnom toplotnom kapacitetu $C_p = \Delta Q / (m \Delta T)$ [J/(kg °C)], za skladištenje latentne toplote. S obzirom da su po težini laki materijali, podesni su za ugradnju u lake konstrukcije prilikom gradnje i renoviranja nekog objekta sa ciljem poboljšanja toplotnih karakteristika i smanjenja potrošnje električne energije sistema za grijanje i hlađenje [82].

PCM materijali pripadaju oblasti pasivnog solarnog dizajna zgrada, koji koristi energiju sunca za direktno zagrijavanje materijala u svrhu redukcije grijanja/hlađenja. Kod pasivnih solarnih zgrada, u skladu sa konkretnim klimatskim uslovima, dizajnira se položaj i dimenzije prozora, toplotne mase i toplotna izolacija, efekat sjenčenja, radi povećanja energetske efikasnosti zgrada.. Pasivni solarni sistemi, za razliku od aktivnih fotonaponskih, ne uključuju akumulaciju ili transformaciju energije putem elektronskih ili mehaničkih uređaja.

4.1.2 Način funkcionisanja PCM (fazno-promjenljivih) materijala

Tokom prelaza PCM materijala iz čvrstog u tečno stanje, PCM materijal apsorbira i skladišti energiju u obliku toplote iz okolnog prostora, kada je temperatura okoline veća od temperature topljenja PCM materijala. Obratno, tokom prelaza PCM materijala iz tečnog u čvrsto stanje, toplota biva otpuštena iz PCM materijala u okolni prostor, pri temperaturi okoline koja je niža od temperature solidifikacije (očvršćavanja) PCM materijala. Kvantum toplotne energije koji biva uskladišten ili otpušten tokom faznih prelaza PCM materijala, zove se latentna toplota. Van faznih prelaza, PCM materijal skladišti dominantno senzibilnu toplotu.

PCM materijali mogu egzistirati u sva tri agregatna stanja: čvrstom, tečnom i gasovitom. Kao što je prethodno rečeno, oni su podložni faznim promjenama, tj. prelazima u druga agregatna stanja u specifičnim temperaturnim opsezima tokom kojih skladište dominantno latentnu toplotu. U građevinarstvu se koriste PCM materijali sa ciklusima topljenja i očvršćavanja, dok se materijali sa ciklusom ključanja (pretvaranja tečnosti u gas) ne koriste, jer se radi o toliko visokim temperaturama koje ne vladaju u ambijentu stambenih objekata. Sem toga, cilj je da PCM ima što veću gustinu, kako bi se uskladištilo što više latentne toplote u što manju zapreminu. Dodatna okolnost je da u gasovitom stanju postoji opasnost od paljenja gasa (za PCM materijal parafin tipa OP28E, korišćen u eksperimentalnim PCM kuglicama, temperatura paljenja iznosi 165°C).

Pri procesu skladištenja toplote putem senzibilne toplote (koji prethodi početku fazne tranzicije PCM materijala i traje sve dok je temperatura PCM materijala niža od temperature topljenja) materijal apsorbira toplotu od spoljnog tijela (ambijenta) koje je na višoj temperaturi, pri čemu temperatura materijala raste (Sl.4.1.2.1). Obratno, kada je temperatura materijala viša od temperature ambijenta, materijal odaje senzibilnu toplotu, uz sniženje temperature materijala. Energija u obliku senzibilne toplote, koja se uskladišti ili

akumulira po jedinici mase fizičkog tijela, izražava se kao proizvod specifične toplote C_p fizičkog tijela i promjene temperature (T_2-T_1) [81]:

$$\Delta E_{m,sens} = C_p (T_2-T_1) \text{ [J/kg]} \quad (4.1)$$

$$\Delta Q_{sens} = m \Delta E_{m,sens} = m C_p (T_2-T_1) \text{ [J]} \quad (4.2)$$

gdje je:

$C_p = \Delta Q / (m \Delta T)$ [J/(kg °C)] - specifični toplotni kapacitet ili specifična toplota materijala, odn. toplota koja je potrebna da se jednom kilogramu tog materijala povisi temperatura za 1°C.

$\Delta T = T_2 - T_1$ (°C) - porast temperature materijala u toku zagrijavanja

S obzirom da je C_p malo to je i uskladištena senzibilna toplota mala, a PCM materijal se ponaša kao obični materijal, tj. preuzimanjem toplote njegova temperatura raste sa temperaturom ambijenta..

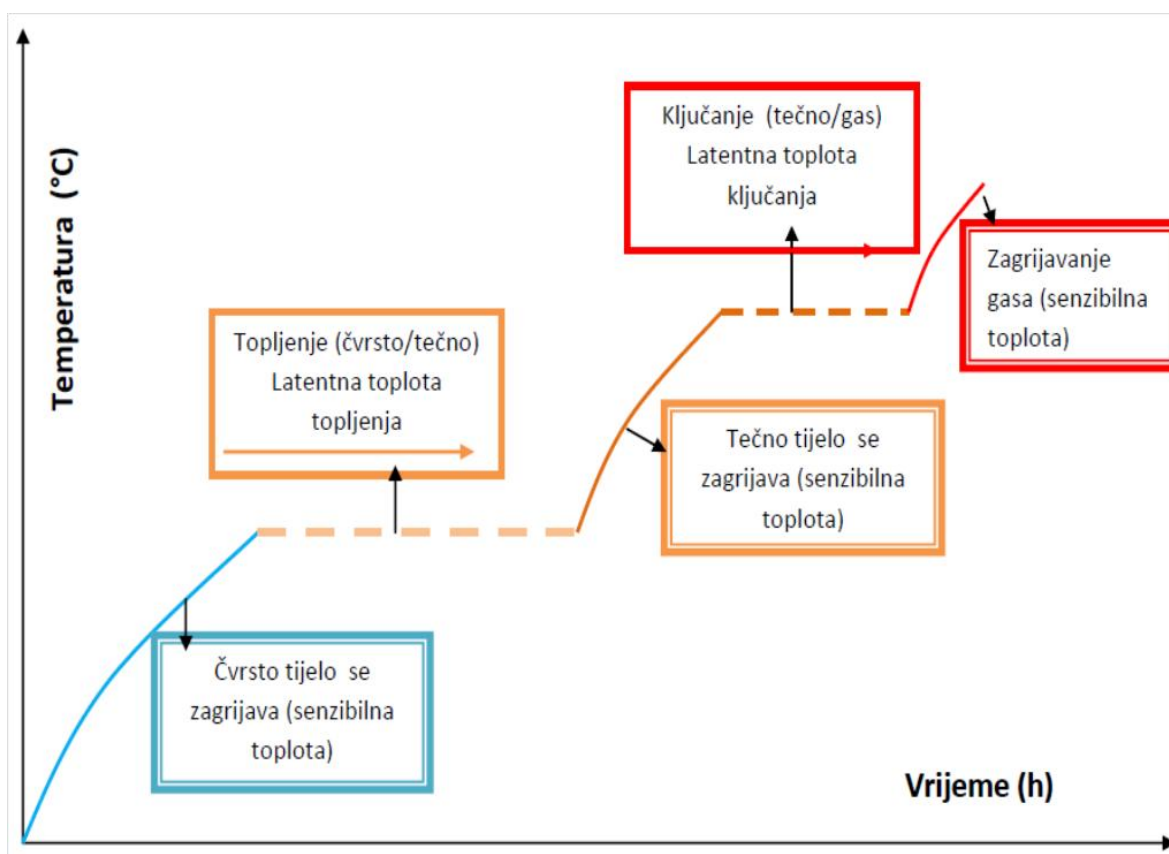
Kod drugog načina skladištenja toplote, karakterističnog za PCM materijale, akumulacija toplote (tzv. latentna toplota) se vrši tokom promjene faznog, agregatnog stanja, odn. pri prelasku iz čvrstog u tečno ili tečnog u gasovito stanje pri konstantnoj temperaturi PCM materijala (Sl.4.1.2.1). Energija u obliku latentne toplote, koja se uskladišti po jedinici mase fizičkog tijela, izražava se kao promjena entalpije u toku fazne transformacije tog fizičkog tijela.

$$\Delta E_{m,latent} = \Delta H_{latent} = \int C_p \partial T \text{ [J/kg]} \quad (4.3)$$

$$\Delta Q_{latent} = m \Delta E_{m,latent} = m \Delta H_{latent} \text{ [J]} \quad (4.4)$$

Količina akumulirane latentne toplote tokom topljenja je velika jer je veliko C_p . Velika vrednost C_p proističe iz činjenice da je tokom topljenja temperatura PCM konstantna (ili realno malo se mijenja) pa je potrebna velika količina toplote da se jednom kilogramu materijala povisi temperatura za 1°C. Najveća akumulacija latentne toplote je u trenucima najveće promjene entalpije (4.4).

U reverzibilnom režimu, pri sniženju temperature ambijenta, vrši se prelazak iz gasovitog u tečno (kondenzacija), odn. tečnog u čvrsto stanje (solidifikacija, očvršćavanje), kada se prethodno akumulirana latentna toplota odaje spoljnoj sredini takođe uz konstantnu temperaturu PCM (Sl.4.1.2.1). Procesi topljenja i ključanja (isparavanja) su endotermni (PCM apsorbuje energiju), a procesi kondenzacije i solidifikacije egzotermni (PCM odaje energiju). Za idealne PCM materijale navedeni procesi se odvijaju pri konstantnim temperaturama, koje zavise od vrste PCM materijala, pa se stoga nazivaju izotermalni procesi.



Sl.4.1.2.1 Šematski prikaz režima senzibilne i latentne toplote PCM materijala

Za primjenu u građevinskim objektima od značaja su režim topljenja kada se vrši skladištenje latentne toplote i režim solidifikacije (očvršćavanja) u toku koga se otpušta prethodno akumulirana latentna toplota. Pri adekvatnom projektovanju i inkorporiranju

PCM materijala u objektu ovi režimi se odlikuju pravilno ponovljenim, naizmjeničnim termičkim ciklusima topljenja i očvršćavanja.

Tokom procesa topljenja PCM materijala tj. faznog prelaza iz čvrstog u tečno agregatno stanje, temperatura realno nije konstantna, kao što je to idealizovano prikazano na Sl.4.1.2.1. Tokom procesa topljenja PCM materijala tj. faznog prelaza iz čvrstog u tečno agregatno stanje, mogu se uočiti tri etape odvijanja topljenja.

U prvoj etapi procesa topljenja PCM materijala, PCM materijal je inicijalno u čvrstom stanju i posjeduje stabilnu kristalnu rešetku molekula u svojoj unutrašnjoj strukturi. Kako se PCM materijal u toku vremena zagrijava, njegova temperatura raste linearno sa porastom entalpije procesa. Specifična toplota PCM materijala je tada skoro konstantna do uspostavljanja njegove konstantne temperaturne vrijednosti, na kojoj započinje fazni prelaz. Ta temperaturna vrijednost, na kojoj započinje fazni prelaz, je donja granična vrijednost temperaturnog opsega fazne transformacije (topljenja).

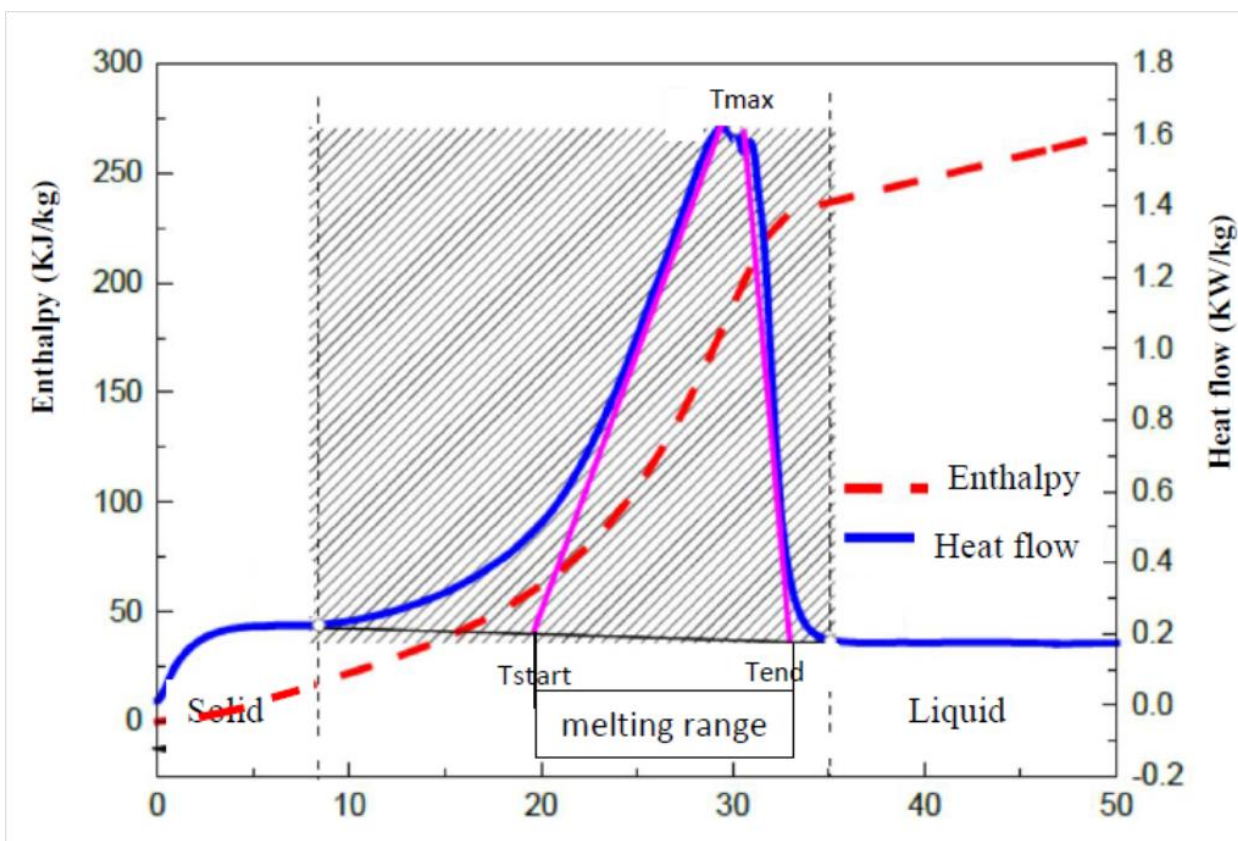
Drugu etapu procesa topljenja karakteriše sam fazni prelaz iz čvrstog u tečno agregatno stanje. Tokom topljenja, temperatura PCM materijala nastavlja da raste, ali temperatura mnogo manje raste, kako se apsorbuje veća količina energije. Tj. veći je kvantum energije koji PCM materijal upija iz okoline, nego linearni porast temperature. U faznom prelazu, PCM akumulira tzv. latentnu toplotu i preovladava latentna toplota. Prisutan je i nagli skok u specifičnoj toploti PCM materijala. Takođe se može uočiti peak temperature point, što odgovara maksimalnoj temperaturi topljenja.

U trećoj etapi procesa topljenja, PCM materijal biva do kraja istopljen. Njegova temperatura nastavlja da raste kako mu se dodaje više toplote. Specifična toplota PCM materijala je opet skoro konstantna.

Fazu topljenja ćemo prikazati na primjeru PCM parafinskog materijala OP28E, koji se nalazi unutar plastičnih kuglica, a koje su korištene u eksperimentu. Toplotne karakteristike date od proizvođača za OP28E su date u Tabeli 4.1.2.1, a DSC (Differential Scanning Calorimeter) toplotne karakteristike na Sl.4.1.2.2.

Tabela.4.1.2.1 Toplotne karakteristike OP28E

Toplotne karakteristike OP28E	Vrednost
Temperatura maksimalno intenzivnog topljenja [°C]	27-29
Entalpija [kJ/kg]	245
Gustina u čvrstom stanju [kg/m ³]	0.88
Gustina u tečnom stanju [kg/m ³]	0.77
Specifična toplota [kJ/kg °C]	2
Toplotna provodnost [W/m °C]	0.2
Širenje po zapremini [%]	12.5
Temperatura paljenja [°C]	165



SI.4.1.2.2 DSC toplotne karakteristike OP28E

Temperatura fazne promjene ima tri karakteristične veličine (Sl.4.1.2.2): temperaturu na kojoj počinje proces topljenja sa akumulacijom latentne toplote (T_{start}), temperaturu najintenzivnijeg topljenja pri kojoj je maksimalna akumulacija latentne toplote (T_{max}) i temperaturu sa kojom se završava proces topljenja sa akumulacijom latentne toplote (T_{end}). Ove vrijednosti su za slučaj OP28E: $T_{start}=20^{\circ}\text{C}$, $T_{end}=33.25^{\circ}\text{C}$, $T_{max}=29.05^{\circ}\text{C}$. Opseg temperatura topljenja je $\Delta T=(20-33.25)^{\circ}\text{C}$, pri čemu se korespondentne entalpije mijenjaju u opsegu 59.17-233.07 (kJ/kg). U tom opsegu se vrši prelazak iz čvrstog u tečno stanje, a PCM materijal prolazi kroz faze polučvrstog, kašastog stanja (mushy region) dok se ne istopi. Maksimalna akumulacija latentne toplote i najintenzivnije topljenje je pri $T_{max}=29.05^{\circ}\text{C}$ (Sl.4.1.2.2), odn. prema podacima proizvođača (Tabela 4.1.2.1) pri $\Delta T=(27-29)^{\circ}\text{C}$. Pri $T_{max}=29.05^{\circ}\text{C}$ je maksimalan priraštaj entalpije $\Delta H_{latentno}$ što odgovara maksimalnoj akumulaciji latentne toplote $\Delta Q_{latentno}$, odn. najvećem transferu toplote (Heat flow) iz okoline u PCM materijal (Sl.4.1.2.2).

Prelaskom iz čvrstog u tečno stanje akumulira se toplotna energija u PCM materijalu, na bazi povećanja kinetičke energije, tj intenziteta kretanja molekula i atoma tog materijala. U idealnom slučaju, kada je idealno čist PCM materijal, temperatura je konstantna u intervalu topljenja. Međutim za realne PCM materijale, kao što je parafin OP28E korišćen u eksperimentu, kako se ne radi o idealno čistom PCM materijalu opseg temperatura topljenja je $(20-33.25)^{\circ}\text{C}$, u okviru koga se vrši prelazak iz čvrstog u tečno stanje. To produžava vrijeme topljenja PCM materijala koji prolazi kroz faze polučvrstog, kašastog stanja sve dok se ne istopi. To produženo vrijeme topljenja pogoduje s obzirom da se u toku njega odgađa prekomjerni porast temperature prostorije. Analogno važi i za vrijeme solidifikacije. Za PCM materijal je bitno da je proces topljenja završen (u toku dana), kako bi se akumulirala kompletna latentna toplota u njemu. Ta toplota, tokom sljedećeg ciklusa hlađenja (u toku noći), spremna je da se otpusti tokom solidifikacije i to u punom iznosu ako je proces solidifikacije završen.

Krucijalna prednost PCM materijala je što je u toku procesa fazne, agregatne promjene, njihova temperatura konstantna ili u nekom pogodnom temperaturnom opsegu,

čime se reguliše temperatura prostorije i smanjuje potreba za dodatnim angažovanjem sistema grijanja i hlađenja.

PCM materijali ukoliko su u spoljnom omotaču građevinskog objekta preuzimaju toplotnu energiju solarnog spoljnog zračenja, redukujući temperaturu unutrašnjeg prostora. Ukoliko se koriste unutar objekata, tj. prostorija, obično sa smještaju u kasetu koja je ugrađena u plafonsku ploču ili zid i imaju sličnu ulogu kamena ili betona kao termalnih masa, ali sa daleko većim toplotnim kapacitetom, tj. akumuliranom/odatom količinom toplote. Rastom temperature tokom dana, toplota se apsorbuje u materijalu, što doprinosi održavanju niže temperature u prostoru. Tokom noći ili hladnih dana, kada temperatura padne ispod temperature PCM materijala, odaje se toplota u prostoriju, čime se PCM materijal vraća, resetuje, na početno stanje, spreman za sljedeći dvadesetčetvoročasovni ciklus [82]. Naravno isti PCM materijal neće biti jednako efikasan za različita klimatska područja.

4.1.3 Vrste PCM materijala

PCM materijali trebaju da posjeduju sledeće karakteristike, koje ih čine adekvatnim za upotrebu u omotaču zgrade [81]:

- 1) visoku latentnu toplotu topljenja;
- 2) tranzitne temperature u poželjnom opsegu;
- 3) visoku toplotnu provodljivost;
- 4) visoku specifičnu toplotu c_p i gustinu;
- 5) pouzdanost i sigurnost, stabilnost karakteristika pri velikom broju ponovljenih ciklusa;
- 6) nezapaljivost;
- 7) nisku promjenu zapremine tokom faznih prelaza;
- 8) netoksičnost;
- 9) ne smiju imati neželjene efekte poput efekta superhlađenja;

10) ekološki podobni.

PCM materijali mogu biti organskog tipa, neorganskog tipa kao i eutektičnog tipa (smješa različitih materijala). U građevinarstvu se koriste dva osnovna tipa PCM materijala: organski parafin ili masne kiseline i neorganske soli (hidrati), pri čemu obje vrste materijala imaju svoje prednosti i nedostatke od kojih zavisi namjena.

Veliki broj PCM materijala je dostupan u industriji, sa različitim temperaturama topljenja od -33°C do 800°C .

4.1.3.1 Neorganski PCM materijali

U neorganske PCM materijale ubrajaju se: hidratizane soli, rastopljene soli, metali i legure metala. Kalcijum-hlorid heksahidrat (hidratizana so) se preporučuje za implementaciju u građevinskim objektima, tj. u građevinskom sektoru. Hidratizane soli kao neorganski PCM materijali imaju i poželjna i nepoželjna svojstva za ugradnju u konstrukcije. Poželjna svojstva Hidratizane soli kao neorganski PCM materijala imaju dobra svojstva: visoka latentna toplota topljenja, velika gustina, veliki koeficijent toplotne provodljivosti, nezapaljivost, relativno niska cijena i njihova komercijalna dostupnost. Nepoželjna svojstva hidratizanih soli su pojava rđanja tj.korozije u kontaktu sa nekim metalima. Tako se hidratizane soli, radi preventive korozije, stavljaju u kontejnere od aluminijuma, koji su obmotani i presvučeni plastikom ili nerđajućim čelikom. Jedna od mana hidratizanih soli kao PCM materijala je i higroskopnost, (upijanje vlage) kada su izložene vlažnom ambijentalnom vazduhu. Takođe, u hidratizanim solima može se ispoljiti efekat superhlađenja, tj. poremećaj u solidifikaciji ovih PCM materijala. Usljed ovog efekta snižava se temperatura solidifikacije do temperature na koju se materijal neće ohladiti, pa samim ti postaje neupotrebljiv. Da bi se spriječio ovakav efekat u hidratizanim solima, dodaje im se hemikalija tj. nuklearni agens kao što je stroncijum-hlorid heksahidrat.

Temperature topljenja hidratiranih soli mogu biti u opsegu od nekoliko stepeni celzijusa do preko stotinu stepeni celzijusa. U Tabeli 4.1.3.1 dati su primjeri neorganskih PCM materijala (hidratiranih soli) sa odgovarajućim temperaturama topljenja [83].

Tabela 4.1.3.1 Neki primjeri neorganskih PCM materijala (hidratiranih soli) (Izvor [83])

PCM	TEMPERATURA TOPLJENJA (°C/°F)
Ba(OH) ₂ -barijum hidroksid	78/172.4
CaCl ₂ -kalcijum hlorid	29.5/85.1
CaCl ₂ .6H ₂ O-kalcijum hlorid heksahidrat	29.7/85.5
Zn(NO ₃) ₂ .6H ₂ O-cink nitrat heksahidrat	36.4/97.5
KF.4H ₂ O-potasijum fluorid tetrahidrat	18.5/65.3
MgSO ₄ -magnezijum sulfat	48/118.4
NaOH-natrijum hidroksid	64/147.2
FeCl ₃ -gvožđe hlorid	37/98.6

4.1.3.2 *Organski PCM materijali*

Organski PCM materijali posjeduju niz toplotnih svojstava koja ih čine pogodnim za upotrebu u građevinskim objektima. Radi podsjećanja, organski kao i neorganski fazno-promjenljivi materijali doprinose toplotnom komforu pravovremenim akumuliranjem i otpuštanjem latentne toplote. Emisija latentne toplote stvara energetske uštede kako u elektroenergetskoj distributivnoj mreži, tako i u cjelokupnoj energetske konzumaciji od strane zgrada. Organski PCM materijali se odlikuju hemijskom stabilnošću, visokom latentnom toplotom topljenja, neotrovni su, hidrofobni (odbijaju vodu) i uglavnom kompatibilni sa građevinskim materijalima. Organski PCM materijali na bazi parafina se

preporučuju za ugradnju u građevinske materijale ili uopšte za integraciju u omotače građevinskih objekata.

U mane im se ubrajaju što parafinski organski PCM materijali imaju manje gustine i manje toplote topljenja od hidratiranih soli, što rezultira i manjim kapacitetom skladištenja toplote u poređenju sa hidratiranim solima. Toplotni kapacitet je dodatno smanjen usljed prisustva nečistoća, a proces prečišćavanja dodatno im podiže cijenu. Takođe bitan nedostatak je što su organski PCM materijali zapaljivi, pa im se dodaju agensi - retarderi zapaljivosti.

