



RĪGAS TEHNISKĀ  
UNIVERSITĀTE

**Miķelis Dzikēvičs**

## **SAULES ENERĢIJAS AKUMULĀCIJA AR BRĪVI STĀVOŠIEM FĀŽU MAIŅAS MATERIĀLIEM**

Promocijas darba kopsavilkums



**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte  
Vides aizsardzības un siltuma sistēma institūts

**Miķelis Dzikēvičs**

Doktora studiju programmas “Vides zinātne” doktorants

**SAULES ENERĢIJAS AKUMULĀCIJA AR BRĪVI  
STĀVOŠIEM FĀŽU MAIŅAS MATERIĀLIEM**

**Promocijas darba kopsavilkums**

Zinātniskais vadītājs  
profesors *Dr. habil. sc. ing.*  
**IVARS VEIDENBERGS**

RTU Izdevniecība  
Rīga 2019

Dzikēvičs, M. Saules enerģijas akumulācija ar brīvi stāvošiem fāžu maiņas materiāliem. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2019. 20 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-19” 2019. gada 17. jūnija lēmumu, protokols Nr. 106.

Izsaku pateicību visiem, kas aizveda mani līdz šī promocijas darba rakstīšanai – pirmkārt, saviem vecākiem, nodrošinot manu bērnību laukos, kur vide ļāva man eksperimentēt ar dabu un strādāt ar dažādiem darbarīkiem tēva garāžā, sākot no ļoti elementāras kokapstrādes un metālapstrādes līdz primitīvas elektronikas veidošanai – galvenokārt mūsu rotaļlietām.

Otrkārt, tam, ka pastāv RTU un Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts, ko vada Dagnija Blumberga, un visiem citiem darbiniekiem, ieskaitot manu vadītāju Ivaru Veidenbergu, kas ļāva man apgūt, kā izmantot eksperimentālo metodi gan darbā, gan kā domāšanas veidu. Izšķirošais solis šajā attīstībā bija darba uzsākšana pie laboratorijas vadītāja Aivara Žandecka un iespēja strādāt ar ilggadējo kolēģi Vladimiru Kirsanovu, kura nekad nebeidzamais progress ir liels stimuls turpināt savu attīstību.

Bet nekas no tā nebūtu bijis svarīgs, ja nebūtu bijis kāds, ar ko dalīties labākas pasaules veidošanā ikdienas darbībā, kā arī personiskajā ārējā un iekšējā izaugsmē, un tāpēc es esmu mūžīgi pateicīgs savai partnerei dzīvē Lindai Lagzdiņai par palīdzību kopā izvēlēties pareizos un nepareizos lēmumus mūsu dzīvē, kas ir padarījis mani par to, kas esmu.

**ISBN 978-9934-22-388-4 (print)**

**978-9934-22-389-1 (pdf)**

# PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2019. gada 12. decembrī Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Āzenes ielā 12 k-1, 116. auditorijā.

## OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Gatis Bažbauers,  
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Profesors *Dr. sc. techn.* Peter D. Lund,  
Ālto Universitāte, Somija

Profesors *Dr. sc. ing.* Ainis Lagzdīņš,  
Latvijas Lauksaimniecības universitāte, Latvija

## APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Miķelis Dzikēvičs ..... (paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, sešas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 101 attēls, 21 tabula, trīs pielikumi, kopā 141 lappuse, neieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 131 nosaukums.