Tabela 4.1.3.2 Neki primjeri organskih PCM materijala (Izvor [83])

PCM	TEMPERATURA TOPLJENJA (°C/°F)	TOPLOTA TOPLJENJA (J/g)
CH ₃ (CH ₂) _n CH ₃ -parafin	20-60 °C (68-140 °F)	200 J/g
CH ₃ (CH ₂) ₁₂ COOC ₃ H ₇ -propyl palmitate	19 °C (66.2 °F)	186 J/g
CH ₃ (CH ₂) ₁₁ OH- 1-dodecanol	26 °C (78.8 °F)	200 J/g

4.1.3.3 Eutektički PCM materijali

Eutektički PCM materijali su smješe dva ili više materijala, bilo organskih ili neorganskih, pri čemu je temperatura topljenja niža od temperatura sastavnih komponenti. Temperatura topljenja je skoro konstantna kao kod čistih materijala. Njihova upotreba za skladištenje toplotne energije je relativno novijeg datuma.

Osnovni njihov nedostatak je cijena koja je nekoliko puta veća od neorganskih ili organskih PCM [84,85].

4.1.4 Tehnike ugradnje PCM materijala

Postoji čitav spektar tehnika ugradnje PCM materijala u omotače građevinskog objekta. To su: apsorpcija PCM (fazno-promjenljivog) materijala, direktna ugradnja PCM (fazno-promjenljivog) materijala, enkapsulacija koja se može klasifikovati na makro i mikro-enkapsulaciju i ugradnja PCM kompozita koji su stabilne forme ili oblika.

4.1.4.1 Apsorpcija PCM materijala

Apsorpcija PCMa je tehnika ugradnje fazno-promjenljivog materijala u konvencionalne građevinske materijale (gips, beton, cigla...) kojom se praktično ovi materijali potapaju u rastopljeni PCM materijal i on prodire u njihove unutrašnje pore. Ova tehnika ugradnje PCM materijala je znatno nepouzdana jer dovodi do curenja sadržaja PCM materijala, a takođe može uzrokovati i neke probleme u transferu vlage unutar omotača građevinskog objekta. U praksi su izvršena testiranja gipsanih ploča koje su natopljene PCM kompozitom, mješavinom kaprinsko-palmitinske kiseline, a potom izložene visokoj temperaturi u pećnici. Takvi eksperimenti prikazuju apsorpciju PCM materijala, a same gipsane ploče bivaju potopljene u PCM materijal neki vremenski interval [86].

Ukoliko se pak PCM materijal ugrađuje u kompleksnije elemente, kao što je limeni sendvič panel, obično se miješa sa izolacionim materijalom i takav injektira unutar limova. U radu [87] istražuje se da li injektirani mikroenkapsulirani PCM materijal Micronal BASF, prethodno pomiješan sa poliuretanskom pjenu, povećava toplotni otpor limenog sendvič panela. Pored testiranja povećanja toplotnog otpora injektiranog PCMa, testirana je i distribucija mikroenkapsuliranog PCMa kroz poliuretansku pjenu kao i adhezija između limova i poliuretanske pjene. Pomenuti Micronal BASF čine male mikrokapsule sa akrilnom ljuskom ispunjene voskom (stvrnutim PCM materijalom), koji ima temperaturu topljenja od skoro 23 °C.

4.1.4.2 Direktna ugradnja PCM materijala

Direktna ugradnja PCM materijala je tehnika u kojoj tečni ili praškasti PCM materijal biva direktno integrisan u neke konvencionalne građevinske materijale (gips, cement, beton) još u pripreмноj fazi tog građevinskog materijala [88, 89]. To znači da se u slučaju miješanja sa betonom, miješa sa gotovom betonskom kašom, njegovim agregatom ili pak cementnim malterom kao specifičan aditiv cementa. Dodavanje PCMa betonu, usporava njegov proces stvrdnjavanja, iako se PCM dodaje enkapsuliran betonu zbog nekompatibilnosti. PCM materijal se može direktno miješati i sa izolacionim materijalima, celulozom, bio-vlaknastim izolacijama, poliuretanskom pjenom, ekspaniranim polistirenom, fiberglasom. Ova tehnika je prilično jednostavna, ali takođe može uzrokovati curenje fazno-promjenljivog materijala. Ponekad dolazi i do nekompatibilnosti pojedinih PCM materijala sa građevinskim materijalima. Pojedini tipovi PCM materijala nakon solidifikacije podsjećaju na vosak, pa su jako tvrdi i neprobojni u čvrstom stanju. Direktna ugradnja i potapanje poroznih građevinskih materijala u rastopljeni PCM kao tehnike ugradnje PCM materijala su nastale još 1970-tih i 1980-tih godina.

4.1.4.3 Enkapsulacija

Enkapsulacija je tehnika ugrađivanja PCM (fazno-promjenljivog) materijala koja je uveliko prisutna u modernom naučno-tehnološkom svijetu [90]. Enkapsulacija sprečava brojne nuspojave ugrađenog PCMa, kao što su: isparljivost, termičku i hemijsku nestabilnost, curenje aktivne materije PCMa van matrice ili kapsule u trenutku fazne transformacije PCM materijala, nekompatibilnost PCMa sa izvjesnim građevinskim materijalima. Matrica u koju se smješta PCM materijal mora odgovarati fizičkim, hemijskim i termičkim svojstvima enkapsulirane aktivne materije. Matrica ili kontejner koji sadrži PCM kompozit mora odoljeti dilataciji kao i brojnim drugim variranjima volumena PCM kompozita u toku njegove fazne transformacije. Vrlo često zapravo

hidrofobni PCM materijali bivaju enkapsulirani. Postoje dva tipa enkapsulacije aktivne PCM materije: makroenkapsulacija i mikroenkapsulacija.

4.1.4.4 Makroenkapsulacija

Makroenkapsulacija je tehnika koja podrazumijeva zatvaranje PCM (fazno-promjenljivog) materijala u kontejnere koji variraju i do nekoliko litara [90,91]. Ovi kontejneri mogu biti aerobni i anaerobni.

Kontejneri koji se najčešće koriste pri makroenkapsulaciji su: polimerni moduli u vidu velikih disketa, plastične i aluminijumske kese, sfere ili loptasti kontejneri.

U industriji se za spravljanje kontejnera za makroenkapsulaciju, najviše upotrebljavaju polimeri od sintetičkog i polisintetičkog materijala. Ponekad PCM materijali zbog nekompatibilnosti sa određenim građevinskim materijalima, bivaju dvostruko enkapsulirani, u mikrokapsule pa potom u makrokapsule. Eksploatacija suviše velikih kontejnera za makroenkapsulaciju, može rezultirati u velikim temperaturnim razlikama između zida kontejnera i PCM jezgra, što dovodi do neravnomjerne raspodjele temperature unutar kontejnera. Makroenkapsulacija kao tehnika ugradnje PCM materijala datira još od 2004.godine.

4.1.4.5 Mikroenkapsulacija

Mikrokapsule ili mikro-matrice sadrže aktivnu materiju tj. tzv. PCM jezgro. PCM jezgro, (tj. skoncentrisani PCM materijal ili PCM kompozit) prijanja uz vezivni polimer mikrokapsule. Mikrokapsule PCM materijala imaju veličinu koja varira od 1-300 μm , a uopšte mogu varirati i do 1 mm. PCM jezgro ove veličine je sposobno da održi svoj oblik ili formu tokom fazne transformacije i da se odupre silama potiska, dilataciji i modifikacijama svog volumena [92]. Materijali od kojih se spravljaju mikrokapsule su

najčešće polimeri od sintetičkog i polisintetičkog materijala. Mikroenkapsulacija je kao način ugradnje PCM materijala nastala 2006. godine.

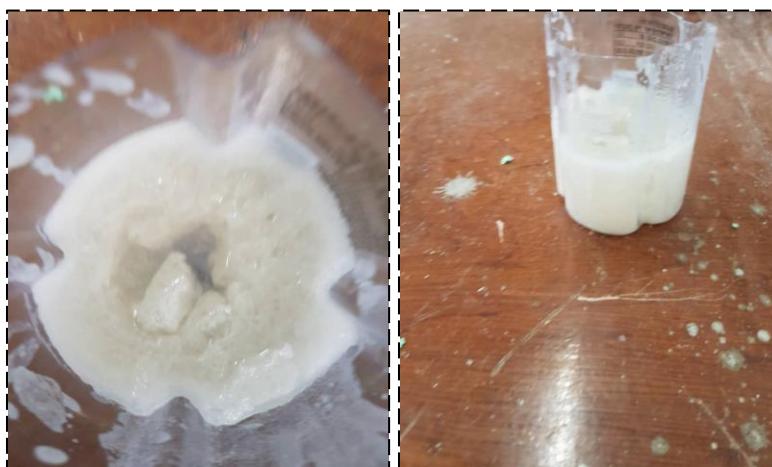
Jedno u nizu sprovedenih istraživanja nad mikroenkapsuliranim PCM materijalom, je i istraživanje sprovedeno od strane Instituta za Pasivnu kuću u Darmstadt, Njemačkoj. Ovaj institut je sproveo istraživanje o efektu i uticaju Knauf fabrikovane PCM pametne gipsane ploče [93] na energetske potrošnje i konzumaciju unutar građevinskog objekta u toku ljeta i zime. Pomenuta Knauf, fabrikovana PCM pametna gipsana ploča sadrži 26% mikroenkapsuliranog PCM materijala Micronal BASF i napravljena je debljine 1.5 cm. Micronal BASF je jedan od najvećih proizvođača polimernih mikrokapsula sa PCM materijalom.

4.1.4.6 Stabilni PCM materijali

Stabilni PCM materijali su najčešće PCM materijali rastvoreni u nekim gustim gelovima, mastima, pjenama, u izolacionim materijalima sa većom gustoćom. Ovi materijali bivaju takođe enkapsulirani zbog efekta curenja i boljeg kontakta PCM materijala i njegovog radnog okruženja. Miješanjem PCM materijala i izvjesnih gelova, masti i pjena kao i izolacionih materijala dobijaju se PCM kompoziti koji imaju definisan i čvrst geometrijski oblik [94]. Geometrijski oblik takvih PCM kompozita može biti pravougaoni, kvadratni.

Stabilni PCM materijali su obično predviđeni za podne sisteme gdje su integrisani u završni sloj poda u obliku podnih pločica. Takođe služe za neke završne ekspoziture u omotačima građevinskih objekata. Ovaj tip tehnike ugradnje PCM materijala razvijen je 2005. godine.

Na slikama 4.1.4.1 i 4.1.4.2 dati su foto snimci PCM materijala korišćenog u toku eksperimenta, iz laboratorije Univerziteta za nauku i tehnologiju, u Changsha, Kina.



a)

b)

Sl. 4.1.4.1 a,b) organski PCM parafinski rastvor, Rubitherm OP28E u kristalisanom (čvrstom) stanju

[Izvor: Laboratorije Univerziteta za nauku i tehnologiju, Changsha, Kina]



a)



b)

Sl. 4.1.4.2 a) PCM kuglica, b) ljuska PCM kuglice od polietilena visoke gustine, c) PCM kuglice ugrađene u stiropornu izolaciju

[Izvor: Laboratorija Univerziteta za nauku i tehnologiju, Changsha, Kina]

4.1.5 Primjeri primjene PCM materijala

PCM materijali su prisutni u brojnim industrijama: građevinskoj, farmaceutskoj, medicinskoj, tekstilnoj, automobilskoj, aeroinženjstvu, elektronici. PCM materijali su svojevrsni termoregulatori. Tako naprimjer, u elektronici obezbjeđuju kontrolu toplote brojnih elektroda, čipova, termoparova, akumulatora. Oni u domenu elektronike zapravo sprečavaju učestali efekat pregrijavanja elektronskih elemenata u kompleksnim elektronskim sistemima. Upotreba PCM materijala u elektronskim sistemima smanjuje čak i do 50% pregrijavanje elektronskih elemenata.

PCM materijali se uveliko danas upotrebljavaju i u BMW automobilskoj industriji kao prateća oprema u obliku baterije latentne toplote (Sl.4.1.5.1a). Kada se na radnoj temperaturi sam motor pregrije, višak emitovane toplote PCM materijal (baterija) skladišti kao latentnu toplotu. Uskladištena latentna toplota PCM baterije je tada na raspolaganju za sledeći hladan start i inicijalno, brzo zagrijavanje BMW motora. Zahvaljujući izvrsnoj izolaciji PCM baterije latentne toplote, ona može zadržati uskladištenu, akumuliranu toplotu i dva dana čak i na ekstremno niskim spoljnim temperaturama (-20 °C). Ovako ugrađena PCM baterija latentne toplote takođe sprečava i efekat mržnjenja motora automobila i povećava njegovu efikasnost na ekstremno niskim spoljnim temperaturama [95,96].

U farmaceutskoj industriji, PCM materijali služe za održavanje toplote i potrebne temperature nekih lijekova, uskladištenih krvnih zaliha. Mogu se naći u sastavu nekih aparata, rezervoara, skladišta ili magacina. Koriste se i kao nosivi, montažni mali kontejneri u medicini koji istovremeno imaju funkciju grijanja i rashlađivanja posuda u kojima odstoje organi za transplataciju (Sl.4.1.5.1b).

U građevinskoj industriji PCM materijali predstavljaju jedan od najperspektivnijih materijala. Povećavaju energetska efikasnost objekta u smislu smanjenja potrošnje energije za hlađenje i zagrijavanje.

Na slici Sl. 4.1.5.1 je dat prikaz upotrebe PCM materijala u različite svrhe.



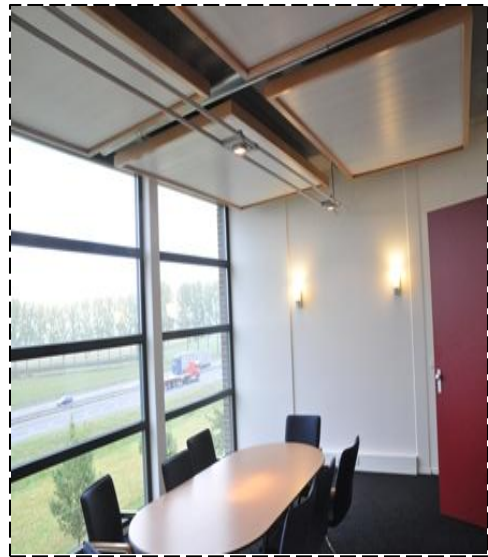
a)



b)



c)



d)

Sl. 4.1.5.1 a) PCM hidrantna so kao punjač baterije, b) PCM plastificirani kontejner u medicini, c,d) PCM ploče na plafonima (Izvor: [95,96])



Sl. 4.1.5.2 PCM panel tipa Energain

(Izvor: [97])

Tipičan primjer komercijalno dostupnog proizvoda na bazi PCM materijala na svjetskom tržištu je panel *Energain* od proizvođača *Dupont*. PCM jezgro ovog panela čine kopolimeri sa parafinom. Panel je obmotan u aluminijski laminat, kao završni sloj. Specifikacije koje se tiču temperature su: temperatura topljenja 22 °C, temperatura očvršćavanja 18 °C. Ovaj zidni panel je relativno tanak, debljine 5.66 mm i težine 4.5 kg/m². Na Sl. 4.1.5.2 se može vidjeti montaža jednog takvog *Energain* panela.

Primjer PCM izvedenog projekta je ploveći paviljon u Rijnhafenu (Rotterdam). Paviljon čine tri međusobno povezane polusfere od kojih je svaka visoka 12m, a imaju respektivno 18.5, 20 i 24 m u prečniku (Sl. 4.1.5.3). U najmanjoj kupoli paviljona, koja služi kao auditorijum, upotrijebljen je PCM materijal, koji ima funkciju da ublaži temperaturne fluktuacije unutar kupole paviljona. Noću klima uređaj u kupoli osigurava potpunu solidifikaciju, tj. proces mržnjenja PCM materijala.



Sl. 4.1.5.3 Primjer PCM izvedenog projekta: ploveći paviljon u Rijnhafenu (Rotterdam, Holandija)
(Izvor: [98])

4.2 Eksperimentalni dio

Eksperimentalna istraživanja PCM materijala

4.2.1 Uvod

Radi poboljšanja energetske efikasnosti stambenih objekata, tj. redukcije grijanja i hlađenja, odn. radi poboljšanja toplotnih performansi i smanjenja energetske potrošnje unutar stambenih objekata koriste se PCM materijali (Phase Change Materials – materijali sa promjenom stanja, tj. materijali koji mijenjaju agregatno stanje).

Problematici eksperimentalnih istraživanja posvećeni su brojni radovi [99÷104]. Analiza toplotnih karakteristika kombinacije PCM materijala sa drugim konvencionalnim građevinskim materijalima data je u [105÷108]. Kompjuterska simulacija temperaturnih promjena PCM impregnisanog gipsanog zida obrađena je u [109]. U eksperimentalnoj studiji [110] razmatraju se toplotna svojstva cementnog maltera sa inkorporisanim PCM materijalima. U radu [111] analizirano je skladištenje toplote u izolacionim slojevima sa PCM materijalima inkorporisanim u cementni malter na primjeru dvije testne kuće, radi određivanja optimalne pozicije PCM izolacionog sloja. Nađeno je da je optimalna pozicija PCM izolacionog sloja na južnom zidu 2.54 cm od zidne ploče, dok je optimalna pozicija na zapadnom zidu 1.27cm od zidne ploče.

U ovom dijelu disertacije izloženi su rezultati eksperimentalnih istraživanja PCM materijala, korišćenih u vidu enkapsuliranih kuglica, tj. plastičnih ljuski koje sadrže PCM materijal i koje su za potrebe ovog istraživanja postavljene u jednom od izolacionih slojeva. Tanka električna grejna folija je primijenjena da simulira solarno zračenje sa spoljne strane izolacionog zida, tj. omotača. Toplotne performanse izolacionog sloja sa PCM kuglicama, za različite pozicije tog sloja u izolacionom zidu, su izučavane sa aspekta vremena potrebnog za topljenje i solidifikaciju PCM materijala, redukcije temperatura u ustaljenom toplotnom režimu, porasta temperatura u režimu solidifikacije, vremena postizanja ustaljenih temperatura pri grijanju, kao i vremena za koje se, u zadatom temperaturnom

opsegu obezbjedjuje odgovarajuća temperatura u unutrašnjoj prostoriji bez uključivanja HVAC sistema (Heating, Ventilation, Air Conditioning). Razmatrana su dva režima: pri primjeni izvora sa konstantnim toplotnim fluksom (stacionarni toplotni režim) u toku perioda grijanja i sa izvorima sa promjenljivim toplotnim fluksom (tranzijentni toplotni režim) u toku perioda grijanja kojim se simulira dnevna promjena solarnog zračenja.

Dobijeni rezultati su značajni za projektovanje omotača zgrade, tj. izolacionog zida koji sadrži sloj sa ugrađenim PCM kuglicama u smislu unapređenja performansi energetski efikasnog projektovanja,

4.2.2 Konceptualna postavka eksperimenta i ciljevi eksperimentalnog istraživanja

Tehnologije deponovanja latentne toplote se smatraju prosperitetnim, savremenim alatima prilikom osmišljavanja toplotnog dizajna lakih konstruktivnih sklopova. Ove tehnologije uveliko olakšavaju funkcionisanje "pametnih" zgrada svojim auto-regulatornim, kontrolnim mehanizmom koji preuzima dio spoljašnje toplote i reguliše unutrašnju temperaturu prostorije smanjujući upotrebu HVAC sistema. Da bi se svrsishodno izborili sa pregrijavanjima i prekomjernim rashlađivanjima unutar omotača zgrada, dnevnim maksimalnim toplotnim fluksevima i fluktuacijama temperatura, PCM materijali su aktuelni predstavnici modernih tehnologija koje to obezbjeđuju. U ovoj eksperimentalnoj studiji od vitalnog značaja je analiza termodinamičkog ponašanja tri modela gipsanih zidova u zavisnosti od promjenljivih ulaznih parametara. Tri gipsana zida su konstruisana kao: gipsani zid sa pet stiropornih izolacionih slojeva, (kontrolni ili referentni zid - Reference wall); gipsani zid sa četiri stiroporna izolaciona sloja i jednim stiropornim slojem impregniranim PCM lopticama (Envelope with PCM balls) i gipsani zid sa četiri stiroporna izolaciona sloja i jednim stiropornim slojem sa šupljinama koje odgovaraju veličinama PCM kuglica (Envelope with cavities) (SI.4.2.3.1). Sva tri uzorka gipsanih zidova su prema usvojenom algoritmu odvijanja eksperimenta bili podvrgnuti promjenljivoj ulaznoj toploti, tj. promjenljivom izvoru toplote. Kao emiter toplote je poslužio grejni film napajan promjenljivim naponom. Promjena napona je obavljena preko regulatora napona sa

vrednostima 205V, 183V, 159V, 130V i 92V, što je korespondiralo prethodno utvrđenim vrijednostima solarne radijacije od 200 W/m², 160 W/m², 120 W/m², 80 W/m² i 40 W/m², respektivno. Vrijednosti ovih napona determinisane su shodno vrijednostima električnog otpora R_{gf} grejnog filma (grijača) i vrijednostima maksimalnog dozvoljenog napona grejnog filma. Drugi promjenljivi ulazni parametar je bila simultana promjena položaja stiropornog sloja impregnisanog PCM kuglicama i stiropornog sloja sa šupljinama, od pozicije 1 do pozicije 5 (Sl.4.2.3.2 a), od spoljašnje ka unutrašnjoj strani gipsanog zida. Serija prethodno pomenutih napona se ponavljala ciklično, nakon svake promjene pozicija ovih izolacionih slojeva od 1 do 5. Treći promjenljivi ulazni parametar je bio tip toplotnog transfera kao tip nametnutog toplotnog režima, a razlikovali su se stacionarni i tranzijentni toplotni režim. Stacionarni toplotni režim je toplotni transfer tokom kojeg se prenosi konstantna količina toplote u toku vremena. Vrijeme uključenosti grijača, tj. zračenja konstantnog toplotnog fluksa, je trajalo do postizanja ustaljenih temperatura PCM kuglica i šupljina. Kod tranzijentnog toplotnog režima količina toplote koja se prenosi je promjenljiva u toku vremena, sa ciljem da se što uspješnije simulira dnevno-noćni, dvadesetčetvoročasovni, režim promjene temperatura spoljašnje sredine. Eksperiment sa tranzijentnim toplotnim režimom se obavljao sa podešavanjem napona na regulatoru napona u vremenskim sekvencama od oko jednog časa. Tranzijentni toplotni režim je bio definisan prema različitoj solarnoj radijaciji u toku dana. Napravljeni su termovizijski snimci radi analize prostorne raspodjele temperatura duž površina razmatranih modela zidova.

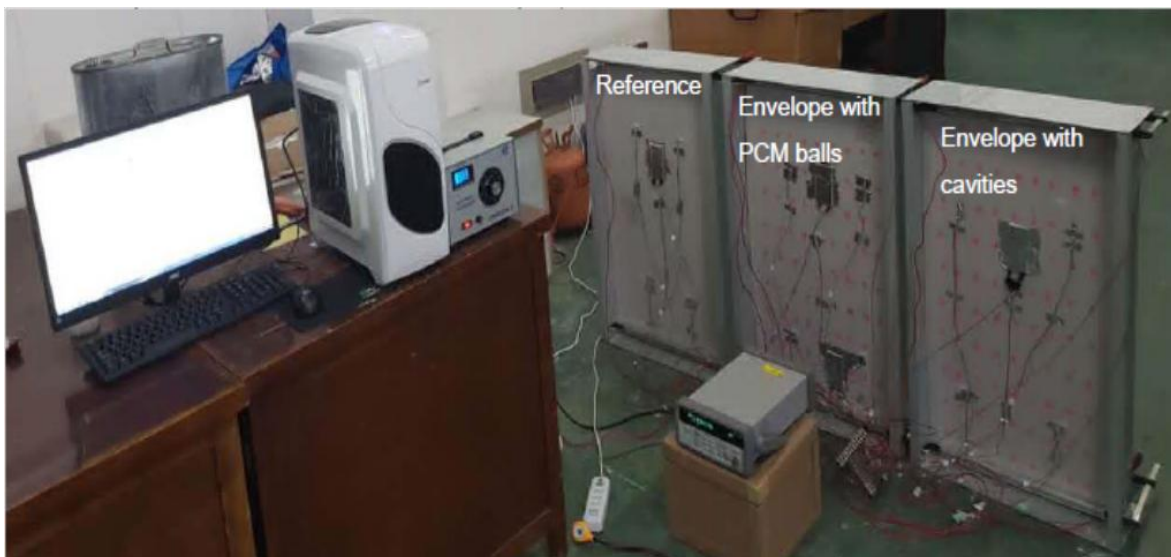
U ovoj eksperimentalnoj studiji se istražuju:

1. fluktuacije temperatura PCM kuglica i šupljina u funkciji promjenljivog toplotnog fluksa i promjenljivog položaja izolacionog, stiropornog sloja impregnisanog PCM kuglicama i izolacionog sloja sa šupljinama, unutar gipsanih zidova. Slučajevi ova dva gipsana zida se porede sa kontrolnim (referentnim) zidom;
2. uticaj različitih tipova toplotnog transfera (stacionarnog i tranzijentnog) na fluktuacije temperatura PCM kuglica i šupljina unutar modela gipsanih zidova;
3. površinska raspodjela temperatura duž površina gipsanih modela zidova;

- na osnovu mjernih rezultata se identifikuje koje oblasti gipsanih zidova, odn. koji izolacioni slojevi sa PCM kuglicama unutar tih zidova, su podvrgnuti i u kojoj mjeri faznim prelazima (topljenja i solidifikacije) parafinskog rastvora unutar PCM kuglica. Na osnovu toga se utvrđuje u kojim pozicijama slojeva je svrsishodno postavljati PCM kuglice da bi efikasno obavljale funkciju regulatora temperature.

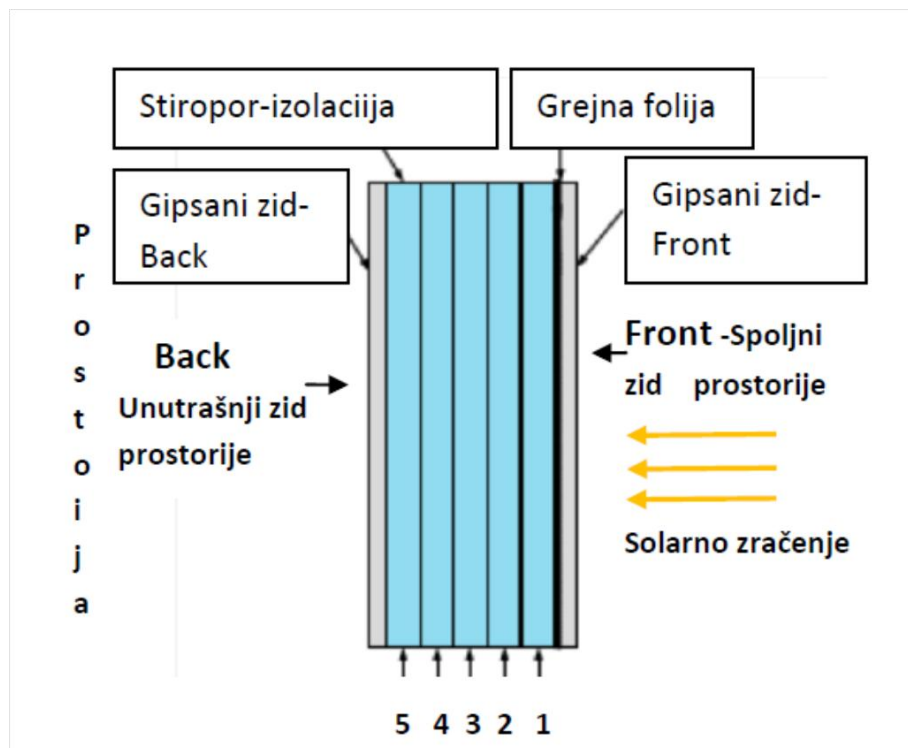
4.2.3 Mjerna oprema i instrumenti

Eksperimentalna istraživanja su sprovedena u laboratoriji Univerziteta za nauku i tehnologiju, u Changsha, Kina. Radi ispitivanja prenosa toplote i njenog uticaja na fluktuacije temperatura, korišćeni su kao uzorci tri gipsana zida prikazana na Sl.4.2.3.1 sa mjernim instrumentima korišćenim u toku eksperimenata.



Sl.4.2.3.1 Gipsani zidovi sa mjernom instrumentacijom korišćeni u toku eksperimenata

Na slici 4.2.3.2 dat je prikaz: a) unutrašnje konfiguracije gipsanog zida; b) izolacionog stiropornog sloja impregnisanog PCM lopticama; c) izolacionog stiropornog sloja sa šupljinama.



a)



b)



c)

Sl. 4.2.3.2 a) unutrašnja konfiguracija gipsanog zida; b) izolacioni stiroporni sloj impregnisan PCM lopticama; c) izolacioni stiroporni sloj sa šupljinama

Svaki od uzoraka zidova je zatvoren sa dvije gipsane ploče dimenzija 500mm X 900 mm X 8mm, svaka sa toplotnom provodnošću $\lambda_g=0.20 \text{ W/(m }^\circ\text{C)}$, odn. toplotnim otporom $R_g=L_g/\lambda_g=0.008/0.2=0.04 \text{ (m}^2 \text{ }^\circ\text{C)/W}$. Dimenzije izolacionih slojeva stiropora, toplotne provodnosti $\lambda_s=0.030 \text{ W/(m }^\circ\text{C)}$, su 500mm X 900mm X 17mm, pri čemu je toplotni otpor jednog stiropornog sloja $R_s=L_s/\lambda_s=0.017/0.03=0.57 \text{ (m}^2 \text{ }^\circ\text{C)/W}$. Pet slojeva izolacione stiroporne mase je u svakom modelu zida bilo sabijeno metalnim stezaljkama, tako da između slojeva stiroporne mase nije bilo vazdušnog prostora. Metalni ramovi, koji su uokvirivali sabijenu stiropornu masu u gipsanim pločama, su izrađeni od pocinkovanog lima.

PCM kuglice (Sl.4.2.3.2b) čine sferne polimerne ljuske, tj. ljuske od polietilena visoke gustine, hermetički zatvorene. Toplotna provodljivost PCM polimernih sfernih ljuski je $0.32 \text{ W/(m }^\circ\text{C)}$. U kuglice je injektiran organski PCM materijal, parafinski rastvor Rubitherm, oznake OP28E. Termodinamička svojstva parafinskog rastvora OP28E su data u Tabeli 4.1.2.1 kao i DSC toplotne karakteristike na Sl. 4.1.2.2.

U okviru svakog uzorka zida korišćene su grejne folije dimenzija 500mm X 1000 mm X 0.37mm (Sl. 4.2.3.2 a). Grejne folije su smještene u svakom uzorku gipsanog zida između gipsane ploče i prvog izolacionog stiropornog sloja. Položaj grejnih folija u toku eksperimenta se nije mijenjao.

Naponski generator promjenljivog napona (naizmjenični napon AC), tipa STG-1000W, korišćen je za napajanje grejne folije. Promjenom napona, odn. struje kroz grejnu foliju, mijenja se vrijednost toplotnog fluksa kojim se simulira nivo solarnog zračenja.

Dodatni dio eksperimentalne instrumentacije sadrži termoparove koji mjere temperature šupljina i PCM kuglica unutar razmatranih izolacionih slojeva.. Termoparovi, tipa TT-T-30-SLE, prečnika $D=2 \text{ X } \phi 0.511\text{mm}$, naravljeni su od bakra i konstantana (legure bakra i nikla). Termoparovi su grupisani u 19 različitih termokanala spojenih sa instrumentom za registrovanje podataka (Data Logger) tipa Agilent 34972A LXI koji je

vezan za PC računar. Na PC računaru je na operativnom sistemu Microsoft Windows instaliran softver Agilent BenchLink Data Logger 3 koji vrši bilježenje, arhiviranje mjerenih podataka u Excel tabelama pogodnim za analizu i grafičke prikaze.

U eksperimentu je korišćena termovizijska kamera radi analize prostorne raspodjele temperature duž površina gipsanih modela zidova.

Oznake korišćene u tekstu, grafikonima, pri obradi eksperimentalnih rezultata kao i u Excel tabelama sa snimljenim podacima su sledeće:

BALLS INSIDE DOWN (BID) - PCM kuglice unutar stiropornog sloja u donjoj zoni sloja

BALLS INSIDE UP (BIU) - PCM kuglice unutar stiropornog sloja u gornjoj zoni sloja

HOLES INSIDE (HI) - šupljine unutar stiropornog sloja

$\Delta t_{\text{melting}}$ - vrijeme topljenja PCM materijala

Δt_{sol} - vrijeme solidifikacije (vrijeme prelaska iz tečnog u čvrsto stanje) PCM materijala

$\Delta t_{\text{ustaljeno}}$ - vrijeme uspostavljanja ustaljene temperature (stacionarni toplotni režim)

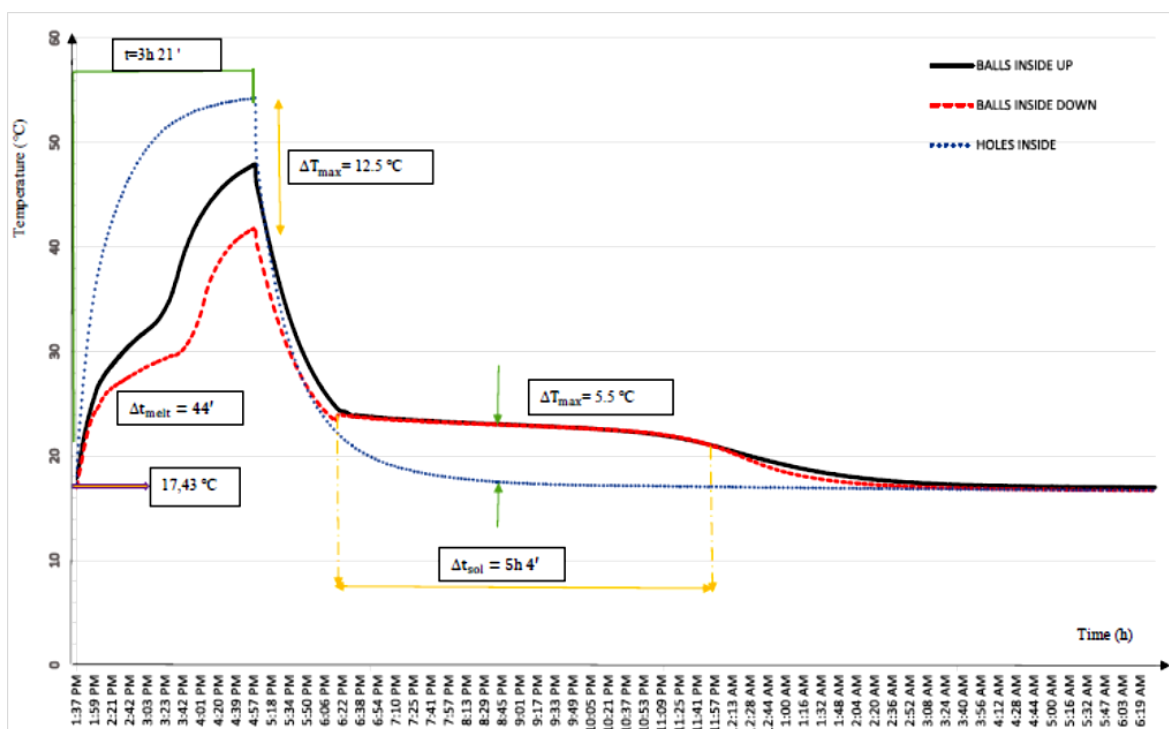
4.2.4 Ispitivanje uticaja stacionarnog toplotnog režima na PCM materijale

A. Toplotni fluks 200 W/m²

A.1 Temperature PCM kuglica i šupljina, izolacioni slojevi na poziciji 1

Na Sl. 4.2.4.1 se vidi da je početna temperatura ambijenta i temperatura na kojoj započinje grijavanje tokom eksperimenta 17.43°C. U slučaju izolacionog sloja sa šupljinama uočava se da se vazduh u šupljinama najbrže zagrijava, pri čemu se zagrijavanje odvija po eksponencijalno rastućoj funkciji. Rast temperatura unutar šupljina nastaje usljed

visokog toplotnog zračenja grejnog filma i efekta slobodne konvekcije vazduha u šupljinama i duž sloja. Maksimalna temperatura od 54.33°C unutar šupljina dostiže se već posle 3h 21min, dok je odgovarajuća maksimalna temperatura PCM kuglica u gornjem sloju 47.05°C, a u donjem sloju 41.81°C. Umetanjem PCM kuglica postiže se temperaturna redukcija njihovih temperatura u odnosu na temperaturu šupljina od 12.5°C. Na grafikonu se uočava i konstantno veća temperatura PCM kuglica u gornjoj zoni izolacionog sloja u odnosu na donju zonu istog. Ova pojava se pripisuje neravnomjernom grijanju grejne folije i njenim nesavršenostima. Iz istog razloga je i vremenski interval intenzivnog topljenja PCM materijala ((27 ÷29) °C) u gornjoj zoni 19min, dok je u donjoj zoni 44min.



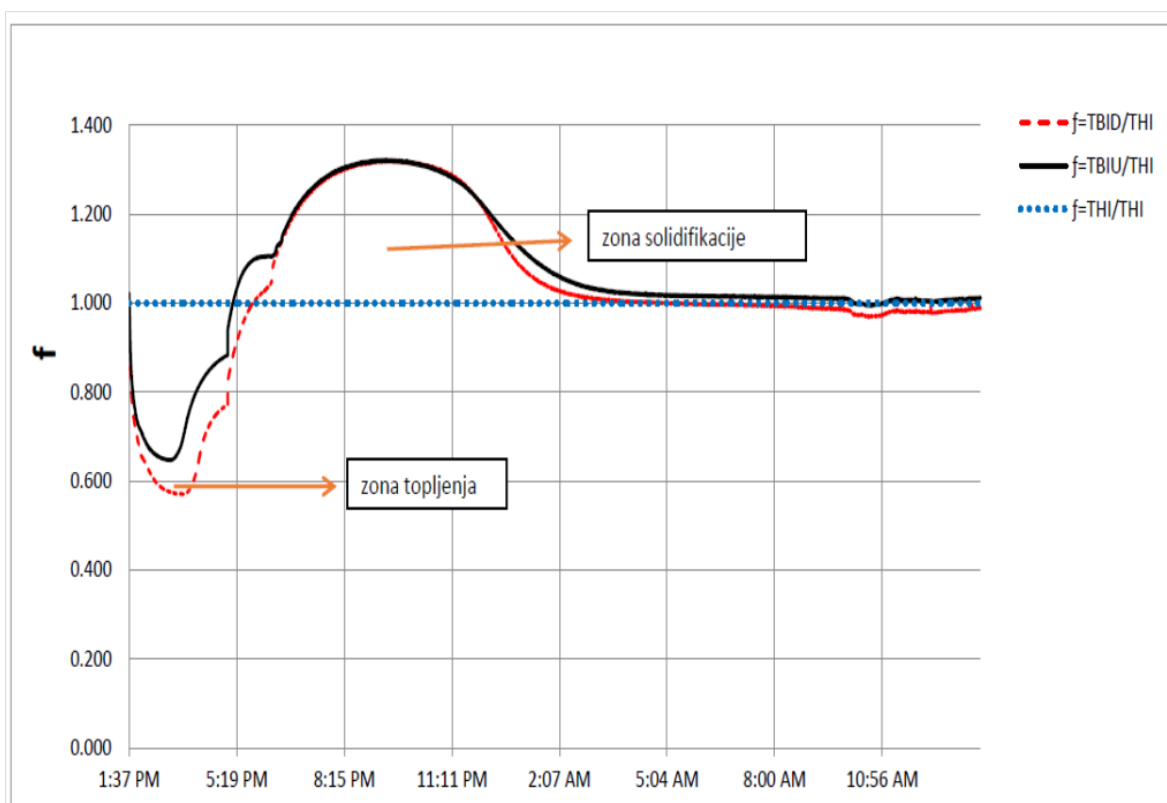
Sl. 4.2.4.1 200 W/m², temperature PCM kuglica i šupljina, izolacioni slojevi na poziciji 1

Na istom grafikonu sa Sl. 4.2.4.1, na intervalu solidifikacije (kristalizacije, očvršćavanja) PCM materijala, primjećuje se da su temperature u gornjoj i donjoj zoni PCM kuglica u izolacionom sloju skoro identične, odn. da je ista količina otpuštene

latentne toplote. To se objašnjava činjenicom da je u toku ovog eksperimenta izvršeno potpuno topljenje i očvršćavanje PCM materijala, pa je ista količina uskladištene i otpuštene latentne toplote u gornjoj i donjoj zoni sloja sa PCM kuglicama. Kompletni ciklusi topljenja i očvršćavanja PCM materijala završavaju se u toku 12h, što je kraći vremenski interval u odnosu na realni dvadesetčetvoročasovni ciklus dana i noći.

Sam proces solidifikacije traje oko 5h 4min. Proces solidifikacije se odvija na temperaturnom opsegu $\Delta T=(24\div 21)^{\circ}\text{C}$, koji je viši od temperature okoline. Temperaturna razlika PCM kuglica pri solidifikaciji u odnosu na okolinu iznosi 5.5°C , kojom se postiže toplotni komfor.

Prema izvršenom kalorimetrijskom DSC testu (Sl.4.1.2.2), ukupni temperaturni opseg topljenja PCMa je od 20°C do 33.25°C . Entalpija H koja korespondira tom temperaturnom opsegu, se mijenja od 59.17 kJ/kg do 233.07 kJ/kg (Sl. 4.1.2.2).



Sl.4.2.4.2 Faktor slabljenja u funkciji vremena

Zaključak je da kada se izolacioni sloj impregnisan PCM kuglicama postavi ka spoljnjem zidu, neposredno izložen solarnom zračenju (koga simulira grejna folija), proces topljenja PCM materijala je potpun, tj. akumulira se maksimalna količina latentne toplote. Sa druge strane, PCM materijal brzo prelazi iz čvrstog u tečno stanje, odn. period deponovanja latentne toplote je suviše kratak, čime se smanjuje mogućnost redukovanja temperature prostorije u dužem vremenskom intervalu, što je mana smještanja PCM kuglica u sloju na poziciji 1.

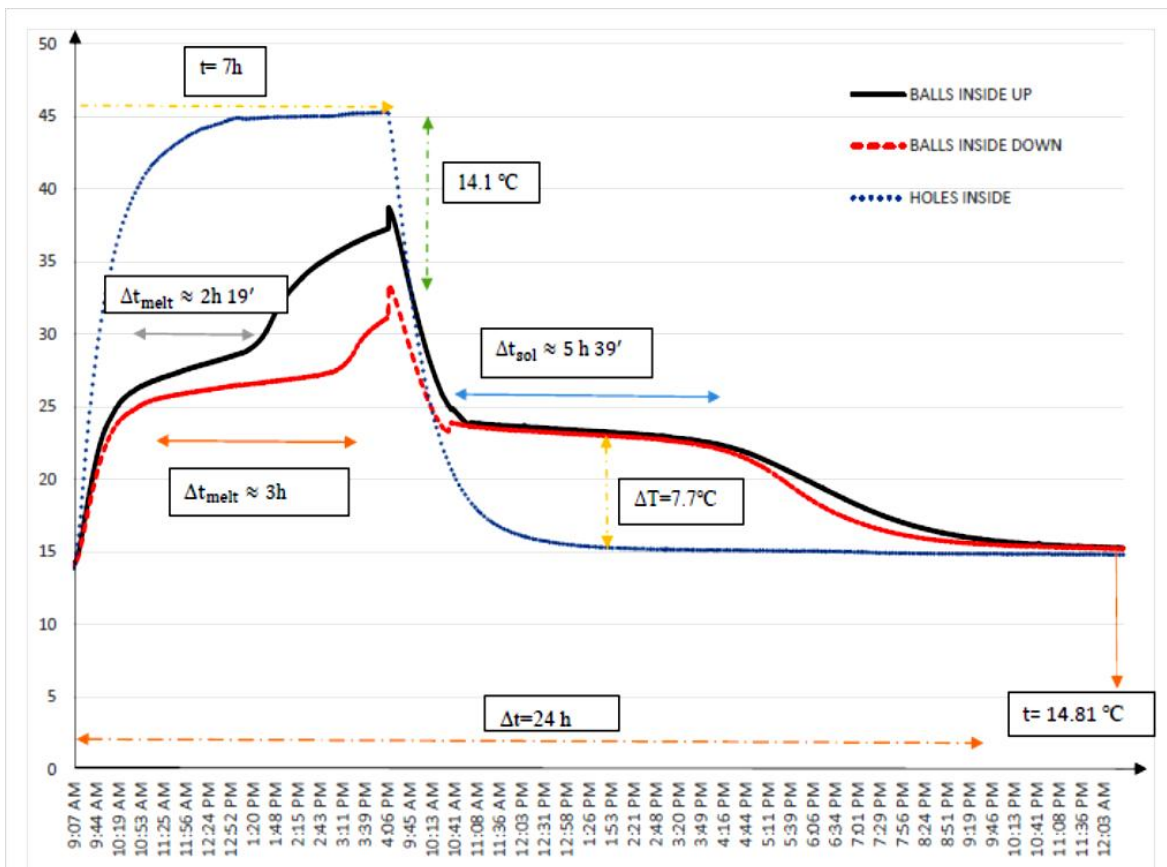
Prikaz intervala topljenja i solidifikacije se može analizirati i interpretirati i metodom faktora slabljenja (Decrement factor) f , definisanog kao odnos temperatura PCM kuglica prema temperaturi šupljina $f = T_{BID}/T_{HI}$ i $f = T_{BIU}/T_{HI}$ (Sl.4.2.4.2), gdje su jasno naznačene zone topljenja i solidifikacije za položaj slojeva u poziciji 1.

A.2 Temperature PCM kuglica i šupljina, izolacioni slojevi na poziciji 2

S obzirom da su izolacioni sloj impregnisan PCM kuglicama i izolacioni sloj sa šupljinama u poziciji 2 (Sl. 4.2.4.3), temperature ovih slojeva u gipsanim zidovima sada su znatno niže u odnosu na prethodni slučaj. Naime u prethodnom slučaju, maksimalna temperatura izolacionog sloja sa šupljinama je bila 54.3°C, dok u poziciji 2 temperatura izolacionog sloja sa šupljinama dostiže maksimalnu temperaturu od 45.2 °C. U poziciji 1, temperatura od 54.3°C se dostiže nakon 3h 21min, dok se u poziciji 2 temperatura od 45.2°C dostiže nakon 7h. To se događa zbog toplotnih gubitaka prilikom transfera toplote kroz prvi izolacioni stiroporski sloj.

Zapaža se da vremenski interval intenzivnog skladištenja latentne toplote i u gornjoj i u donjoj zoni gipsanog zida impregnisanog PCM kuglicama, započinje na temperaturi neznatno većoj od 25°C. U donjoj zoni gipsanog zida impregnisanog PCM kuglicama ovaj interval aproksimativno traje 3h, dok u gornjoj zoni aproksimativno traje 2h 19min. Ovaj vremenski raskorak u skladištenju latentne toplote prisutan je zbog ranije navedenog neravnomjernog zagrijavanja grejne folije i njenih fabričkih nesavršenosti. Manji toplotni fluks, odn. niže temperature u izolacionom sloju na poziciji 2, uzrokuju znatno duže

intervale topljenja PCM materijala u PCM kuglicama u odnosu na prethodni slučaj. Vremenski interval solidifikacije PCM materijala i otpuštanja latentne toplote traje oko 5h 39min. Tokom tog vremenskog intervala, krive temperatura gornje i donje zone sloja impregnisanog PCM kuglicama se poklapaju. Dotični interval očvršćavanja ili kristalizacije PCM materijala u kuglicama odvija se na prelazu temperatura od 23.6°C do 21.7°C.



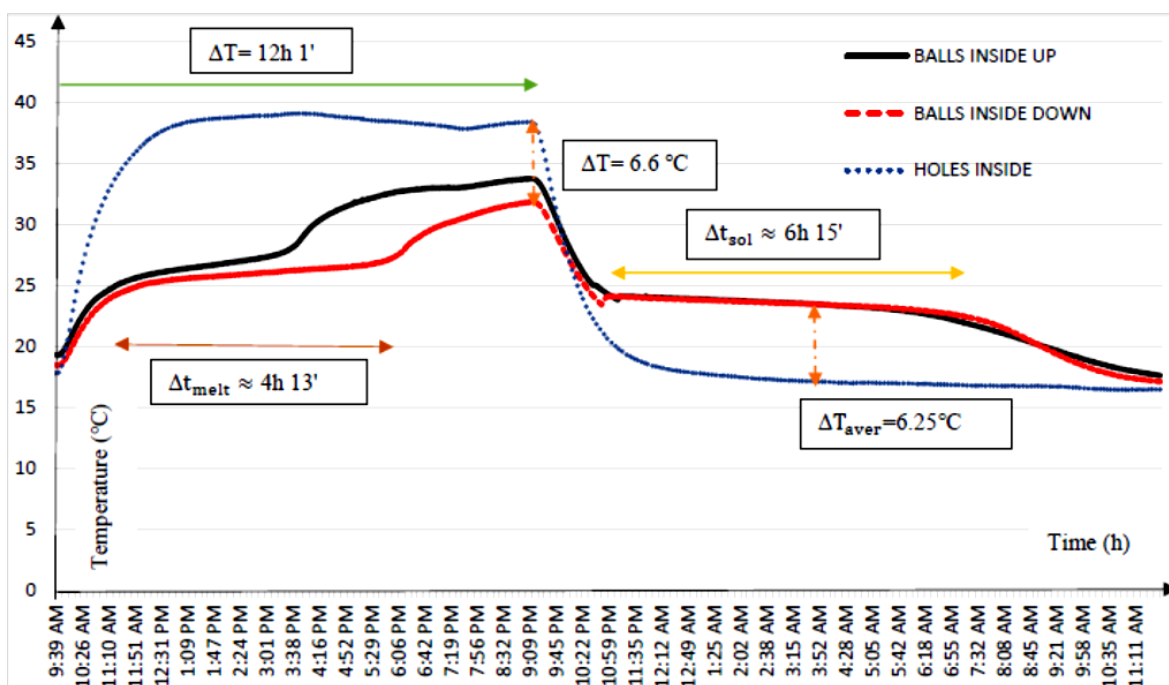
Sl. 4.2.4.3 200 W/m², temperature PCM kuglica i šupljina, izolacioni slojevi na poziciji 2

Zabilježena redukcija temperature šupljina i PCM kuglica u donjoj zoni sloja iznosi 14.1°C, što je više nego u poziciji 1.