## SATURS

IEVADS .....	5
1. ESOŠIE PĒTĪJUMI FMM IZMANTOŠANĀ SILTUMA AKUMULĀCIJAI.....	10
2. EKSPERIMENTĀLĀ IZPĒTE UN VALIDĀCIJA .....	12
3. GADA MODEĻA REZULTĀTI JUTĪBAS ANALĪZEI, OPTIMIZĀCIJAI UN IZMANTOŠANAI AR VAIRĀKU VEIDU FMM .....	14
VISPĀRĪGIE SECINĀJUMI.....	18
LITERATŪRAS SARAKSTS .....	19

# IEVADS

## Problēmas apraksts

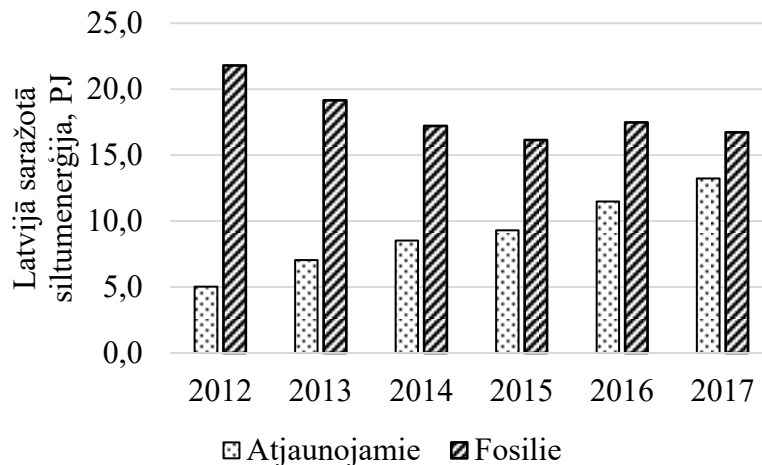
Eiropā 64 % enerģijas mājsaimniecības sektorā tiek patērēts apkurē un karstā ūdens sagatavošanā (*Eurostat*, 2018). Latvijā un citās ziemeļu valstīs apkurei ir sezonāls raksturs, tā tradicionāli tikusi nodrošināta, izmantojot lielas katlumājas un koģenerācijas stacijas pamatslodzei un mazākas sistēmas – pīķu slodzei. Lai cīnītos ar klimata pārmaiņām, pāreja no fosilajiem kurināmajiem galvenokārt ir notikusi virzienā uz biomasas plašāku izmantošanu sadedzināšanas iekārtās. Tomēr, pievēršot paaugstinātu uzmanību emisiju problēmām, biomasas izmantošana nav ideāls atjaunojamais energoresurss (AER). Savukārt saules siltuma (SS) sistēmu tirgus piedzīvo tirgus palēnināšanos ne tikai Latvijā, bet visā Eiropā (*European Solar Thermal Industry Federation*, 2017).

Eiropas ziemeļos SS sistēmas parasti tiek būvētas kā kombinētas sistēmas, kas nodrošina gan apkuri, gan karsto ūdeni. Sistēmās izmanto papildu siltuma avotus, kas nodrošina siltumu periodos, kad nav pietiekama saules radiācija. Saules daļa – siltumenerģijas daļa, kas tiek saražota ar sauli siltumu no kopējā nepieciešamā siltumenerģijas daudzuma – šādās sistēmās ir robežās 15–30 %. Zema saules daļa un nepieciešamās uzstādīšanas vietas ierobežojumi ir bijuši galvenie limitējošie faktori SS plašākai uzstādīšanai. Augsta enerģijas blīvuma siltuma akumulācijas sistēmu esamība ir norādīta kā viena no prasībām, lai paplašinātu SS sistēmu tirgu. (*Weiss & Biermayr*, 2008)

Augstāku blīvumu var iegūt, izmantojot fāžu maiņas materiālus (FMM) latentās siltuma enerģijas akumulācijas (LSEA) sistēmās. Pētījumos LSEA ir izdevies līdz četrām reizēm paaugstināt enerģijas blīvumu (*Bourne & Novoselac*, 2015). Tomēr jāatzīmē, ka lielākā daļa pētījumu ir bijuši uz mazām eksperimentālām sistēmām, kas neņem vērā saules enerģijas mainību gada griezumā un nav esošas metodoloģijas, kā izvēlēties FMM kušanas temperatūras, FMM un ūdens attiecības, kā arī citus aspektus (*Reddy, Mudgal, & Mallick*, 2018). Tāpēc FMM lietderība SS sistēmās nav skaidra.