Ciklus topljenja i očvršćavanja PCM materijala obavlja se u toku 24h, što realnije, u odnosu na prethodni slučaj, odgovara dvadesetčetvoročasovnom ciklusu dana i noći.

A.3 Temperature PCM kuglica i šupljina, izolacioni slojevi na poziciji 3

Vrijeme uspostavljanja maksimalnih, ustaljenih temperatura za ovaj slučaj je veoma dugo i iznosi 12h 1min. Zbog nižih temperatura u trećem sloju PCM kuglice imaju

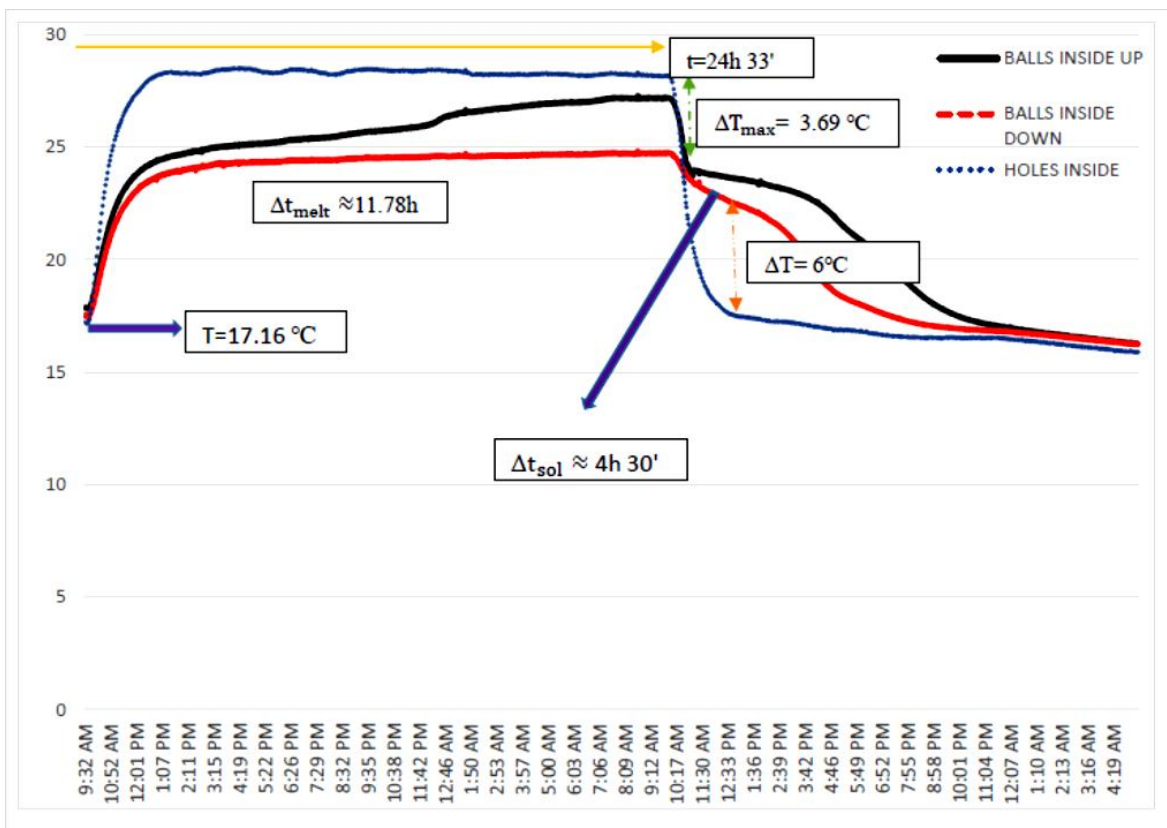


Sl. 4.2.4.4 200 W/m², temperature PCM kuglica i šupljina, izolacioni slojevi na poziciji 3

mnogo duže vremenske intervale topljenja i solidifikacije. U odnosu na maksimalnu temperaturu izolacionog sloja sa šupljinama na poziciji 2, koja je iznosila 45.2°C, (Sl. 4.2.4.3) sada je maksimalna temperatura tog sloja, na 3. poziciji, 38.7°C (Sl. 4.2.4.4). To se događa zbog toplotnih gubitaka prilikom transfera toplote kroz prethodna dva izolaciona stiroporna sloja. Sa odmicanjem izolacionog sloja impregnisanog PCM od pozicije 1 ka poziciji 5 unutar gipsanih zidova, vremenski intervali topljenja i solidifikacije su sve duži. U nekim slučajevima proces topljenja i solidifikacije se nije ni odigrao zbog nedovoljne količine toplote. Sa odmicanjem pomenutih izolacionih slojeva unutar gipsanih zidova, takođe je sve manja razlika između maksimalnih temperatura šupljina i PCM kuglica. Proces topljenja PCM materijala, tj. skladištenja latentne toplote, u donjoj zoni otpočinje

već na temperaturi 24.6°C i odvija se oko 4h 13min. Proces solidifikacije, tj. otpuštanja latentne toplote se traje približno 6 h 15min. Ciklus topljenja i očvršćavanja PCM materijala obavlja se u toku 24h, što realno odgovara ciklusu dana i noći.

A.4 Temperature PCM kuglica i šupljina, izolacioni slojevi na poziciji 4



Sl. 4.2.4.5 200 W/m², temperature PCM kuglica i šupljina, izolacioni slojevi na poziciji 4

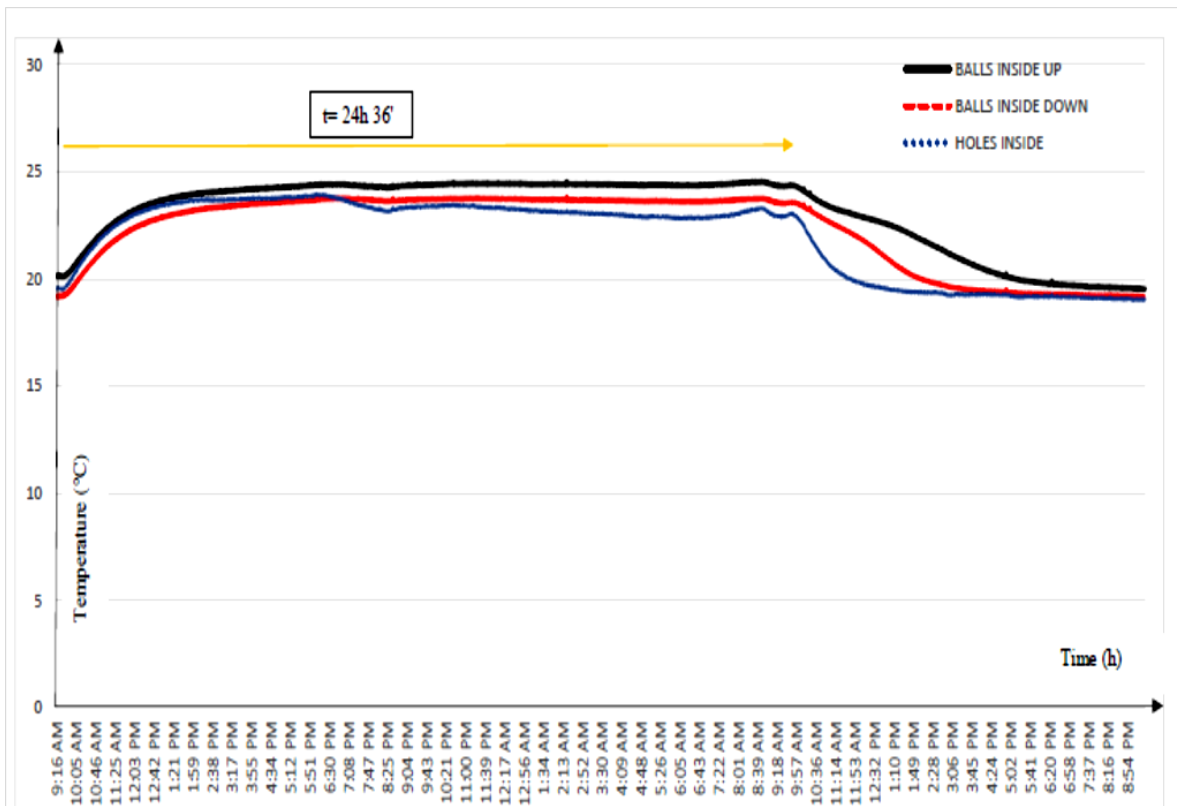
Temperatura šupljina u izolacionom sloju na poziciji 4 unutar gipsanog zida, je niža u odnosu na prethodne pozicije i dostiže ustaljenu vrijednost 27.9°C (Sl. 4.2.4.5). Vrijeme postizanja ustaljene temperature proteklo od početka grijanja, zbog velikog toplotnog otpora prethodna tri stiroporna sloja, je dugo i iznosi $\Delta t=24\text{h } 33\text{min.}$ Period topljenja i akumuliranja latentne toplote, za kuglice u donjoj zoni traje 11.78h . Tokom ovog perioda PCM materijal se topi, ali proces topljenja nije potpuno završen, pa stoga nije ni akumulirana maksimalna moguća količina latentne toplote, već samo njen dio. PCM

kuglice apsorbiraju određeni kvantum toplotne energije, ali samo trajanje ovog intervala nije primjenljivo na realne vremenske uslove. Ne može se realno očekivati konstantni toplotni fluks 200W/m^2 u toku 11.78h da bi se izvršilo topljenje, niti konstantan toplotni fluks u toku 24h 33min da bi se uspostavio toplotni balans, odn. ustaljeno stanje temperatura. U slučaju PCM kuglica u gornjoj zoni sloja interval topljenja PCM materijala je kraći. Interval solidifikacije u donjoj zoni traje 4h 30min, tokom kojeg se otpušta prethodno akumulirana količina latentne toplote. Toplotne performanse i kapaciteti PCM kuglica u ovom slučaju nijesu dovoljno iskorišćeni, jer je količina akumulirane i otpuštene latentne toplote nepotpuna. Na osnovu prethodno navedenog, zaključuje se da se za efikasnu primjenu u realnim uslovima PCM impregnisan sloj može naći maksimalno u poziciji 3. Tada, ukupni toplotni otpor R između solarnog zračenja i PCM kuglica mora biti $R < 3 \times 0.57 \text{ (m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W)} = 1.70 \text{ (m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W)}$. To znači da u datim eksperimentalnim uslovima, ne treba konstruisati zidove sa 4 i više izolacionih stiropornih slojeva, kod kojih bi se PCM kuglice našle u četvrtom ili nekom narednom izolacionom sloju.

A.5 Temperature PCM kuglica i šupljina, izolacioni slojevi na poziciji 5

Rezultati dati na Sl. 4.2.4.6 još drastičnije nego u prethodnom slučaju, ukazuju da se potpuni proces topljenja, tj. akumulacije latentne toplote nije obavio. Akumulisana je neznatna količina toplote. Sa duge strane, ovakva pozicija PCM sloja daje parametre koji nijesu primjenljivi na realne vremenske uslove i dužinu trajanja solarnog zračenja. Solarno zračenje trebalo bi da traje nerealno dugo: 24h 36min, sa 200W/m^2 , a čak i pri takvim uslovima nema očiglednog efekta topljenja.

Na jednom segmentu grafikona (Sl.4.2.4.6), tokom zagrijavanja, temperature PCM kuglica su više od temperature vazduha u šupljinama. PCM kuglice na tom segmentu apsorbiraju više senzibilne toplote, što se objašnjava činjenicom da je toplotna provodljivost PCM kuglica $\lambda_k = 0.32\text{W/m }^\circ\text{C}$ oko 12 puta veća od toplotne provodljivosti vazduha u šupljinama $\lambda_v = 0.026 \text{ W/m }^\circ\text{C}$.

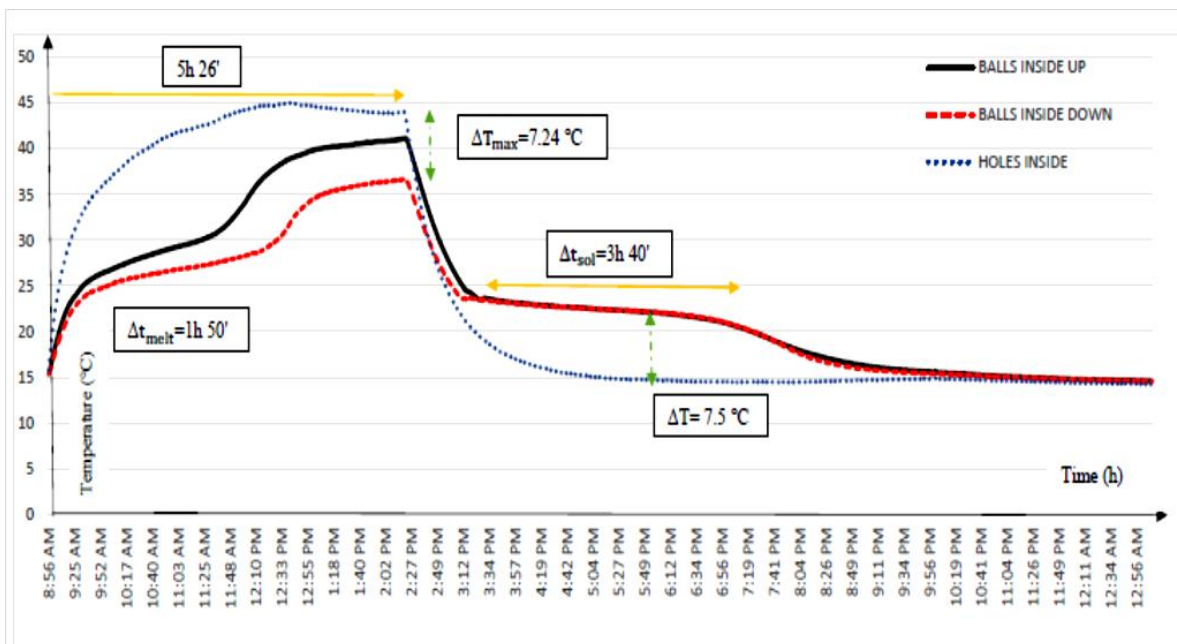


Sl. 4.2.4.6 200 W/m², temperature PCM kuglica i šupljina, izolacioni slojevi na poziciji 5

B. Toplotni fluks 160 W/m²

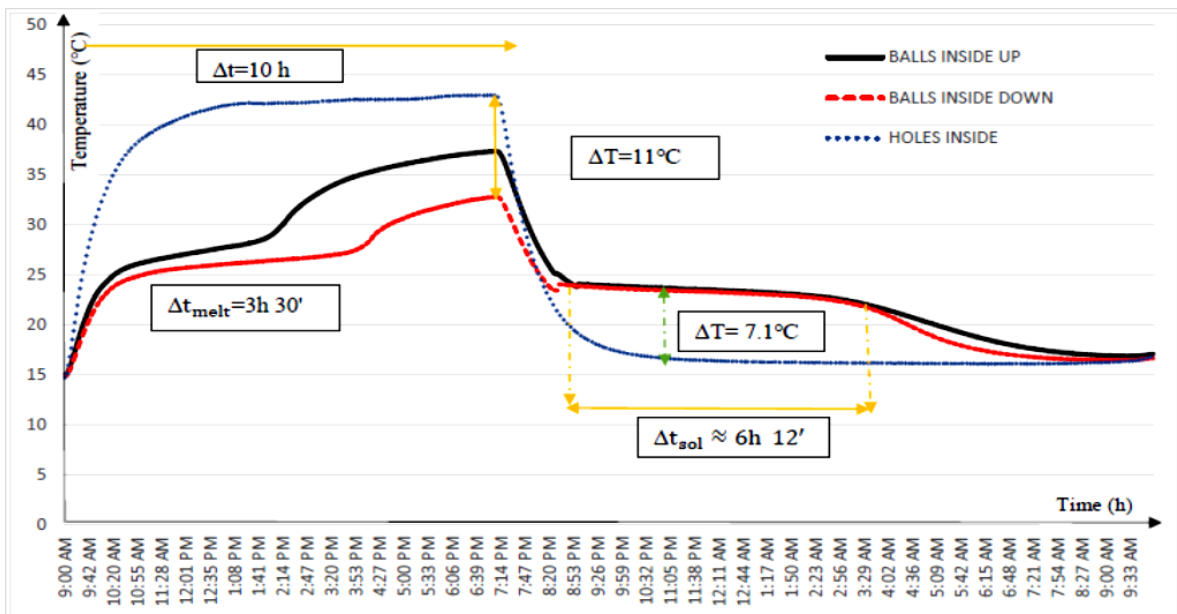
B.1 Temperature PCM kuglica i šupljina, izolacioni slojevi na poziciji 1

Za stacionarni toplotni režim i toplotni fluks od 160 W/m² (Sl. 4.2.4.7) zapaža se da se procesi topljenja i očvršćavanja PCM materijala, tj. akumuliranje i otpuštanje latentne toplote vrše u potpunosti tokom intervala trajanja oko 12h. Zbog blizine grejne folije i relativno visokog toplotnog fluksa, vrijeme topljenja PCM materijala je potpuno, ali kratkotrajno. Sa kraćim intervalom topljenja i vrijeme odlaganja porasta temperatura ("time lag" efekat) je mali.



Sl. 4.2.4.7 160 W/m², temperature PCM kuglica i šupljina, izolacioni slojevi na poziciji 1

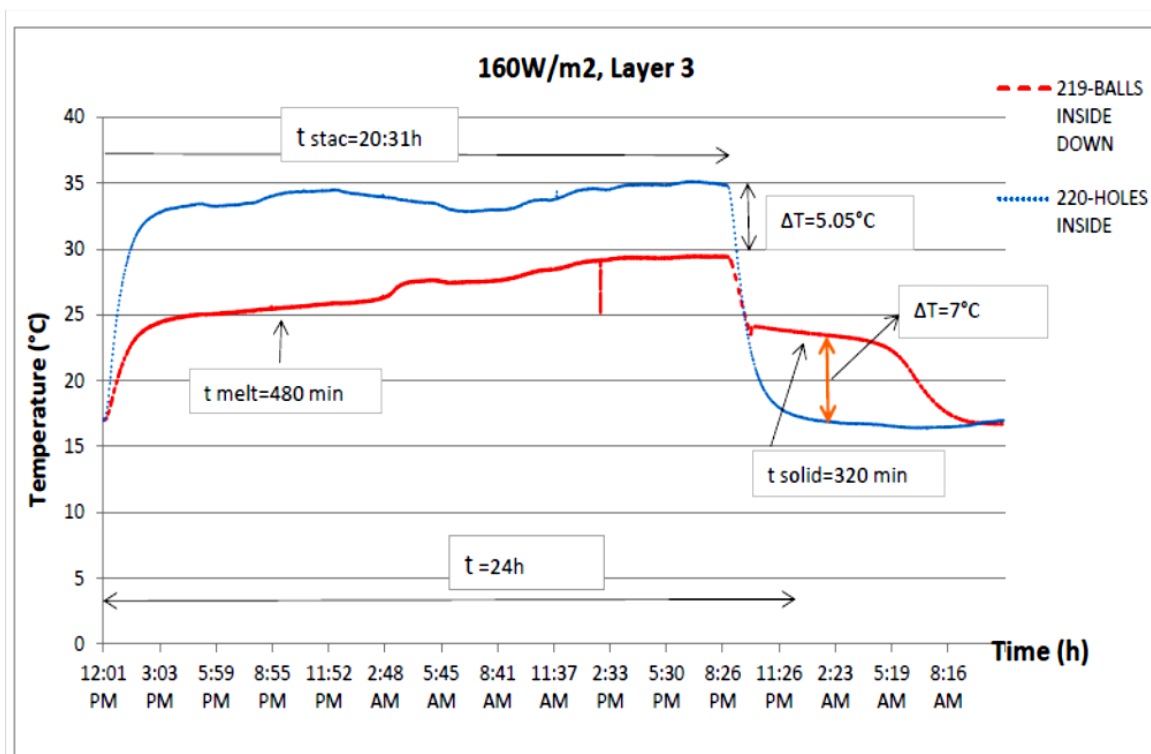
B.2 Temperature PCM kuglica i šupljina, izolacioni slojevi na poziciji 2



Sl. 4.2.4.8 160 W/m², temperature PCM kuglica i šupljina, izolacioni slojevi na poziciji 2

Za dati toplotni fluks 160 W/m^2 i sloj impregnisan PCM kuglicama na poziciji 2 (Sl. 4.2.4.8) uočava se da se prikazani vremenski intervali topljenja i očvršćavanja PCM materijala izvršavaju u potpunosti u toku dvadesetčetvoročasovnog vremenskog perioda i time odgovaraju realnim vremenskim uslovima. Parametri ΔT , Δt_{melt} i Δt_{sol} imaju vrijednosti povoljne za praktičnu primjenu. Maksimalna redukcija temperatura PCM kuglica u odnosu na šupljine ima značajnu vrijednost $\Delta T=11^\circ\text{C}$. Zbog dužeg vremena topljenja PCM materijala, izraženiji je efekat vremena odlaganja porasta temperatura, što je poželjno. Takođe, dugotrajni interval solidifikacije obezbjeđuje višu temperaturu unutrašnjosti prostorije u dužem vremenskom intervalu.

B.3 Temperature PCM kuglica i šupljina, izolacioni slojevi na poziciji 3



Sl. 4.2.4.9 160 W/m^2 , temperature PCM kuglica i šupljina, izolacioni slojevi na poziciji 3.

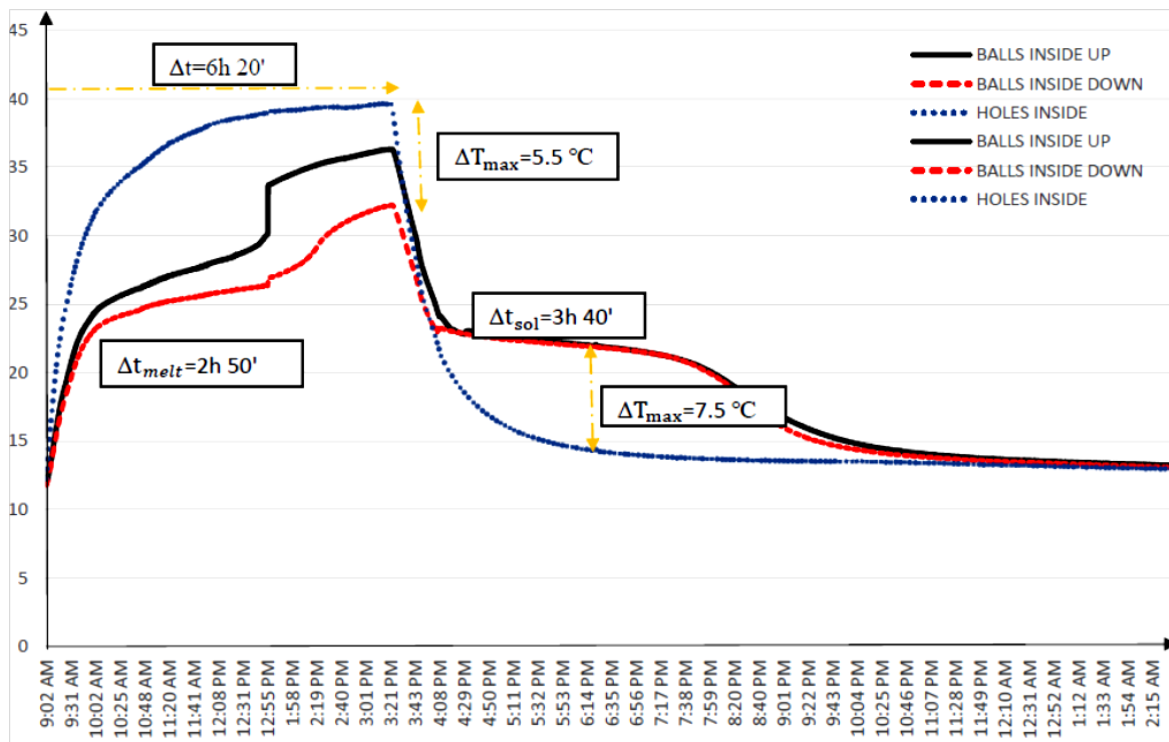
Za navedeni toplotni fluks od 160 W/m^2 i izolacioni sloj impregnisan PCM kuglicama na poziciji 3 (Sl. 4.2.4.9), ustaljena temperatura zagrijavanja se postiže tek nakon 20h 31min, što je dvostruko duži vremenski interval u odnosu na prethodni slučaj. U toku perioda topljenja, koji nije u potpunosti obavljen, akumulira se samo dio latentne toplote koju je moguće akumulirati kada je proces topljenja kompletiran. Shodno manjoj akumuliranoj toploti, biće manja i toplota odata prilikom solidifikacije, a samim tim i kraći interval solidifikacije. Stoga interval solidifikacije za poziciju 3 traje kraće vrijeme (5h 20min) u odnosu na vrijeme solidifikacije za poziciju 2 (6h 12min) u kojoj je proces topljenja izvršen u potpunosti. Stoga pozicioniranje izolacionog sloja impregnisanog PCM kuglicama na poziciju 3, nije svrsishodno i ne dovodi do punih i pravovremenih energetskih ušteda koje su nužne unutar objekata. Rezultati dobijeni za Δt_{melt} u pozicijama 4 i 5 pri 160 W/m^2 su sa toliko velikim vrednostima da nijesu realno ostvarivi u praksi, pri čemu procesi topljenja nijesu ni završeni, pa stoga nijesu ni navođeni u tekstu.

Na osnovu navedenog, za ovako zadati toplotni fluks (160 W/m^2), toplotni otpor R između solarnog zračenja i PCM kuglica treba da bude $R < 2 \times 0.57 \text{ (m}^2 \text{ °C/W)} = 1.14 \text{ (m}^2 \text{ °C/W)}$. U praksi to znači da je, za ovaj intenzitet toplotnog fluksa, energetski najisplativije i najefikasnije da se sloj impregnisan PCM kuglicama nađe maksimalno u poziciji 2. To znači da u datom zidu, pod zadatim eksperimentalnim uslovima, radi postizanja efikasnog djelovanja PCM kuglica, između solarnog zračenja i PCM impregnisanog sloja može biti maksimalno jedan izolacioni sloj sa stiroporom.

C. Toplotni fluks 120 W/m^2

C.1 Temperature PCM kuglica i šupljina, izolacioni slojevi na poziciji 1

Rezultati prikazani na Sl. 4.2.4.10, za slučaj toplotnog fluksa 120 W/m^2 i izolacioni sloj impregnisan PCM kuglicama na poziciji 1, ukazuju da se režimi topljenja i očvršćavanja u potpunosti izvršavaju u vremenskom intervalu nešto dužem od 12h.

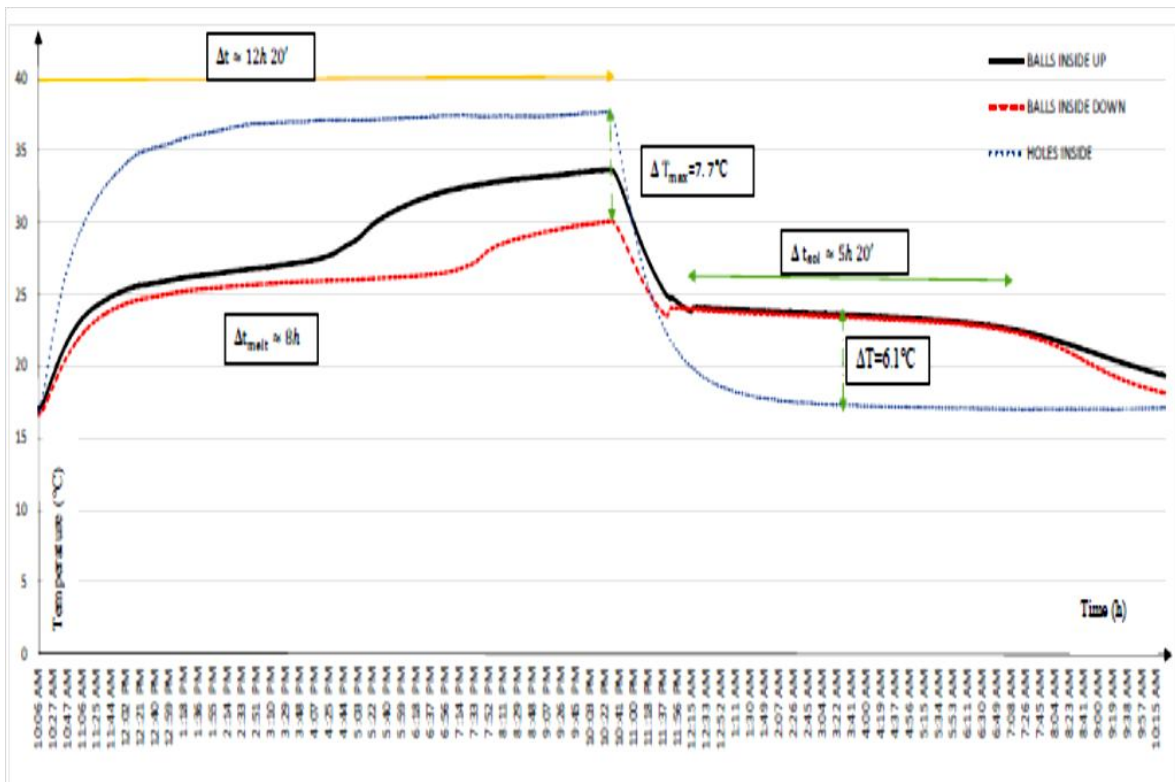


Sl. 4.2.4.10 120 W/m², temperature PCM kuglica i šupljina, izolacioni slojevi na poziciji 1.

C.2 Temperature PCM kuglica i šupljina, izolacioni slojevi na poziciji 2

Rezultati prikazani na Sl.4.2.4.11, za slučaj toplotnog fluksa 120W/m² i izolacioni sloj impregnisan PCM kuglicama na poziciji 2, ukazuju da se režimi topljenja i očvršćavanja u potpunosti izvršavaju u vremenskom intervalu oko 24h., što odgovara realnim vremenskim uslovima.

Mjerni rezultati dobijeni za Δt_{melt} u narednim pozicijama 3,4 i 5 pri 120W/m² pokazali su da se proces topljenja ne završava, odn. da PCM materijal ne obavlja svoju namjensku funkciju, pa stoga nijesu navedeni. Zaključak je da, u slučaju toplotnog fluksa 120W/m², toplotni otpor između solarnog zračenja i PCM kuglica mora biti $R < 2 \times 0.57$ (m² °C/W)=1.14 (m² °C/W), odn. da u datom zidu može biti maksimalno jedan izolacioni sloj sa stiroporom između solarnog zračenja i PCM impregnisanog sloja.

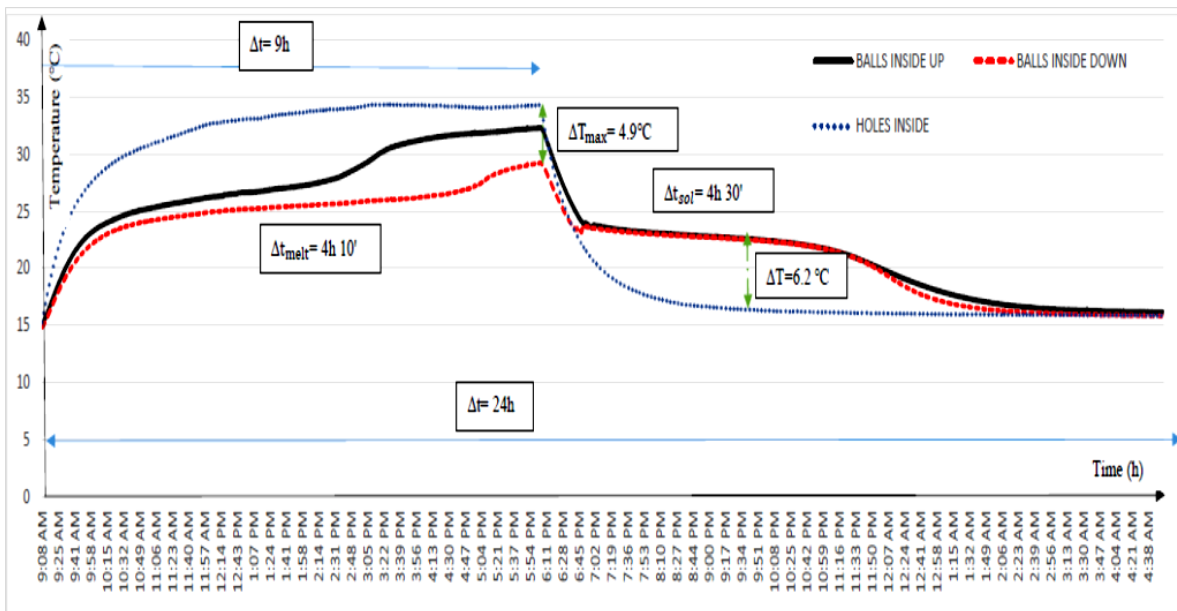


Sl. 4.2.4.11 120 W/m², temperature PCM kuglica i šupljina, izolacioni slojevi na poziciji 2.

D. Toplotni fluks 80 W/m²

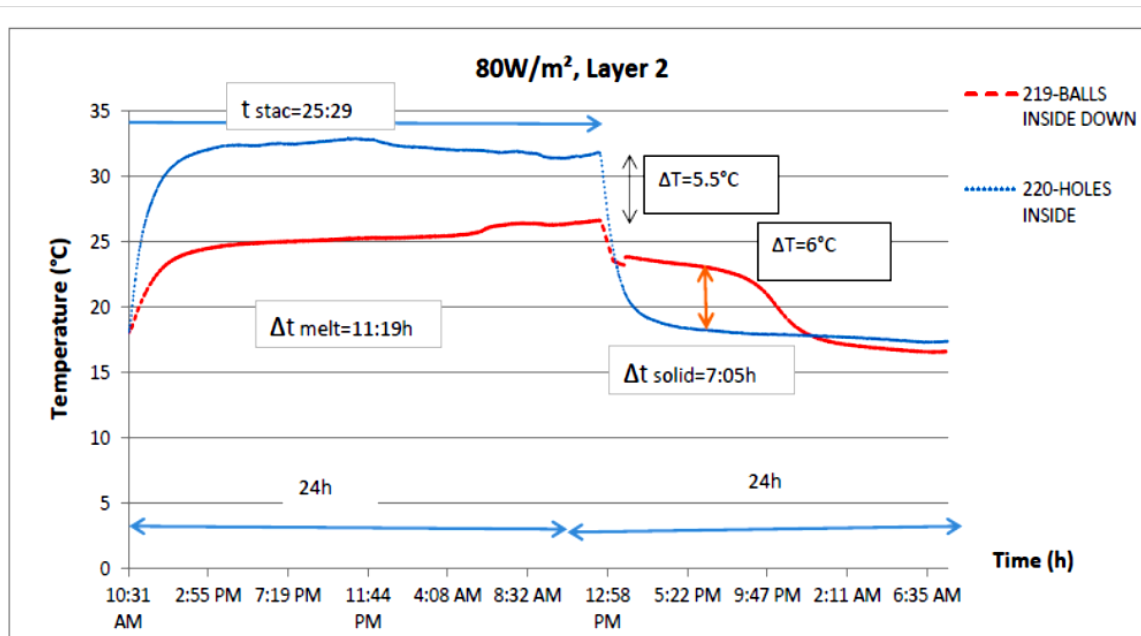
D.1 Temperature PCM kuglica i šupljina, izolacioni slojevi na poziciji 1

Za zadati toplotni fluks grejne folije od 80 W/m², intervali topljenja i očvršćavanja PCM materijala se izvršavaju u potpunosti za vremenski interval u trajanju oko 18h (Sl. 4.2.4.12). Vremena topljenja i očvršćavanja, u toku kojih su temperature približno konstantne, su dovoljno duga da bi se ostvario željeni temperaturni komfor.



Sl. 4.2.4.12 80 W/m², temperature PCM kuglica i šupljina, izolacioni slojevi na poziciji 1.

D.2 Temperature PCM kuglica i šupljina, izolacioni slojevi na poziciji 2



Sl. 4.2.4.13 80 W/m², temperature PCM kuglica i šupljina, izolacioni slojevi na poziciji 2

Sa Sl. 4.2.4.13 se zapaža da se ciklus topljenja i očvršćavanja PCM sadržaja unutar PCM kuglica obavlja u intervalu nešto kraćem od 48h. To ne odgovara dvadestčetvoročasnom ciklusu dana i noći, odn. dobijeni rezultati nemaju praktičnu primjenu. Vrijeme topljenja 11.78h traje predugo u odnosu na realne vremenske uslove. Na osnovu ovakvih rezultata, zaključuje se da je postavljanje izolacionog sloja sa PCM kuglicama u poziciju 2 neopravdano i da ne daje odgovarajuće benefite sa aspekta toplotnog komfora. Zaključuje se da je radi efikasnog ispoljavanja djelovanja PCM kuglica, pod ovim eksperimentalnim uslovima, neophodno da se izolacioni sloj impregnisan PCM kuglicama nađe u poziciji 1, tj. neposredno pored grejnog filma. Time bi, za dati slučaj, toplotni otpor R između solarnog zračenja i PCM kuglica trebao da bude manji od toplotnog otpora samo jednog stiropornog sloja, tj. $R < 0.57 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$.

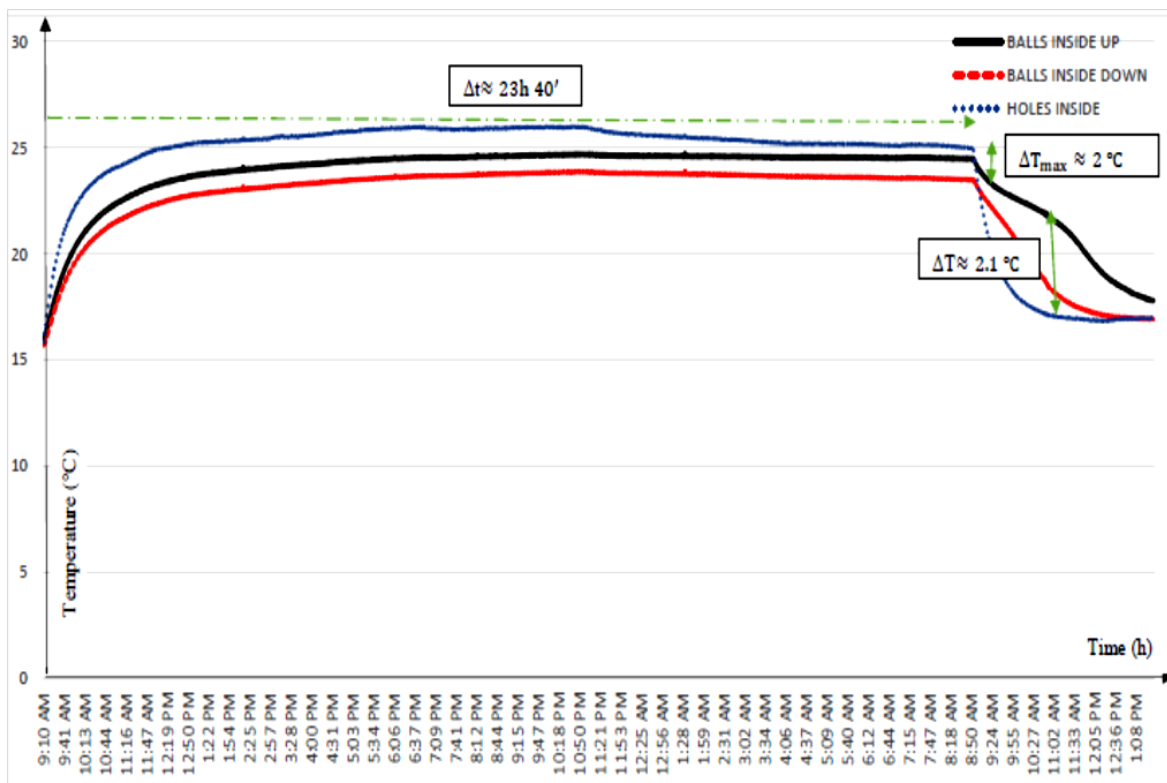
U pozicijama 3,4 i 5 dobijaju se još gore karakteristike PCM materijala u odnosu na poziciju 2, pa stoga nijesu posebno ni razmatrani.

E. Toplotni fluks 40 W/m²

E.1 Temperature PCM kuglica i šupljina, izolacioni slojevi na poziciji 1

Pri toplotnom fluxu od 40 W/m² (Sl. 4.2.4.14) proces topljenja traje izuzetno dugo 23h 40min, nije očigledan, niti se završava. Akumulirana latentna toplota je mala, a samim tim i otpuštena toplota u toku režima očvršćavanja. Postoji neznatna redukcija temperature u PCM kuglicama i u gornjem i u donjem dijelu izolacionog sloja u odnosu na temperaturu šupljina. PCM svojim prisustvom snižava temperaturu izolacionog sloja u odnosu na izolacioni sloj sa šupljinama svega oko 2°C. Zbog male akumulirane latentne toplote postoji kratkotrajni proces solidifikacije sa redukcijom temperature $\Delta T = 2.1^\circ\text{C}$.

PCM se u razmatranom slučaju može smatrati nefunkcionalnim, jer njegova uloga i eventualna primjena u regulisanju temperature prostorije ne dolaze do izražaja. Zaključuje se da za ovako zadatu solarnu radijaciju, odn. toplotni fluks od 40 W/m², sloj sa PCM kuglicama nije djelotvoran.



Sl. 4.2.4.14 40 W/m², temperature PCM kuglica i šupljina, izolacioni slojevi na poziciji 1

4.2.5 Ispitivanje uticaja tranzijentnog toplotnog režima na PCM materijale

Tranzijentni toplotni režim podrazumijeva promjenljivu količinu toplote koju emituje grejna folija, a sa ciljem da se što uspješnije simulira 24 časovna (dan/noć) promjena temperature okoline. Promjena emitovanog fluksa vrši se promjenom napona na naponskom generatoru kojim se napaja grejna folija.

Simulirana je promjena 24 časovne temperature (dan i noć) u toku ljetnjeg perioda (Sl. 4.2.5.1). Zagrijavanje je počelo u 7:56 AM, pri početnoj temperaturi ambijenta 18.4 °C kada je uključena grejna folija pri 120W/m², a završilo se poslije Δt=5:52h, tj. u 1:52 PM pri toplotnom fluksu 240W/m². U periodu od 7:56 AM do 1:52 PM toplotni fluks se

podešava u 4 tačke u opsegu $(120\div 240)\text{W/m}^2$, sa porastom fluksa u skokovima od 40W/m^2 . Maksimalna temperatura se dostiže u 1:52PM.

Na intervalu 1:52PM do 7:00PM ($\Delta t=5:08\text{h}$) pristupilo se hlađenju ispitivanih izolacionih zidova, putem smanjivanja toplotnog fluksa (odn. napona) u 6 tačaka (tačke 5÷10 na Sl. 4.2.5.1). Opseg promjene fluksa je od $(240\div 0)\text{W/m}^2$, sa sniženjem fluksa u skokovima od 40W/m^2 . Nakon isključenja grijanja (tačka 10), temperatura vazduha u šupljinama opada do temperature ambijenta, a PCM materijal dostiže temperaturu na kojoj počinje proces kristalizacije, tokom kojeg odaje prethodno akumuliranu latentnu toplotu. Veći broj tačaka (6), u kojima se skokovito smanjuje toplotni fluks prilikom hlađenja, uzet je da bi se dobio strmiji eksponencijalni pad temperature pri hlađenju, odn. da bi se realnije simulirao proces hlađenja.

U Tabeli 4.1 date su promjene toplotnog fluksa i napona napajanja u toku intervala zagrijavanja i hlađenja.

Tabela 4.1 Tabela promjene toplotnog fluksa i napona napajanja grejne folije u toku zagrijavanja i hlađenja

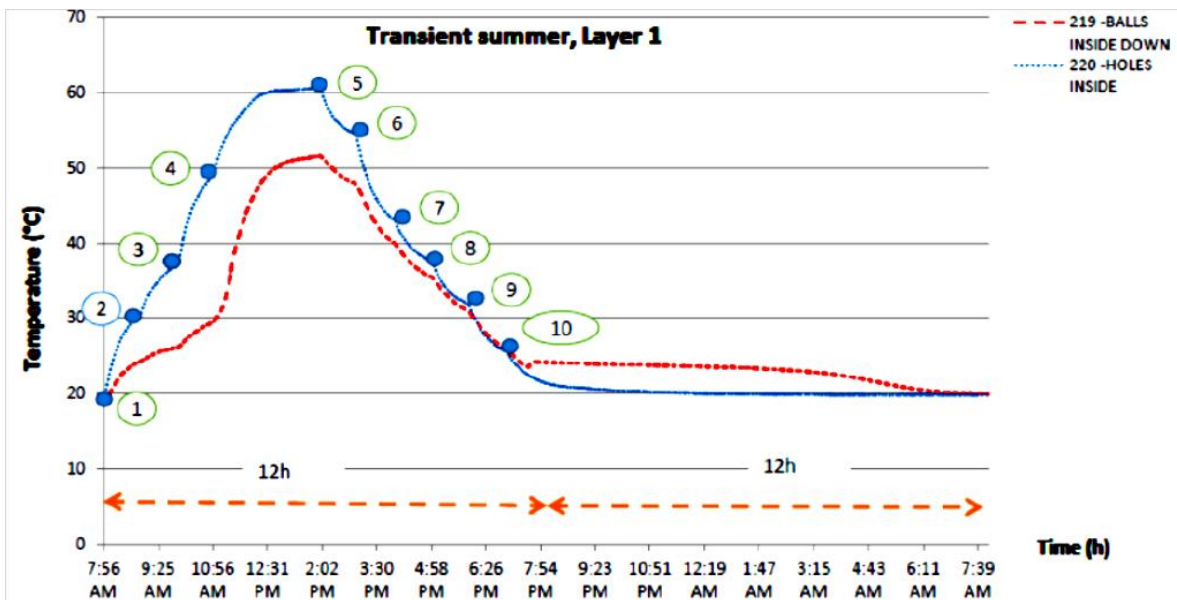
	ZAGRIJAVANJE				HLAĐENJE					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TF(W/m ²)	120	160	200	240	200	160	120	80	40	0
U(V)	159	183	205	228	205	183	159	130	92	0

U analizi su ramatrane temperaturne karakteristike slojeva sa šupljinama i PCM kuglicama u pozicijama 1 i 3.

A. Tranzijentni toplotni fluks

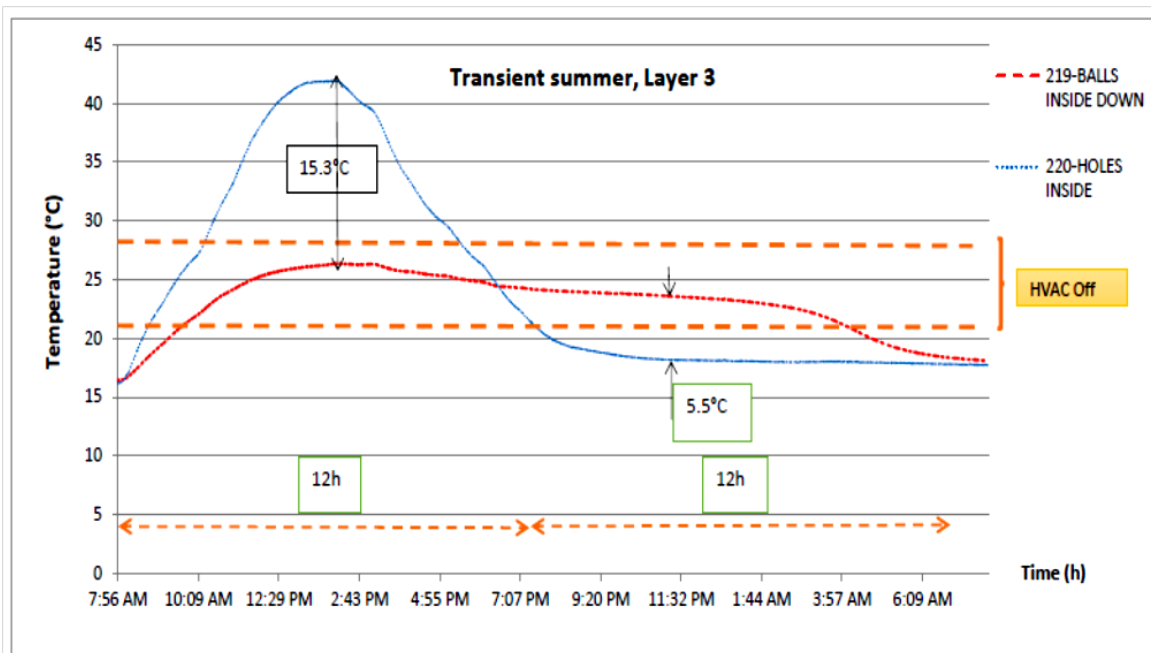
A.1 Temperature PCM kuglica i šupljina, izolacioni slojevi na poziciji 1

Na Sl. 4.2.5.1 prikazane su temperature PCM kuglica i šupljina lociranih u poziciji 1, pri tranzijentnom toplotnom režimu.



Sl. 4.2.5.1 Tranzijentni toplotni fluks, temperature PCM kuglica i šupljina, izolacioni slojevi na poziciji 1

A.2 Temperature PCM kuglica i šupljina, izolacioni slojevi na poziciji 3



Sl. 4.2.5.2 Tranzijentni toplotni fluks, temperature PCM kuglica i šupljina, izolacioni slojevi na poziciji 3

U prvih 12h simulirana je promjena spoljašnjeg toplotnog fluksa u toku ljetnjeg dana. Nakon 12 časova prekidano je grijanje toplotnom folijom u cilju simulacije noćnog režima.

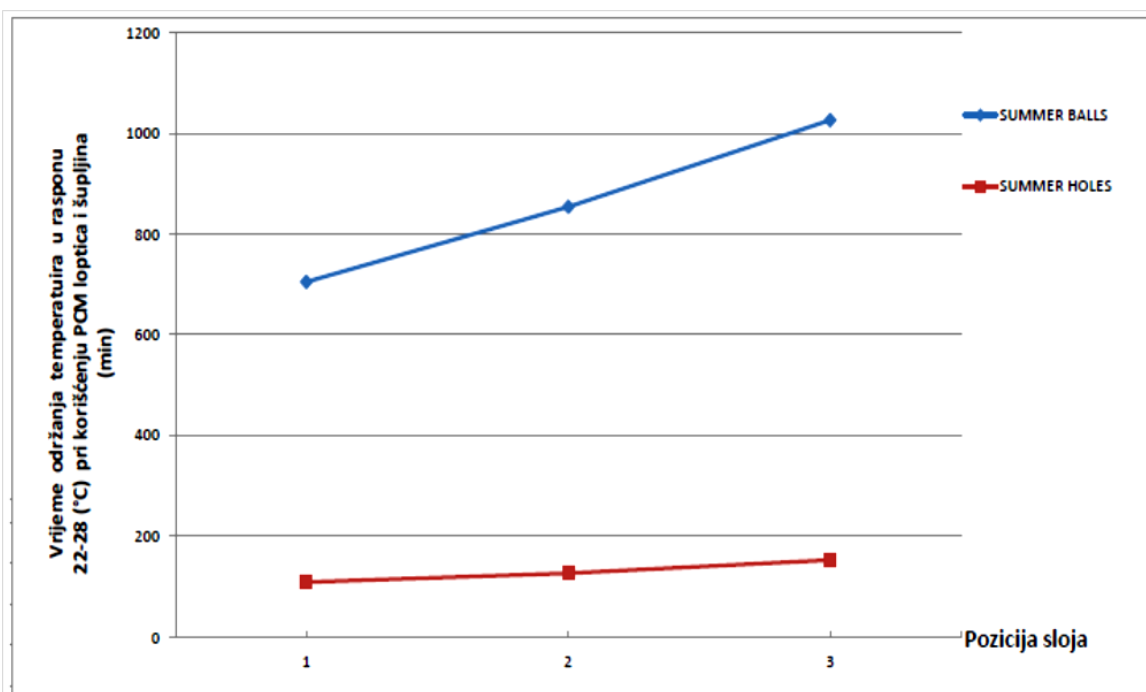
Očigledno da je u sloju PCM na poziciji 3 (Sl. 4.2.5.2), zbog dva prethodna stiroporna sloja, duže vrijeme topljenja u odnosu na poziciju 1 (Sl. 4.2.5.1), usljed čega je i veća redukcija temperature u ustaljenom režimu zagrijavanja. Daljim postavljanjem sloja sa PCM kuglicama u pozicije 4 i 5 proces topljenja se ne uspijeva završiti, a samim tim neće biti dovoljno odate toplote pri solidifikaciji, od. neće biti egikasnog djelovanja PCM materijala u kuglicama. Zato, analiza sloja sa PCM kuglicama u tim pozicijama nije od interesa.

Veća redukcija temperature tokom solidifikacije u poziciji 3 nastala je zbog niže ambijentalne temperature ($T_a=16\text{ }^{\circ}\text{C}$) u odnosu na poziciju 1 ($T_a=20\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Ocjena uticaja pozicija slojeva sa PCM kuglicama na temperaturu prostorije, za slučaj tranzijentnih režima kojima se simulira solarno zračenje, od bitnog je značaja radi ocjene efikasnosti djelovanja PCM. Ocjena efikasnosti djelovanja PCM je izvršena analizom trajanja vremenskog intervala u toku koga je razmatrani PCM sloj u mogućnosti da održava temperaturu u nekom zadatom opsegu bez uključivanja HVAC (Heating, Ventilation, Air Conditioning) sistema, tj. kada je HVAC Off [112].

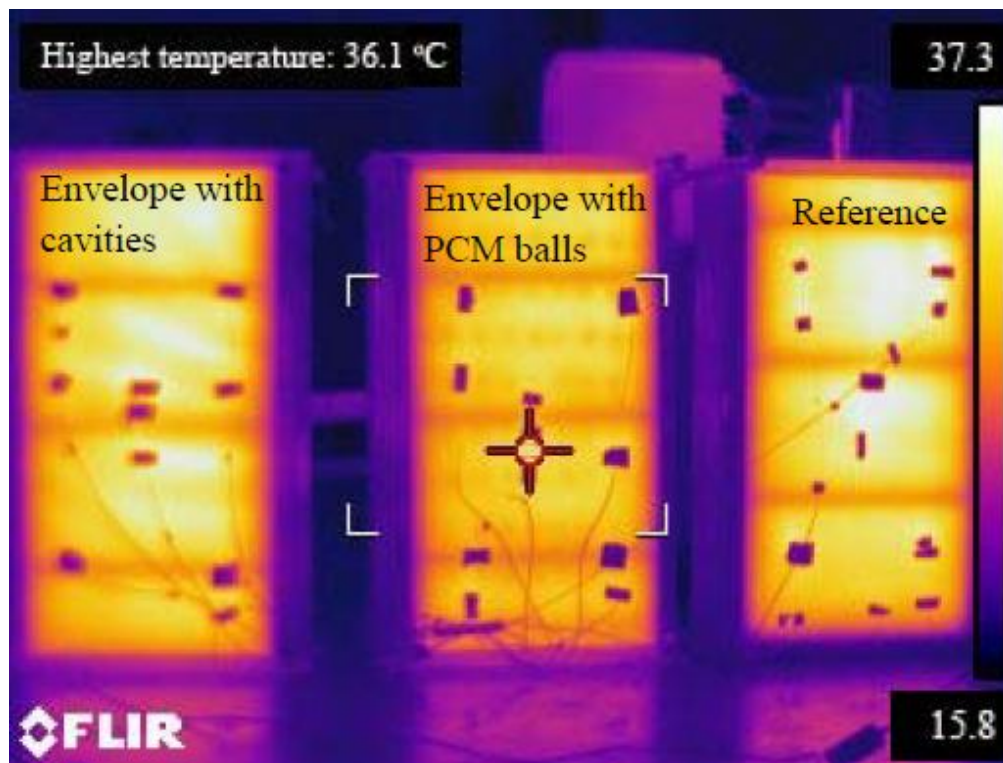
Uzet je proizvoljan temperaturni opseg $\Delta T=(22\div 28)^{\circ}\text{C}$ u okviru koga treba održavati temperaturu prostorije (Sl. 4.2.5.2). Nađeni su vremenski intervali u okviru kojih nije potrebno uključivati HVAC (HVAC Off) za dva slučaja: za sloj sa PCM kuglicama i sloj sa šupljinama. Analiza vremena održanja temperatura u rasponu $(22\div 28)^{\circ}\text{C}$ pri korišćenju PCM kuglica i šupljina u finkciji pozicije sloja data je na Sl. 4.2.5.3. Sa PCM kuglicama u poziciji 1, vrijeme bez uključenosti sistema HVAC je 705min (11.75h), dok za istu poziciju sa šupljinama ovo vrijeme iznosi 109min (1.82h). Znači, u toku 24h, sa omotačem sa PCM kuglicama u prvom sloju, temperatura prostorije bez uključivanja HVAC se održava 49% ($=11.75/24\text{ }%$) vremena, a bez PCM kuglica 7.6% ($=1.82/24\text{ }%$) vremena.

Sa Sl.4.2.5.3 je očigledno da daljim pomjeranjem slojeva u pozicije 2 i 3 uticaj PCM kuglica postaje sve veći, odn. Δt_{melt} postaje sve duže. Samim tim produžava se vrijeme za koje nije potrebno angažovanje HVAC-a. Tako, za položaj PCM kuglica u poziciji 3 vrijeme održavanja zadanog opsega temperatura pomoću PCM sloja iznosi 1026 min (17.1h), a za šupljine u istoj poziciji vrijeme je 153min (2.55h). Za ovaj slučaj, u toku 24h, sa PCM kuglicama temperatura prostorije bez uključivanja HVAC se održava 71.2%, a bez PCM kuglica 10.6% vremena. Navedeni podaci o korišćenju HVACa, govore o doprinosu primjene PCM kuglica u smislu uštede energije, odn. doprinosu energetske efikasnosti u zagrijavanju i hlađenju u okviru prostorija objekta. Znajući snagu HVAC sistema (kWh) i cijenu 1kWh može se izračunati konkretna ušteda u novcu na dnevnom, mjesečnom ili godišnjem nivou pri primjeni PCM kuglica.

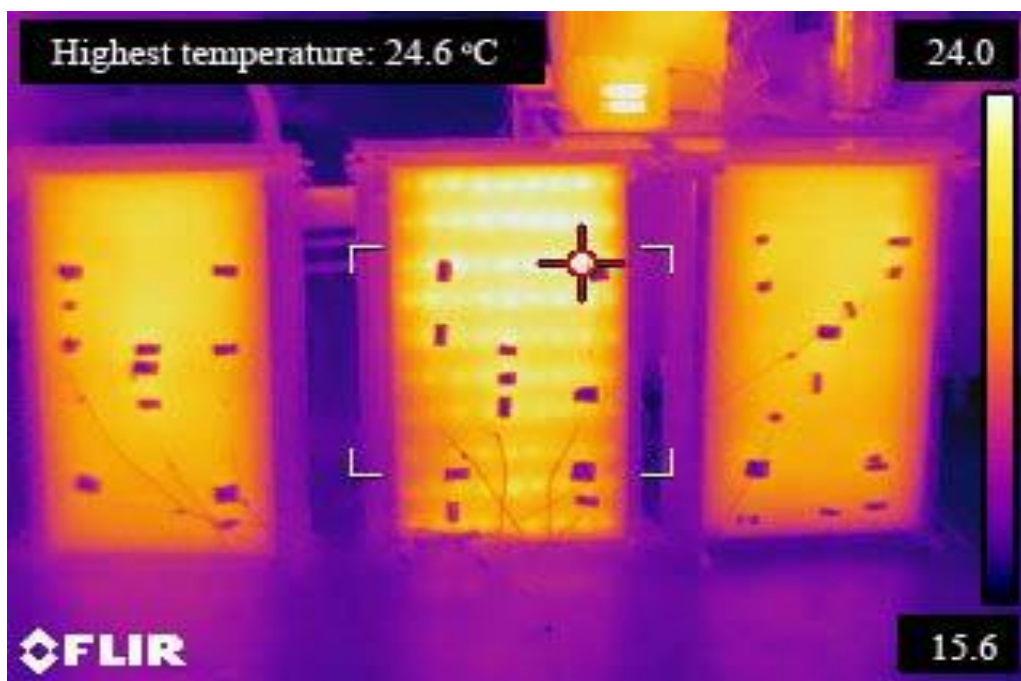


Sl. 4.2.5.3 Vrijeme održavanja temperatura u rasponu (22÷28) °C, pri korišćenju PCM kuglica i šupljina (HVAC Off), u funkciji pozicije sloja

Naravno, zadavanjem drugog temperaturnog opsega dobijaju se druge vrijednosti isključenosti sistema HVAC, ali ostaje neosporna prednost korišćenja izolacije sa PCM kuglicama u odnosu na izolaciju bez njih.



Sl. 4.2.5.4 Termoviziski foto snimak za proces zagrijavanja



Sl. 4.2.5.5 Termoviziski foto snimak za proces hlađenja

Na slikama 4.2.5.4 i 4.2.5.5 prikazane su površinske raspodjele temperatura za tri testirana izolaciona zida u toku procesa grijanja i hlađenja, respektivno. Sa snimaka se jasno očitava redukcija temperatura unutrašnje gipsane ploče (okrenute prostoriji) prilikom procesa topljenja PCM materijala u kuglicama (Sl. 4.2.5.4), odn. povećanje temperature prilikom procesa solidifikacije PCM materijala (Sl. 4.2.5.5).

U toku procesa grijanja, temperature unutrašnje gipsane ploče kod referentnog i zida sa šupljinama su veće od temperature gipsane ploče zida sa PCM šupljinama (Sl.4.2.5.4). Razlog leži u činjenici da je kod zida sa PCM kuglicama, u procesu zagrijavanja toplota apsorbirana kao latentna toplota bez odavanja u prostoriju, što snižava temperaturu toga zida (na termovizijskom foto snimku je tamnija boja, tj niža temperatura, zida sa PCM kuglicama u odnosu na boje referentnog i zida sa šupljinama).

Pri procesu hlađenja u PCM kuglicama se odvija proces solidifikacije, očvrćavanja PCM materijala u kuglicama, tokom koga se odaje toplota koja povećava temperaturu zida, odn. unutrašnjeg gipsanog zida omotača (na termovizijskom foto snimku na Sl. 4.2.5.5 zid sa PCM kuglicama ima jasno izraženu višu temperaturu, odn. svjetliju boju, u odnosu na boje referentnog i zida sa šupljinama).

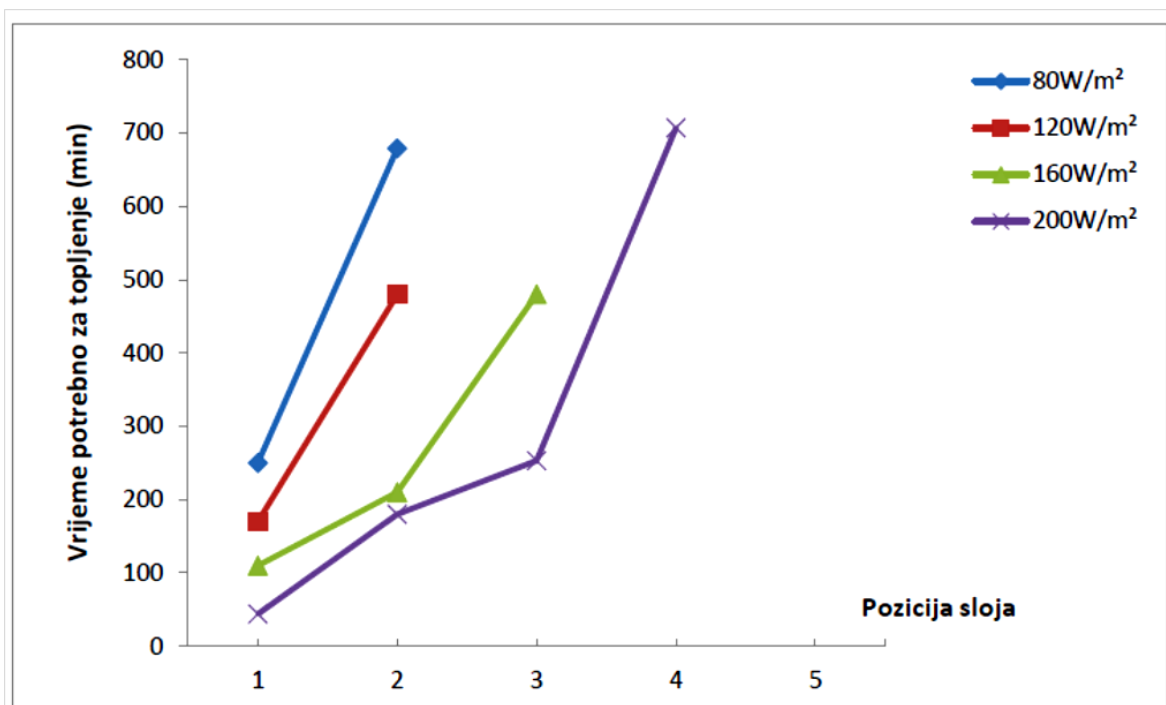
Horizontalne trake sa tamnijom bojom, koje se uočavaju na termovizijskim foto snimcima, prouzrokovane su pomenutim neuniformnim zračenjem grejne folije.

4.2.6 Analiza rezultata

Analizu rezultata, za slučaj stacionarnih toplotnih režima pri različitim konstantnim toplotnim fluksevima, izvršićemo na osnovu sintetizovanih rezultata datih na dijagramima na slikama 4.2.6.1÷4.2.6.5.

Na Sl. 4.2.6.1 prikazano je vrijeme potrebno da se obavi proces topljenja u PCM kuglicama, za slučaj kada su PCM izolacioni slojevi locirani na pozicijama 1 do 5. U toku prethodno navedene serije eksperimenata, konstatovano je da se proces završetka,

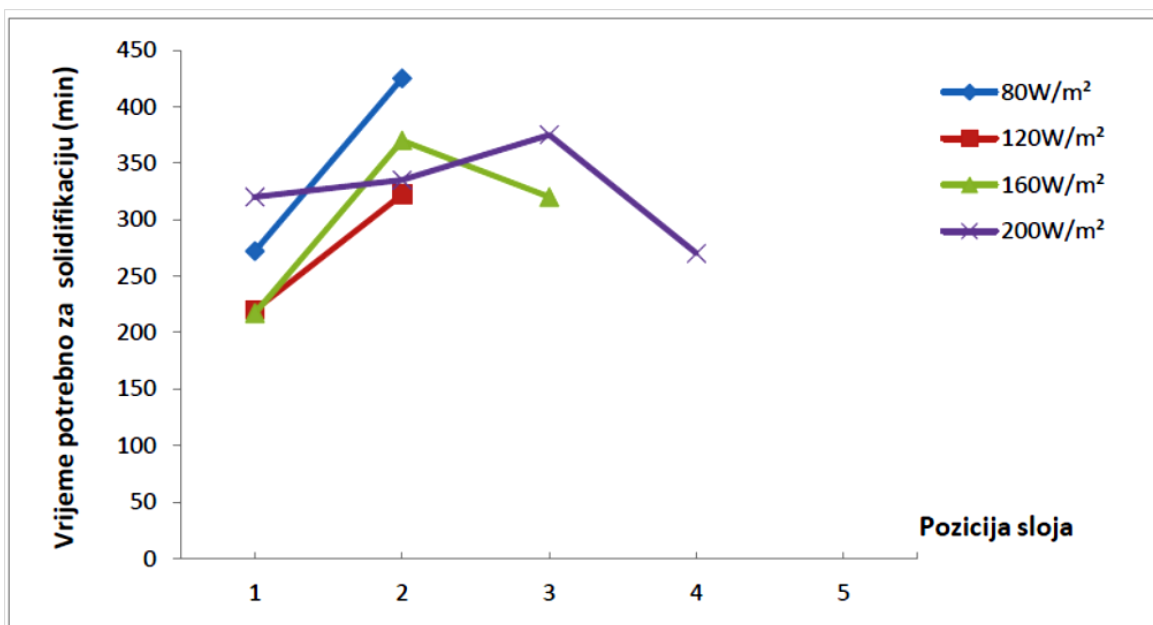
kompletiranja topljenja, tj. potpune akumulacije latentne toplote, ne događa ni za jednu uzetu vrijednost toplotnog fluksa kada je PCM sloj lociran u poziciji 5.



Sl. 4.2.6.1 Vrijeme potrebno za topljenje u PCM kuglicama, pri različitim pozicijama i nivoima toplotnog fluksa

Vrijeme procesa topljenja raste kako se PCM sloj pomjera od pozicije 1 do pozicije 4. Kao što se vidi sa Sl. 4.2.6.1, pozicija 1 je nabliza grejnoj foliji, pa se vrijeme završetka topljenja povećava sa povećanjem termalnog otpora između PCM kuglica i grejne folije. Štaviše, proces topljenja nije očigledan kada je toplotni fluks 40W/m^2 , čak ni za poziciju 1. Slično tome, proces topljenja se nije mogao završiti u PCM kuglicama u sloju na poziciji 3 pri toplotnim fluksevima manjim od 160W/m^2 (tj. za 120W/m^2 i 80W/m^2) kada je termalni otpor $R=1.14\text{ (m}^2\text{ °C)/W}$. Takodje proces topljenja nije okončan ni u poziciji 4 sa toplotnim fluksom manjim od 200W/m^2 . Za sve nivoe razmatranog toplotnog fluksa beskorisno je PCM sloj stavljati u poziciju 5, gdje je termalni otpor stiropornih slojeva između PCM kuglica i grejne folije $R= 4 \times 0.57\text{ (m}^2\text{ °C)/W} = 2.28\text{ (m}^2\text{ °C)/W}$.

Dijagrami na Sl. 4.2.6.2 pokazuju vrijeme neophodno da se završi proces solidifikacije kada se izolacioni sloj nalazi u pozicijama 1 do 5. Ako nema topljenja PCM materijala u kuglicama, tj. apsorpcije latentne toplote, nema ni solidifikacije, odn. otpuštanja toplote. Sa Sl. 4.2.6.2 se vidi, da za razliku od vremena topljenja, vrijeme solidifikacije u početku raste, a kasnije opada.



Sl. 4.2.6.2 Vrijeme potrebno za solidifikaciju u PCM kuglicama, pri različitim pozicijama i nivoima toplotnog fluksa

Toplota topljenja se putem kondukcije prenosi u jednom pravcu, od toplijeg ka hladnijem tijelu, tj. od grejne folije ka izolacionim slojevima. Oslobođena toplota prilikom solidifikacije se putem zračenja prenosi u oba pravca, ka spolja i unutra. U periodu solidifikacije grejna folija nije uključena, pa su obje gipsane ploče izolacionog zida na nižoj temperaturi od PCM kuglica, tj. gipsane ploče imaju temperaturu ambijenta. Sa aspekta zračenja toplote u unutrašnjost prostorije tokom solidifikacije, bolje je da je PCM sloj što bliže unutrašnjosti prostorije.

Kada je sloj sa PCM u poziciji 1, prema unutrašnjoj prostoriji postoje četiri stiroporna sloja, a prema spoljnjem prostoru ih nema. Zato u poziciji 1 otpuštena toplota ide

skoro sva prema spoljašnjem gipsanom zidu, odn. prema spoljašnjosti. Razlog je što je toplotni otpor gipsane ploče svega $R_g=L_g/\lambda_g=0.008/0.2=0.04$ ($m^2 \text{ }^\circ\text{C}/W$), pri čemu je skoro petnaest puta manji od toplotnog otpora jednog sloja stiropora, a oko šestdeset puta manji od toplotnog otpora četiri sloja stiropora koji su na putu toplotnog transfera zračenjem prema unutrašnjosti prostorije. Zato je pozicija 1 dobra za slučaj kada su u pitanju noći sa visokim temperaturama, jer se transfer oslobođene toplote zračenjem vrši prema spoljnoj sredini. Za ljetnji period je poželjna pozicija 1, jer se tokom dana upijena sunčeva toplota vraća spoljašnjoj sredini tokom noći. Generalno, sa aspekta odate toplote, bolje je koristiti u ljetnjim periodima PCM locirane što bliže izvoru sunčevog zračenja, Analogno, u zimskom periodu bolje je imati PCM slojeve locirane što bliže unutrašnjosti prostorije, kako bi se prilikom solidifikacije opuštalala toplota u prostoriju.

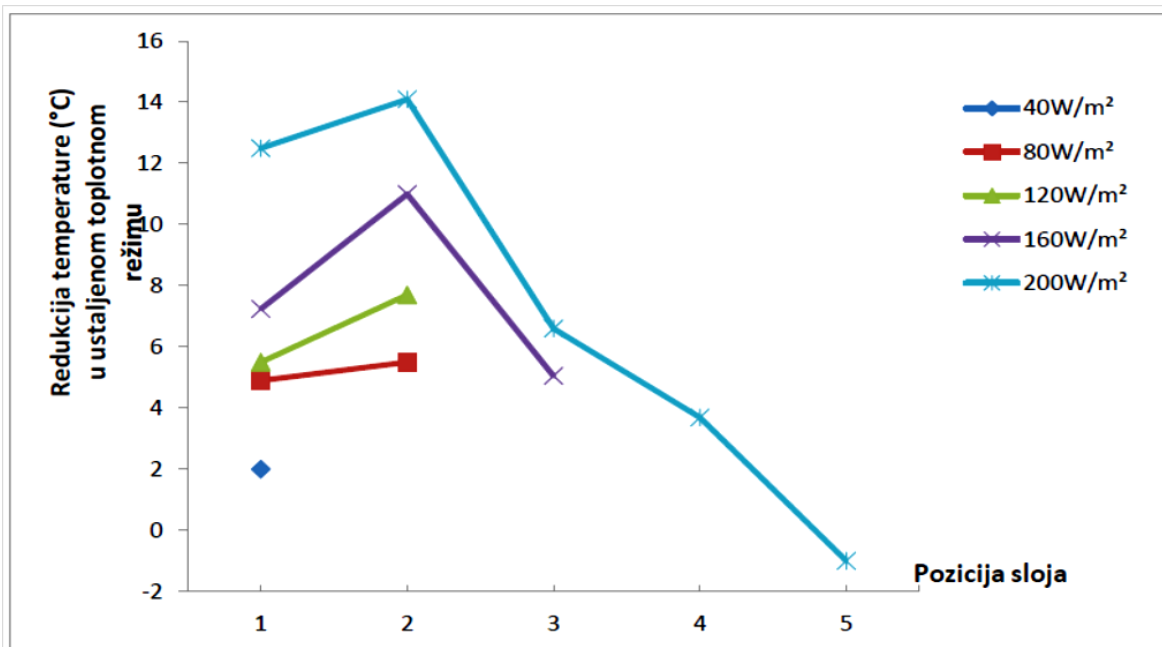
U poziciji 2 (Sl. 4.2.6.2), za sva četiri razmatrana toplotna fluksa, vrijeme solidifikacije, tj. otpuštanja toplote zračenjem raste, jer toplotni fluks treba da savlada toplotni otpor jednog stiropora prema spoljašnjosti i 3 prema unutrašnjosti prostorije.

Teorijski, proces otpuštanja toplote najduže traje u poziciji 3, kada trebaju da se savladaju toplotni otpori i prema spolja i prema unutra. Odstupanje od ove teorijske premise zapaža se slučaju toplotnog fluksa $160W/m^2$ (Sl.4.2.6.2), gdje vrijeme solidifikacije opada. Objašnjenje ove pojave je dato u eksperimentalnim rezultatima, a sastoji se u tome da je vrijeme solidifikacije skraćeno zbog manje količine akumulirane toplote tokom nepotpunog procesa topljenja.

U poziciji 4, toplotni otpor prema unutrašnjosti je manji, pa se vrijeme otpuštanja toplote smanjuje. U poziciji 5 bi se sva toplota PCM kuglica otpuštala prema unutrašnjosti prostorije, ali iz navedenih razloga (slabo topljenje) ova pozicija, nije za primjenu.

Na Sl. 4.2.6.3 prikazana je redukcija temperatura PCM kuglica u odnosu na šupljine, pri postignutoj ustaljenoj temperaturi, za različite pozicije i nivoe toplotnog fluksa.

Generalno, sa porastom nivoa grijanja, tj. toplotnog fluksa, raste temperaturna razlika između šupljina i PCM kuglica što se jasno vidi na Sl. 4.2.6.3. Razlog je što sa povećanjem toplotnog fluksa raste ustaljena temperatura šupljina.



Sl.4.2.6.3 Redukcija temperatura PCM kuglica u odnosu na šupljine, pri postignutoj ustaljenoj temperaturi, za različite pozicije sloja i nivoje toplotnog fluksa.

Sa udaljavanjem slojeva sa šupljinama i PCM kuglicama od grejne folije (pozicije 3,4 i 5) opada toplotni fluks u šupljinama, a sa njime i ustaljena temperatura u njima, pa je time i redukcija ΔT temperatura sve manja. Izuzetak za sva četiri nivoa toplotnog fluksa čini pozicija 2, u kojoj je još uvijek relativno velika ustaljena temperatura šupljina, ali i duže vrijeme topljenja PCM nego u sloju 1. To rezultira temperaturnim ekvilibrijumom u kome je ΔT veće u poziciji 2 nego u poziciji 1.

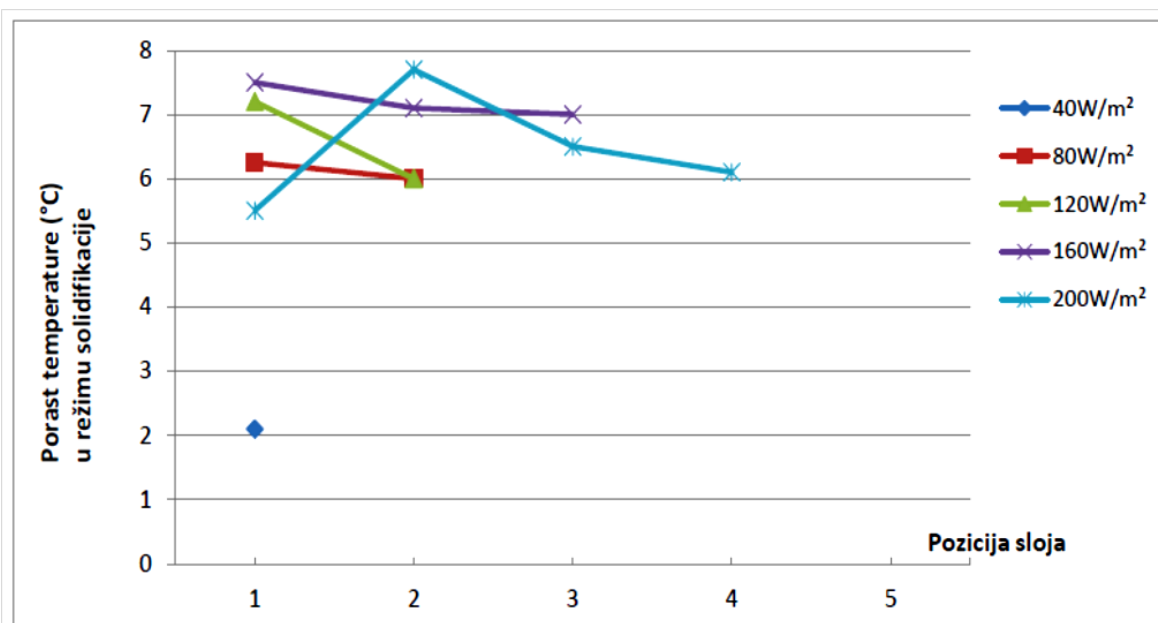
Zapaža se da je pri pri toplotnom fluksu 40 W/m^2 redukcija temperature sloja sa PCM kuglicama u odnosu na sloj sa šupljinama 2°C iako se proces topljenja nije završio. U toku takvog nepotpunog topljenja, PCM materijal nije prešao potpuno u tečno stanje, odn. nije akumulirao cjelokupnu moguću latentnu toplotu. Ipak je akumulirana mala količina latentne toplote, koja smanjuje temperaturu PCM kuglica u odnosu na šupljine za 2°C .

Za slučaj toplotnog fluksa 200W/m^2 (pozicija 5 sloja sa PCM) u jednom dijelu dijagrama, u procesu grijanja, temperatura PCM kuglica je za oko 1°C viša od temperature

šupljina, što je uzrokovano činjenicom da je toplotna provodnost PCM kuglica veća od toplotne otpornosti vazduha, pa na tom dijelu PCM apsorbuje senzibilnu toplotu.

Maksimalna redukcija temperature $14,1^{\circ}\text{C}$ postiže se se pri $200\text{W}/\text{m}^2$ za poziciju PCM kuglica u sloju 2.

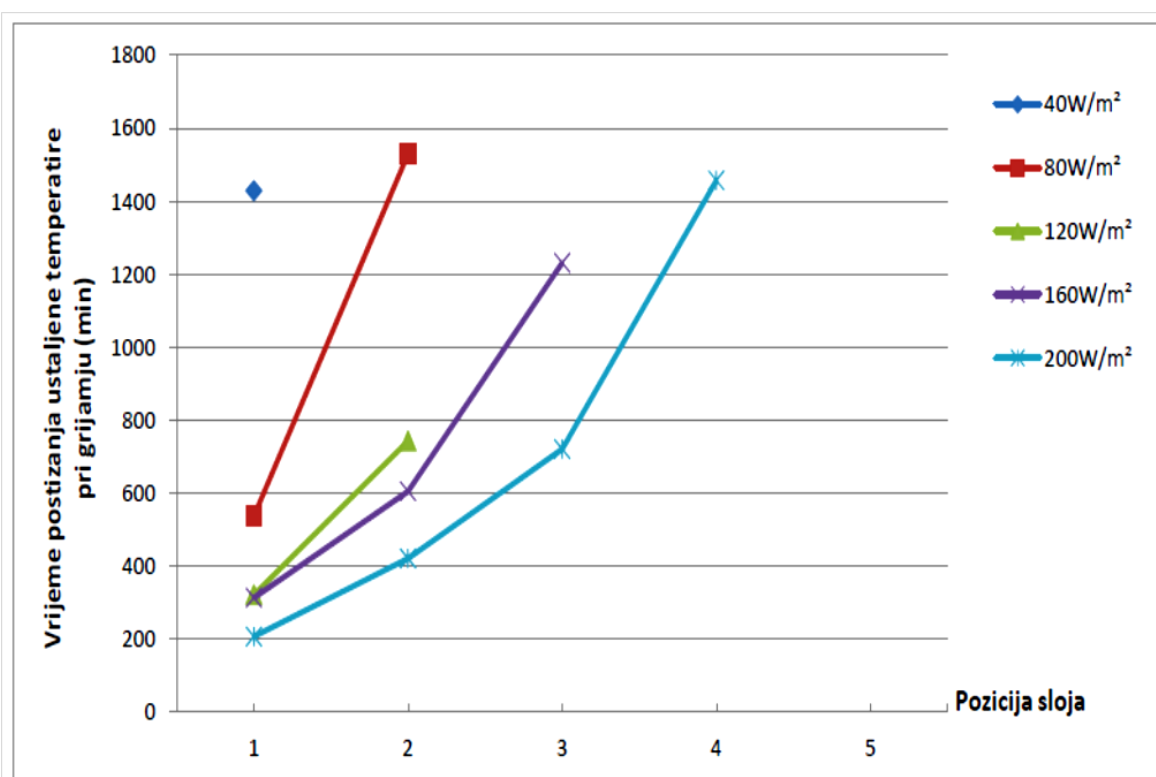
Na Sl. 4.2.6.4 prikazani su porasti temperature, u režimu solidifikacije, između PCM kuglica i šupljina. Temperatura šupljina pri hlađenju relativno brzo dostiže temperaturu ambijenta, pa je pomenuti porast temperatura ustvari porast temperature između PCM i ambijenta. Sa Sl. 4.2.6.4 se vidi da porast temperatura u toku solidifikacije nije mnogo zavisano od pozicije PCM kuglica. Razlog tome je što su temperature solidifikacije u svim eksperimentima, nezavisno od toplotnog fluksa i pozicije, skoro iste, i kreću se u opsegu $\Delta T=(24\div 21)^{\circ}\text{C}$. Stoga je glavni razlog temperaturnih razlika, prilikom solidifikacije, temperatura ambijenta. Serija eksperimenata je trajala duže od dva mjeseca, pri čemu je temperatura ambijenta varirala od 14°C do 20°C . Stoga je veći porast temperaturnih razlika odgovarao nižim temperaturama ambijenta i obratno.



Sl. 4.2.6.4 Porast temperature između PCM kuglica i šupljina u režimu solidifikacije, pri različitim pozicijama i toplotnim fluksevima

Na Sl. 4.2.6.5 prikazana su vremena uspostavljanja ustaljenih temperatura u toku grijanja, pri različitim nivoima toplotnog fluksa i za različite pozicije sloja sa PCM kuglicama. Sa sniženjem nivoa toplotog fluksa raste vrijeme postizanja ustaljenih temperatura i obratno. Npr. za toplotni fluks 200W/m^2 , pozicija 1: $\Delta t_{\text{ustaljeno}}=3\text{h } 25\text{min}$ (Sl.4.2.4.1), dok je pri 40W/m^2 , pozicija 1: $\Delta t_{\text{ustaljeno}} =23\text{h } 49\text{min}$ (Sl. 4.2.4.14). Analogan zaključak se izvodi i za različite pozicije slojeva sa PCM kuglicama, odn. što je pozicija udaljenija od grejne folije, to je toplotni fluks niži, a vrijeme $\Delta t_{\text{ustaljeno}}$ duže.

Dijagram $\Delta t_{\text{ustaljeno}}$ (Sl. 4.2.6.5) je sličan dijagramu vremena potrebnog za topljenje (Sl. 4.2.6.1) iz raloga što ako je kraće $\Delta t_{\text{ustaljeno}}$ (usljed većeg toplotnog fluksa) kraće je i vrijeme topljenja Δt_{melt} .



Sl. 4.2.6.5 Vrijeme postizanja ustaljene temperature ($\Delta t_{\text{ustaljeno}}$) pri različitim nivoima toplotnog fluksa i za različite pozicije sloja sa PCM kuglicama

Analiza $\Delta t_{\text{ustaljeno}}$, uporedo sa analizom Δt_{melt} , omogućava nam da ocijenimo praktičnu upotrebljivost, odn. mogućnost primjene eksperimentalno dobijenih rezultata u realnim uslovima.

U slučaju tranzijentnih toplotnih režima, na primjeru ljetnjih uslova, proces potpunog topljenja nije konstatovan u poziciji 4 kada je termalni otpor $R = 1.70 \text{ (m}^2 \text{ °C)/W}$, a pogotovo u poziciji 5. Kompletno topljenje se moglo odvijati samo za vrednosti termalnog otpora manjeg od $1.70 \text{ (m}^2 \text{ °C)/W}$, kada su PCM kuglice bile u stanju da prime kompletnu latentnu energiju i otpuste je u režimu solidifikacije.

4.2.7 Zaključak

U ovom dijelu disertacije razmatrana su tri uzorka izolacionog zida: prvi referentni sa 5 izolacionih slojeva stiropora, drugi sa 4 izolaciona sloja stiropora i jednim slojem stiropora s PCM kuglicama, treći sa 4 izolaciona sloja stiropora i jednim slojem stiropora sa šupljinama. Pozicije slojeva sa PCM kuglicama i šupljinama su simultano varirane i dovođene u istu poziciju u odnosu na grejnu foliju, radi poređenja i nalaženja njihovih optimalnih položaja u kojima je maksimalan njihov učinak, tj. optimalna regulacija temperature prostorije. Eksperimenti su vršeni za izvor toplote sa konstantnim i tranzijentnim toplotnim fluksom. Izvedeno je niz zaključaka od kojih ćemo navesti sljedeće:

- Da bi PCM materijal u kuglicama obavljao kompletne procese topljenja i solidifikacije, odn. da bi razmatrani PCM materijal efikasno obavljao funkciju temperaturnog regulatora prostorije, izvršena je identifikacija pozicija PCM slojeva bazirana na eksperimentalnoj metodologiji. Zaključeno je da je izolacioni zid omotača objekta, pod uslovima zadatim u eksperimentu, predimenzionisan. To znači da je broj izolacionih stiropornih slojeva, datih dimenzija i pri razmatranim toplotnim fluksevima, suviše veliki da bi se efikasno iskoristila svojstva PCM

materijala radi regulacije temperature prostorije. Na osnovu serije eksperimenata, pod zadatim uslovima, zaključuje se da se proces završetka, kompletiranja topljenja, tj. potpune akumulacije latentne toplote, ne događa ni za jednu uzetu vrijednost toplotnog fluksa kada je PCM sloj lociran na poziciji 5.

- Toplotni otpor R između grejne folije i PCM kuglica, pri solarnoj radijaciji od 200W/m^2 do 160W/m^2 , treba da bude manji od $1.70 (\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C})/\text{W}$, da bi se obavio proces potpunog topljenja i solidifikacije PCM materijala. Daljim smanjenjem toplotnog fluksa ($<160\text{W/m}^2$) proces potpunog topljenja je moguć ako je $R < 1.14 (\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C})/\text{W}$. Za toplotni fluks manji od 120W/m^2 vrednost je $R < 0.57 (\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C})/\text{W}$ (PCM kuglice su u sloju neposredno pri grejnoj foliji). Pri toplotnom fluksu 40W/m^2 proces topljenja se ne može kompletno obaviti tokom dana, odn. PCM kuglice, iako neposredno postavljene uz grejnu foliju, ne vrše efikasno svoju funkciju. Nađene vrijednosti toplotnih flukseva i toplotnih otpora pri kojima je efikasno djelovanje PCM kuglica mogu korisno poslužiti pri projektovanju omotača zgrade sa ugrađenim PCM materijalom.
- Maksimalna redukcija temperature u toku dana pri korišćenju PCM kuglica je 14.1°C (200W/m^2 , pozicija 2), a maksimalni porast temperature u toku noći je 7.7°C (200W/m^2 , pozicija 2).
- Za slučaj tranzijentnih toplotnih režima, kojima se uspješnije nego stacionarnim simulira realno solarno zračenje u toku dana, za zadati opseg temperatura $\Delta T = (22 \div 28)^\circ\text{C}$ u okviru koga se održava temperatura prostorije, najbolji rezultati su dobijeni za sloj sa PCM kuglicama u poziciji 3. U toj poziciji se postiže vrijeme održavanja temperature isključivo PCM kuglicama na intervalu $\Delta t = 1026\text{min} = 17.1\text{h}$, odn 71.2% dvadesetčetvoro časovnog vremenskog intervala. Bez PCM kuglica to vrijeme iznosi svega 10.6% . Za slučaj kada se razmatra pozicija 1 (prvi izolacioni sloj u omotaču) ti procenti iznose 49% i 7.6% . Vrijeme održavanja temperature isključivo sa PCM kuglicama skoro linearno raste od pozicije 1 do pozicije 3. Daljim postavljanjem sloja sa PCM kuglicama u pozicije 4 i 5 proces topljenja se ne

uspijeva završiti, a samim tim neće biti dovoljno odate toplote pri solidifikaciji, odn. neće biti iskorišćen u punoj mjeri kapacitet PCM kuglica za akumulaciju i odavanje toplote. Dakle, i u tranzijentnim režimima se potvrdilo da toplotni otpor između solarnog zračenja i sloja sa PCM kuglicama treba da bude $R < 1.70 \text{ (m}^2 \text{ °C)/W}$.

Dobijeni rezultati i analiza su značajni za unapređenje efikasnog projektovanja i energetskih performansi omotača zgrade sa ugrađenim PCM kuglicama i predstavlja obećavajuću strategiju u smanjenju energetske potrošnje za svrhu grijanja i hlađenja u zgradama. Slojevi sa inkorporiranim materijalima mogu biti korišćeni pri izgradnji novih građevinskih objekata, ali mogu biti dodati i u postojećim objektima tokom renoviranja u cilju poboljšanja njihovih toplotnih performansi. Efikasnost korišćenja PCM zavisi od temperaturnih, klimatskih uslova sredine. U budućem razvoju ovih istraživanja treba uzeti u obzir poziciju objekta i njegovu namjenu, postojanje prozora, realno solarno zračenje, ponašanje i karakteristike PCM materijala pri dugotrajnoj upotrebi. Takva eksperimentalna istraživanja je najbolje izvoditi na realnim objektima, za koje se i dobijaju realniji rezultati od eksperimentalnih dobijenih u laboratorijskim uslovima.

5. ZAKLJUČAK

Jedan od najdramatičnijih problema sa kojima se susrijeće čovječanstvo u 21. vijeku je problem energije, tj njene proizvodnje i potrošnje. Ovaj problem kompleksno utiče na kvalitet života kako pojedinca, tako i država, odn. ljudske vrste uopšte.

Rezerve fosilnih neobnovljivih izvora energije su uveliko iscrpljene i ne može se računati na njih na dugi rok. Sa druge strane, ova vrsta izvora energije koja je danas dominantna, devastira okolnu sredinu, uništavajući kvalitet zemljišta i vazduha. Poseban problem čini što fosilna goriva dovode do emisije gasa CO₂, koji utiče na efekat "staklene bašte" i dovodi do globalnog zagrijavanja. Posljedice globalnog zagrijavanja su klimatske promjene koje dovode do razornih efekata, pogubnih kako za čovjeka tako i za sav živi svijet: topljenja leda i podizanja nivoa mora, poplava, orkanskih vjetrova, čime je ugrožen ne samo održivi razvoj nego i opstanak čovječanstva.

Činjenica da na globalnom nivou oko 40% svjetske potrošnje energije otpada na građevinske objekte, koji emituju skoro 30% globalne emisije CO₂, upućuje na korišćenje u objektima alternativnih obnovljivih izvora energije, koji ne zagađuju sredinu i ne emituju CO₂. Zajedno sa njihovom primjenom, sve više su aktuelni koncepti dizajna zgrada i upotreba novih materijala, kojima se realizuje veća energetska efikasnost objekata i posljedično ekonomičnija potrošnja energije, uz očuvanje i podizanje komfora življenja u njima.

Na osnovu prethodnih razmatranja i navedenih činjenica proistekla je i motivacija autora ove disertacije da za predmet istraživanja disertacije izabere istraživanje i unapređenje performansi energetske efikasnosti dva najsavremenija modula korišćena u održivom građevinarstvu: fotonaponskih panela i PCM materijala kao konstruktivnih elemenata.

Kako su zaključci u vezi primjene fotonaponskih modula u okviru PV-Trombovog zida, kao i primjene PCM materijala u omotačima zgrada, detaljno navedeni u poglavljima disertacije 3.6 i 4.2.7, respektivno, to ćemo naglasiti samo najbitnije djelove zaključaka.

Mnogobrojna savremena teorijska i eksperimentalna istraživanja posvećena su ugradnji PV modula u Trombov zid, tj. ispitivanju tzv. PV-Trombovog zida. Pri tome je zanemarena ocjena osnovnog faktora PV modula koja se postiže ovakvom ugradnjom: stepena korisne snage modula. U disertaciji je dokazano, da primjena PV modula u Trombovom zidu, dovodi do bitnog sniženja stepena iskorišćenja modula. Dokazano je da stepeni korisne snage PV modula korišćenog u Trombovom zidu, iznose svega 65% i 54.8% (vrijednosti na godišnjem nivou), u odnosu na korišćenje PV modula pri optimalnim uglovima nagiba. Navedeni podaci se odnose na lokacije PV modula u Podgorici i Changsha, respektivno. Takodje, na mjesečnom nivou, najveća srednja mjesečna proizvodnja električne energije odgovara optimalnim vrijednostima ugla nagiba koji se mijenjaju od mjeseca do mjeseca, i koji su bitno različiti od ugla nagiba PV modula u Trombovom zidu. Na osnovu toga dokazano je da je primjena PV modula u Trombovom zidu, sa aspekta stepena iskorišćenja PV modula, sa niskim stepenom iskorišćenja, odn. niskom energetsom efikasnošću, a samim tim da je neracionalna. Stoga je i sa ekonomskog aspekta, investicija u ugradnju PV modula u Trombov zid, bitno manje isplativa u odnosu na slučaj kada se PV modul koristi pod optimalnim ili bliskim optimalnom uglu nagiba. Sa aspekta veće proizvodnje električne energije korisnije je instalirati PV module ne u Trombovom zidu, nego na drugom mjestu van Trombovog zida, obezbjeđujući optimalan ugao nagiba, odn. maksimalnu proizvodnju električne energije.

Za analizu PV-Trombovog zida korišćen je simulacioni softver System Advisor Model (SAM). Izborom lokacija panela, tj. gradova (Podgorica i Changsha), gdje je PV lociran, izabrani su automatski i fajlovi sa realnim parametrima klimatskih, vremenskih prilika za tu lokaciju (solarna iradijacija, temperatura ambijenta, vjetar, itd.) kojima se datoteke SAM-a snabdijevaju u vremenskim sekvencama od po 1h. Time se dobijeni rezultati odnose na realne klimatske uslove koji vladaju na izabranim lokacijama. Pri simulaciji i proračunu su uzeti u obzir i drugi relevantni podaci iz datoteka SAM-a koji se odnose na PV module (konkretni izabrani tip PV

modula, odn. panela, sa odgovarajućim kataloškim parametrima, uglovi nagiba PV, radne temperature PV modula, itd.).

Buduća istraživanja primjene i energetske efiksnosti Trombovog zida treba nastaviti u daleko perspektivnijem pravcu: realizaciji Trombovog zida kod koga se konvencionalni termalni zid velike mase zamjenjuje sa PCM termalnim zidom, koji ima sposobnost da akumulira daleko više toplote po jedinici mase od konvencionalnih materijala. PCM termalni zidovi, u okviru Trombovog zida, su male težine, lako se integrišu u nove ili postojeće konstrukcije zgrada, pri čemu koristeći solarnu energiju znatno smanjuju korišćenje sistema za hlađenje i zagrijavanje.

Drugi dio zaključaka odnosi se na rezultate dobijene u istraživanjima primjene, ugradnje PCM (Phase Change Material - fazno-promjenljivi materijali, tj. materijali koji mijenjaju agregatno stanje) u omotače građevinskih objekata. Ugradnja se vrši radi poboljšanja energetske efikasnosti stambenih objekata, u smislu redukcije grijanja i hlađenja, odn. poboljšanja toplotnih performansi i smanjenja energetske potrošnje unutar stambenih objekata. Primjenom ovih materijala višestruko se povećava, u odnosu na konvencionalne materijale, toplotni kapacitet, tj. sposobnost skladištenja toplote po jedinici mase.

Za istraživanja efekta ugradnje PCM materijala u omotače zgrada korišćen je eksperimentalni metod, a eksperimentalna istraživanja su sprovedena u laboratoriji Univerziteta za nauku i tehnologiju, u Changsha, Kina. Radi ispitivanja prenosa toplote i njegovog uticaja na fluktuacije temperatura, ispitivani su kao uzorci tri gipsana zida uz korišćenje odgovarajuće mjerne instrumentacije.

Eksperimentalna istraživanja su obuhvatila određivanje optimalnih pozicija izolacionih slojeva sa PCM materijalom (PCM kuglicama) u omotačima građevinskih objekata, tj. pozicija u kojima je maksimalan njihov učinak. Takav učinak podrazumijeva optimalnu regulaciju temperature prostorije u smislu postizanja temperaturnog komfora, uz redukciju upotrebe dodatnih sistema za grijanje i hlađenje.

U eksperimentu je solarno zračenje simulirano stacionarnim i tranzijentnim toplotnim režimom, realizovanim preko grejne folije. U stacionarnom toplotnom režimu, varirane su vrijednosti toplotnog fluksa, kao i toplotnog otpora između izvora toplote i sloja sa PCM kuglicama. Nađene su vrijednosti toplotnog fluksa i toplotnog otpora (debljina izolacije) pri kojima je maksimalna redukcija temperature u toku dana i maksimalni porast temperature u toku noći, pri korišćenju PCM kuglica. Takođe, identifikovani su opsezi vrijednosti toplotnog fluksa i toplotnog otpora, pri kojima se proces topljenja ne može kompletno obaviti tokom dana, tj. u okviru kojih je funkcionisanje PCM materijala nedjelotvorno.

Za slučaj tranzijentnih toplotnih režima, kojima se uspješnije nego stacionarnim simulira realno solarno zračenje u toku dana, analiziran je uticaj PCM kuglica na održavanje unutrašnje temperature prostorije. Za zadati opseg temperatura u okviru koga treba održavati temperaturu prostorije, poređeni su vremenski intervali u toku kojih je nepotrebno uključivanje sistema grijanja i hlađenja (HVAC), za slučaj omotača zgrade sa PCM materijalom i bez njega. Dobijeni eksperimentalni rezultati, za konkretne slučajeve primjene PCM materijala u omotaču zgrade, ukazuju na doprinos primjene PCM kuglica u smislu značajne uštede energije, odn. redukcije dodatnog grijanja i hlađenja radi održanja toplotnog komfora.

Nađene vrijednosti toplotnih flukseva i toplotnih otpora, pri kojima je efikasno djelovanje PCM kuglica, kao i analiza ušteda energije pri održavanju temperatura prostorije u granicama toplotnog komfora, mogu korisno poslužiti pri projektovanju omotača zgrada sa ugrađenim PCM materijalom. Buduća istraživanja primjene PCM materijala, kao izuzetno perspektivnih materijala u omotačima zgrada, treba da obuhvate nove tipove i generacije PCM materijala, koje pružaju veće mogućnosti i pouzdanije su pri ciklusima topljenja i hlađenja. Takođe, eksperimentalna istraživanja na laboratorijskim modelima omotača objekata imaju svoja ograničenja u pogledu adekvatnosti modela i adekvatnosti laboratorijskih uslova u odnosu na realne objekte i realne klimatske uslove. Stoga su eksperimentalna istraživanja na objektima za testiranje (manjih ili većih gabarita) daleko pouzdanija i daju realniju sliku ponašanja omotača objekata sa ugrađenim PCM

materijalima. Tada se mogu uzeti u obzir pozicija objekta i njegova namjena, postojanje prozora, realno solarno zračenje, ponašanje i karakteristike PCM materijala pri dugotrajnoj upotrebi.

6. LITERATURA

- [1] A. L. Dahl, Preventing Overshoot and Collapse: Managing the Earth's Resources, UNEP / University of Geneva Graduate Institute, 2008.
<http://iefworld.org/ddahl08d.htm>
- [2] A. L. Dahl, Energy, IEF sustapedia an encyclopedia of sustainability, 2011,
<http://iefworld.org/spenergy.htm>
- [3] DOE/EIA (2016). International Energy outlook
[https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2016\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2016).pdf)
- [4] A. Dahl, Our fossil fuel addiction and climate change, IEF, 2013,
<http://iefworld.org/node/613>
- [5] www.ipcc-wg2.gov/publications/SAR/index.html
- [6] www.wmo.int/media/sites/default/files/WMO2011-2015.final_.docx
- [7] Jovana Jovanović, Svetlana Stevović, *Global warming as a problem of modern humanity*, 3rd International Conference "New Technologies NT-2016" Development and Application, Academy of sciences and arts of B&H, Mostar, Bosnia and Herzegovina, 13-14. may 2016, ISSN: 2303-5668, pp 234-241,
<http://www.icnt.robotika.ba>
- [8] I. Karabegović, Jovana Jovanović, *Zastupljenost obnovljivih izvora energije u svijetu i Evropskoj uniji*, Časopis "Nafta i plin", ISSN 1330-2434, s.79-93, Vol.37, Br.151./2017, Oktobar 2017.
- [9] Armstrong J., Hamrin J. (2013) What are "Renewable Resources"?, Chapter 1: Renewable Energy Overview, Cost-Effectiveness of Renewable Energy, Organization of American States.

- [10] D. Mills, Advances in solar thermal electricity technology". Solar Energy 76 (1-3), Elsevier,2004,pp. 19–31.
- [11] Peter Jamieson, Innovation in Wind Turbine Design. Wiley & Sons 2011.
- [12] J. F. Manwell, J. G. McGowan, A. L. Roberts, Wind Energy Explained: Theory, Design and Application, John Wiley & Sons, 2nd edition (2012)
- [13] Erich Hau, Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics Springer, 2013.
- [14] E. Martinot, Renewable 2017 Global Status Report, Paris: REN21 Secretariat, 2017.
- [15] C. Mandil, World Energy Outlook 2006, IEA, Paris, France, 2006. pp. 161-246.
- [16] Jovana Jovanovic, Xiaoqin Sun, Svetlana Stevovic, Jian Chen: Energy-efficiency gain by combination of PV modules and Trombe wall in the low-energy building design, Energy and Buildings, Elsevier, ISSN: 0378-7788, JCR Impact Factor: 4.017, Volume 152, 1 October 2017, Pages 568-576, Original Research Article, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.073>
- [17] Xiaoqin Sun, Jovana Jovanovic, Siyuan Fan, Youhong Chu, Shuguang Liao, Heat Transfer of Building Envelope with Phase Change Material Balls, 4th International Conference On Building Energy, Environment, COBEE 2018, Feb 5-9, 2018, Melbourne, Australia, accepted for publication.
- [18] E. Romo, J. Nadeau, D. Bruneau, P. Lagiere (2014) , Sustainability indicators for the preliminary energy design of office buildings, HAL archives-ouvertes.fr, <https://halshs.archives-ouvertes.fr/hal-01070219/document>

- [19] J. Broc, P. Bertoldi, V. Czako (2017)- On the way to change of scale: review of NEEAPs' energy efficiency strategies for buildings, HAL archives-ouvertes.fr, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01577523/document>
- [20] E. Broin, E. Mata, A. Goransson, F. Johnsson (2017), The effect of improved efficiency on energy savings in EU-27 buildings, HAL archives-ouvertes.fr, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01219291v2/document>
- [21] Randa Ghattas, Jeremy Gregory, Elsa Olivetti, Suzanne Greene (2013) Life Cycle Assessment for Residential Buildings: A Literature Review and Gap Analysis, <https://cshub.mit.edu/sites/default/files/documents/LCAforResidentialBuildings.pdf>
- [22] Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI, Karlsruhe, Germany, (2015), How energy efficiency cuts costs for a 2-degree future.
- [23] D. Mijuca (2008)- Uvod u energetska efikasnost u zgradarstvu, Fakultet za graditeljski menadžment, Univerzitet UNION
- [24] M. Z. Senegačnik (2007), Pasivna kuća, Sun arh.
- [25] International Energy Agency, International Partnership for Energy Efficiency Cooperation (2015)- Building Energy Performance Metrics
- [26] Univerzitet Crne Gore, Mašinski i Arhitektonski Fakultet, Podgorica (2011) - Energetska efikasnost zgrada
- [27] H. Koberl, E. Nost-Kahlen, W. Ehrenhofer, H. Steiermark (2013), Energy building efficiency, Austrian Development Agency
- [28] G. Bovec (2015) A Scalable and sustainable Web of buildings architecture, HAL archives-ouvertes.fr, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01217307/document>
- [29] K. Daniels (1999) -Technologie des Okologischen Bauens, <http://rcswww.urz.tu-dresden.de/~tuuwi/urv/ws0708/konsum/Oeko-architektur.pdf>
- [30] A. V. Wijk (2013)-Welcome to the green village, ISBN 978-1-61499-283-7, Delft University Press, Amsterdam The Netherlands
- [31] W. Feist, Certified Passive House, Passive House Institute
- [32] N.Y. Jadhav, Green and Smart Buildings, Springer, Singapore, 2016.

- [33] F. Yan-ping, W. Yong, L. Chang-bin, Energy-efficiency supervision systems forenergy management in large public buildings: necessary choice for China, *Energy Policy* 37 (2009) 2060–2065.
- [34] W.G. Cai, Y. Wu, Y. Zhong, H. Ren, China building energy consumption: situation, challenges and corresponding measures, *Energy Policy* 37 (2009)2054–2059.
- [35] P.Torcellini, S. Pless, Trombe Walls in Low-Energy Buildings: PracticalExperiences, *World Renewable Energy VIII*, Denver, Colorado, 2004.
- [36] Z. Hu, W. He, X. Hong, J. Ji, Z. Shen, Numerical analysis on the cooling performance of a ventilated Trombe wall combined with venetian blinds in anoffice building, *Energy Build.* 126 (2016) 14–27.
- [37] A.J.N. Khalifa, E.F. Abbas, A comparative performance study of some thermal storage materials used for solar space heating, *Energy Build.* 41 (2009) 407–415.
- [38] B. Agrawal, G.N. Tiwari, *Building Integrated Photovoltaic Thermal Systems for Sustainable Developments*, Royal Society of Chemistry, 2011.
- [39] F. Taffesse, A. Verma, S. Singh, G.N. Tiwari, Periodic modeling of semi-transparent photovoltaic thermal-trombe wall (SPVT-TW), *Sol. Energy*135 (2016) 265–273.
- [40] W. Sun, J. Ji, C. Luo, W. He, Performance of PV-Trombe wall in wintercorrelated with south fac, ade design, *Appl. Energy* 88 (2011) 224–231.
- [41] G. Gan, A parametric study of Trombe walls for passive cooling of buildings, *Energy Build.* 27 (1998) 37–43.
- [42] How Vent Thermal Trombe Walls, 2017, <http://www.solar365.com/green-homes/heating-ac/how-vent-thermal-trombe-walls> (Accessed 3 May 2017).

- [43] T.G. Özbalta, S. Kartal, Heat gain through Trombe wall using solar energy in a cold region of Turkey, *Sci. Res. Essays* 5 (2010) 2768–2778.
- [44] H. Boyer, F. Miranville, D. Bigot, S. Guichard, I. Ingar, A.P. Jean, et al., Heat transfer in buildings : application to air solar heating and Trombe wall design *Heat Transfer in Buildings*, 2011.
- [45] M. Dowson, D. Harrison, Z. Dehouche, Trombe walls with nanoporous aerogel insulation applied to UK housing refurbishments, *Int. J. Smart Nano Mater.* 5(2015) 283–303.
- [46] Milic B. *Building Construction Elements, Part II*. University of Montenegro 1999.
- [47] Y.A. Cengel, A.J. Ghajar, *Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications*, 4th ed., McGraw-Hill Companies, Inc., New York, 2011.
- [48] A. Braga Sá, J. Boaventura-Cunha, J.-C. Lanzinha, A. Paiva, An experimental analysis of the Trombe wall temperature fluctuations for high range climate conditions: influence of ventilation openings and shading devices, *Energy Build.* 138 (2017) 546–558.
- [49] O. Saadatian, K. Sopian, C.H. Lim, N. Asim, M.Y. Sulaiman, Trombe walls: a review of opportunities and challenges in research and development, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16 (2012) 6340–6351.
- [50] B.K. Koyunbaba, Z. Yilmaz, K. Ulgen, An approach for energy modeling of a building integrated photovoltaic (BIPV) Trombe wall system, *Energy Build.* 67 (2013) 680–688.
- [51] B. Jiang, J. Ji, H. Yi, The influence of PV coverage ratio on thermal and electrical performance of photovoltaic-Trombe wall, *Renew. Energy* 33 (2008) 2491–2498.

- [52] N. Dimassi, L. Dehmani, Thermal efficiency of a solar wall in Tunisia, *ISRN Renew. Energy* 2012 (2012) 1–8.
- [53] Nate Blair, A.P. Dobas, Janine Freeman, Ty Neises, M. Wagner, System Advisor Model, SAM 2014.1.14: General Description, National Renewable Energy Laboratory, Denver West Parkway Golden, CO 80401, 2014.
- [54] <https://sam.nrel.gov/download>
- [55] https://www.nrel.gov/rredc/solar_data.html
- [56] http://www.fsec.ucf.edu/en/consumer/solar_electricity/basics/images/pv_cell_to_array_500.png
- [57] <http://www.solarnipaneli.org/wp-content/uploads/2010/09/Polje-solarnih-panela.jpg>
- [58] https://sr.wikipedia.org/wiki/Solarna_fotonaponska_energija
- [59] <http://www.solarnipaneli.org/solarni-paneli-2/>
- [60] http://www.oie-res.me/uploads/Dokumenta%202015/Pravilnik_visina%20naknade_OIE_120116.pdf
- [61] S. Soulayman, M. Hammoud, Optimum tilt angle of solar collectors for building applications in mid-latitude zone, *Energy Convers. Manage.* 124(2016) 20–28.
- [62] M. Benganem, Optimization of tilt angle for solar panel: case study for Madinah, Saudi Arabia, *Appl. Energy* 88 (2011) 1427–1433.

- [63] M. Hartner, A. Ortner, A. Hiesl, R. Haas, East to west—the optimal tilt angle and orientation of photovoltaic panels from an electricity system perspective, *Appl. Energy* 160 (2015) 94–107.
- [64] W.G. Le Roux, Optimum tilt and azimuth angles for fixed solar collectors in South Africa using measured data, *Renew. Energy* 96 (2016) 603–612.
- [65] K. Bakirci, General models for optimum tilt angles of solar panels: Turkey case study, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16 (2012) 6149–6159.
- [66] T.O. Kaddoura, M.A.M. Ramli, Y.A. Al-Turki, On the estimation of the optimum tilt angle of PV panel in Saudi Arabia, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 65 (2016) 626–634.
- [67] B. Jamil, A.T. Siddiqui, N. Akhtar, Estimation of solar radiation and optimum tilt angles for south-facing surfaces in Humid Subtropical Climatic Region of India, *Engi. Sci. Technol. Int. J.* 19 (2016) 1826–1835.
- [68] Hall RN. Silicon photovoltaic cells. *Solid-State Electronics*. 1981;24:595-616.
- [69] R. Couderc, M. Amara, M. Lemiti, In-depth analysis of heat generation in silicon solar cells, *IEEE J. Photovolt.* 6 (2016) 1123–1131.
- [70] Dubey S, Sarvaiya JN, Seshadri B. Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World – A Review. *Energy Procedia*. 2013;33:311-21.
- [71] SunPower, SunPower™ X-Series Data Sheet, 2013, <https://us.sunpower.com/solar-panels-technology/x-series-solar-panels/> (Accessed 3 May 2017).
- [72] Jovana Jovanovic, Xiaoqin Sun, Svetlana Stevovic, Jian Chen: Energy-efficiency gain by combination of PV modules and Trombe wall in the low-energy building

- design, *Energy and Buildings*, Elsevier, ISSN: 0378-7788, JCR Impact Factor: 4.017, Volume 152, 1 October 2017, Pages 568-576, Original Research Article, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.073>
- [73] Kosny, J. PCM-Enhanced Building Components, An Application of phase Change Materials in Building Envelopes and Internal Structures, Chapter 2, 2015, ISBN:978-3-319-14285-2
- [74] DOE/EIA (2016). International Energy outlook
- [75] L. G. Socaciu, Thermal Energy Storage with Phase Change Material, *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, ISSN 1583-1078, 2012 p. 75-98.
- [76] Sharma, Atul; Tyagi, V.V.; Chen, C.R.; Buddhi, D., Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13: 318–345, 2009.
- [77] D. Chwieduk, Towards sustainable-energy buildings, *Appl. Energy* 76 (1–3) (2003) 211–217.
- [78] A.M. Papadopoulos, T.G. Theodosiou, K.D. Karatzas, Feasibility of energy saving renovation measures in urban buildings: the impact of energy prices and the acceptable pay back time criterion, *Energy Build.* 34 (5) (2002) 455–466.
- [79] Xiangfei Kong, et al., Numerical study on the thermal performance of building wall and roof incorporating phase change material panel for passive cooling application, *Energy Build.* 81 (2014) 404–415.
- [80] J. Laustsen, Energy Efficiency Requirements in Building Codes, *Energy Efficiency Policies for New Buildings*, International Energy Agency (IEA), 2008.

- [81] J. Kosny, PCM-Enhanced Building Components, Springer, Editor: Brian Derby, ISBN: 978-3-319-14285-2.
- [82] <http://www.buildmagazin.com/index2.aspx?fld=tekstovi&ime=bm2526.htm>
- [83] <http://www.pcmproducts.net/>
- [84] E. Risueño et al.: Mg-Zn-Al Eutectic Alloys as Phase Change Material for Latent Heat Thermal Energy Storage, Energy Procedia, Volume 69, May 2015, Pages 1006-1013.
- [85] L. Shilei, Z. Neng, F. Guohui: Eutectic mixtures of capric acid and lauric acid applied in building wallboards for heat energy storage, Energy and Buildings 38 (2006) 708–711.
- [86] K. Cellat et al.: Thermal enhancement of concrete by adding bio-based fatty acids as phase change materials, Energy and Buildings 106 (2015) 156–163.
- [87] C. Castellón et al.: Effect of microencapsulated phase change material in sandwich panels, Renewable Energy 35 (2010) 2370-2374.
- [88] Zhou D, Zhao CY, Tian Y. 2012. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. Appl Energ. 92: 593-605.
- [89] T. Khadiran, M. Z. Hussein, Z. Zainal, R. Rusli: Advanced energy storage materials for building applications and their thermal performance characterization, Renewable and Sustainable Energy Reviews 57 (2016) 916–928.
- [90] https://energy.gov/sites/prod/files/2014/01/f7/csp_review_meeting_042413_mathur.pdf

- [91] T. E. Alam et al.: Macroencapsulation and characterization of phase change materials for latent heat thermal energy storage systems, *Applied Energy* Volume 154, 15 September 2015, Pages 92–101
- [92] A. Jamekhorshid, S.M. Sadrameli, M. Farid: A review of microencapsulation methods of phase change materials (PCMs) as a thermal energy storage (TES) medium, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 31(2014)531–542.
- [93] http://trockenbau-saygin.com/pdf/platten/K764_Knauf_PCM_SmartBoardTM_2326.pdf
- [94] A. Sar, A. Karaipekli, Preparation, thermal properties and thermal reliability of palmitic acid/expanded graphite composite as form-stable PCM for thermal energy storage, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 93, Issue 5, May 2009, Pages 571-576
- [95] <http://www.pcmproducts.net/>
- [96] <http://www.teappcm.com/>
- [97] https://cdn2.hubspot.net/hub/55819/file-14755587-pdf/docs/buildings-xi/dupont_energain.pdf
- [98] www.sustainableinsteel.eu
- [99] M. K. Rathod, J. Banerjee "Experimental Investigations on Latent Heat Storage Unit using Paraffin Wax as Phase Change Material", *Experimental Heat Transfer*, 27:40–55, 2014
- [100] I. Dincer and M. A. Rosen, *Thermal Energy Storage Systems and Applications*, 2nd ed., pp. 127–128. *John Wiley and Sons Ltd.*, UK, 2002.

- [101] B. Zalba, J. M. Marin, L. F. Cabeza, and, H. Mehling, Review on Thermal Energy Storage with Phase Change: Materials, Heat Transfer Analysis and Applications, *Appl. Thermal Eng.*, vol. 23, pp. 251–283, 2003.
- [102] S. D. Sharma and K. Sagara, Latent Heat Storage Materials and Systems: A review, *Int. J. Green Energy*, vol. 2, pp. 1–56, 2005.
- [103] M. F. Demirbas, Thermal Energy Storage and Phase Change Materials: An Overview, *Energy Sources*, Part B, vol. 1, pp. 85–95, 2006.
- [104] A. Sharma, V. Tyagi, C. R. Chen, and, D. Buddh, Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials and Applications, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, pp. 318–345, 2009.
- [105] Cerón, I., J. Neila and M. Khayet (2011). "Experimental tile with phase change materials (PCM) for building use." *Energy and Buildings* 43(8): 1869-1874.
- [106] Cheng, R., M. Pomianowski, X. Wang, P. Heiselberg and Y. Zhang (2013). "A new method to determine thermophysical properties of PCM-concrete brick." *Applied Energy* 112: 988-998.
- [107] Akeiber, H., P. Nejat, M. Z. A. Majid, M. A. Wahid, F. Jomehzadeh, I. Z. Famileh, J. K. Calautit, B. R. Hughes and S. A. Zaki (2016). "A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes." *Renewable and Sustainable Energy Review* 60: 1470-1497.
- [108] A. C. Kheirabadi, D. Groulx, " The Effect of the Mushy-Zone Constant on Simulated Phase Change Heat Transfer", Proceedings of CHT-15 ICHMT International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer, At Rutgers University, Piscataway, USA, May 2015.

- [109] Sharifi, N. P., A. A. N. Shaikh and A. R. Sakulich (2017). "Application of phase change materials in gypsum boards to meet building energy conservation goals." *Energy and Buildings* 138: 455-467.
- [110] Li, M., Z. Wu and J. Tan (2013). "Heat storage properties of the cement mortar incorporated with composite phase change material." *Applied Energy* 103: 393-399.
- [111] Lee, K. O., M. A. Medina, E. Raith and X. Sun (2015). "Assessing the integration of a thin phase change material (PCM) layer in a residential building wall for heat transfer reduction and management." *Applied Energy* 137: 699-706.
- [112] Naser P. Sharifi, Ahsan Aadil Nizam Shaikh, Aaron R. Sakulich " Application of phase change materials in gypsum boards to meet building energy conservation goals", *Energy and Buildings* 138 (2017) 455–467.

BIOGRAFIJA

Jovana Jovanović je rođena 10.09.1990. godine u Podgorici, Crna Gora. Osnovnu i srednju školu (gimnazija- prirodno-matematički smjer) završila je sa diplomom "Luča" (svi razredi završeni sa odličnim uspjehom).

Prve dvije godine studija (2009.-2011.) završila je na Građevinskom fakultetu u Podgorici. Za prosjek na prvoj godini studija 9.53 dobitnik je stipendije Ministarstva prosvjete Crne Gore. Titulu BSc je stekla na Fakultetu tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici 01.11.2012.g. (prosječna ocjena 8.84), a titulu MSc na istom fakultetu 02.07.2014.g. . (prosječna ocjena 9.25).

Doktorske studije je upisala na Univerzitetu "Union Nikola Tesla" u Beogradu, na Fakultetu za graditeljski menadžment, u oktobru 2014.g. i položila sve ispite predviđene planom i programom doktorskih studija.

Od 4-22 jula, 2011., boravila je na Viena University of Technology, scholarship for Viena, Austria, Green Summer Academy – Smart and Sustainable Buildings.

Od septembra 2012. do jula 2013. studirala je, po osnovu Erasmus MUNDUS programa, na University of Graz, Austria, studijski program Industrial Ecology i položila odgovarajuće ispite.

Od oktobra 2014. do januara 2015. radila je kao saradnik projektant na dva projekta u Kompaniji za dizajn i građevinske konstrukcije SPREG d.o.o., Beograd.

U periodu avgust 2016. - avgust 2017. boravila je na doktorskim istraživačkim studijama na Changsha University of Science & Technology, Faculty of Energy and Power Engineering, Changsha , Kina, po osnovu stipendije University of Science and Technology, Changsha i Confucius Institute, Kina.

Dobitnik je Dunavske nagrade za mlade naučnike za 2017. (Danubius Young Scientist Award 2017.) dodijeljene od strane Federalnog Ministarstva za nauku i istraživanje (BMWF) i Instituta za dunavski region i centralnu Evropu (IDM). Ova nagrada se dodjeljuje jedanput godišnje za 14 mladih naučnika iz 14 zemalja dunavskog regiona.

Objavila je 22 rada u inostranim časopisima i konferencijama, od kojih su 2 rada na SCI listi. Jedan od radova, na kome je prvi autor, objavila je u časopisu Energy and Buildings, Elsevier, sa Impact faktorom 4.067. Saradnik je na tri evropska projekta (Tempus i dva COST projekta). Član je u tri odbora međunarodnih naučnih konferencija.

Govori, čita i piše: engleski, kineski, njemački, italijanski, francuski. Služi se ruskim jezikom.

Od septembra 2014. radi kao saradnik na Fakultetu za menadžment Herceg Novi.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписана Јована Ђ. Јовановић

број уговора са датумом потписивања

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

"Унапређење перформанси енергетски ефикасног пројектовања експерименталним и симулационим истраживањима ПЦМ материјала и уградњом фотонапонских система у омотаче грађевинских објеката"

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, _____

Jovanović Jovana

Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Јована Ђ. Јовановић

Број уговора са датумом потписивања 08/2014 ДС

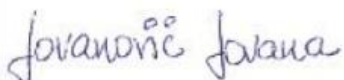
Студијски програм ДС Менаџмент одрживог развоја у градитељству

Наслов рада :

"Унапређење перформанси енергетски ефикасног пројектовања експерименталним и симулационим истраживањима ПЦМ материјала и уградњом фотонапонских система у омотаче грађевинских објеката"

Ментор Проф. др Дубравка Мијуца

Потписани



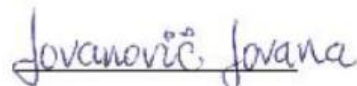
изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла Универзитетској библиотеци Универзитета „Унион-Никола Тесла“ у Београду.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета „Унион- Никола Тесла“ у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, _____



Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку Универзитет „Унион-Никола Тесла“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета унесе моју докторску дисертацију под насловом:

"Унапређење перформанси енергетски ефикасног пројектовања експерименталним и симулационим истраживањима ПЦМ материјала и уградњом фотонапонских система у омотаче грађевинских објеката"

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета „Унион-Никола Тесла“ могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанта

У Београду, _____

Jovanić Jovana

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписана Јована Ђ. Јовановић

број уговора са датумом потписивања

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

"Унапређење перформанси енергетски ефикасног пројектовања експерименталним и симулационим истраживањима ПЦМ материјала и уградњом фотонапонских система у омотаче грађевинских објеката"

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

У Београду, 17. 11. 2017.

Потпис докторанда

Јовановић Јована

Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Јована Ђ. Јовановић

Број уговора са датумом потписивања 08/2014 ДС

Студијски програм ДС Менаџмент одрживог развоја у градитељству

Наслов рада :

"Унапређење перформанси енергетски ефикасног пројектовања експерименталним и симулационим истраживањима ПЦМ материјала и уградњом фотонапонских система у омотаче грађевинских објеката"

Ментор Проф. др Дубравка Мијуца

Потписани

Jovanović Jovana

изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла Универзитетској библиотеци Универзитета „Унион-Никола Тесла“ у Београду.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета „Унион- Никола Тесла“ у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 17.11.2017.

Jovanović Jovana

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку Универзитет „Унион-Никола Тесла“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета унесе моју докторску дисертацију под насловом:

“Унапређење перформанси енергетски ефикасног пројектовања експерименталним и симулационим истраживањима ПЦМ материјала и уградњом фотонапонских система у омотаче грађевинских објеката”

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета „Унион-Никола Тесла“ могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

У Београду, 17.11.2017.

Потпис докторанта

Jovana Jovana