## Tēmas aktualitāte

Lai samazinātu emisijas no primārās enerģijas ražošanas, direktīva 2009/28/EC un no tās izrietošā direktīva 2018/2001 fokusējas uz enerģijas ražošanu no atjaunojamiem energoresursiem. Latvijā pēdējos gados siltumenerģijas ražošana no AER ir palielinājusies. AER Latvijā veido malka, koksnes atlikumi, granulas un briketes un salmi (1. att.).



1. att. Latvijā saražotā siltumenerģija no atjaunojamiem un fosilajiem energoresursiem (Centrālās statistikas pārvalde, 2019).

Dedzinot šīs AER degvielas, rodas emisijas, kas nonāk gaisā. Šajā procesā Latvijas centieni palielināt AER īpatsvaru rada jaunas problēmas, galvenokārt cieta daļiņu (*PM*) emisijas no biomasas sadedzināšanas. Šāda problēma nebija, kad tika dedzināta dabasgāze. *PM* emisiju problēmas rezultātā tika izstrādātas jaunas direktīvas – 2015/1189, 2016/2284 un citas. *PM* emisijas ir problēma Latvijai – saistībā ar to var tikt piemēroti Eiropas Komisijas sodi. Zema gaisa kvalitāte ierindo Latviju trešajā vietā zaudēto veselīgo gadu skaitā saistībā ar gaisa piesārņojumu Eiropā. (Niemenmaa et al., 2018)

Lai cīnītos ar šīm problēmām, var izmantot tīrākas formas AER kā piemēram, saules enerģija. Limitējošie faktori SS uzstādīšanā ir zemās fosilo kurināmo cenas, trūkstošie apmācīto cilvēku resurss un politiskā apziņa. Tomēr, galvenais faktors ir vietas pieejamība un ar to saistītie faktori, proti, svarīgāko komponentu – siltumenerģijas akumulācijas ar augstu enerģijas blīvumu – esamība. (Weiss & Biermayr, 2008)

Globāli saražotai enerģijai ar SS sistēmām ir nozīmīgs ieguldījums, lai samazinātu siltumnīcefekta gāzu emisijas. 2018. gadā pasaulē SS nodrošināja 42,6 miljonus tonnu naftas jeb 137,5 miljonus tonnu CO<sub>2</sub> ietaupījumu. Līdz 2015. gadam SS bija vadošā AER tehnoloģija, ņemot vērā kopējo uzstādīto jaudu, līdz to apsteidza vēja enerģija un 2018. gadā saules paneļu saražotā enerģija. Tas, kā arī fakts, ka globālais SS tirgus pieaugums samazinās, norāda, ka nepieciešama jaunu tehnoloģija attīstība, kas ļautu izvairīties no CO<sub>2</sub> emisijām. (Weiss & Spork-Dur, 2019)

## Pētījumu objekts

Pētījumu objekts ir termodinamiska sistēma siltumenerģijas akumulācijai ar fāžu maiņas materiāliem.

## Promocijas darba mērķis

Promocijas darba mērķis ir novērtēt FMM izmantošanu siltumenerģijas akumulācijai, lai palielinātu saules frakciju un saules kolektoru efektivitāti.

## Promocijas darba uzdevumi

Lai sasniegtu promocijas darba mērķus, jāizpilda vairāki uzdevumi.

1. Veikt saules kolektoru sistēmu un fāžu maiņas materiālu analīzi, lai izstrādātu dizainu eksperimentālai sistēmai, kas tiks būvēta laboratorijā, un vadīt sistēmas uzstādīšanu.
2. Veikt analīzi un eksperimentus, lai iegūtu datus matemātiskā modeļa validācijai.
3. Izstrādāt īstermiņa simulācijas modeli siltumenerģijas akumulācijas tvertnei un validēt to, izmantojot eksperimentālus datus.
4. Izstrādāt ilgtermiņa simulācijas modeli mājsaimniecības saules siltuma (MSS) sistēmai un novērtēt FMM izmantošanu akumulācijas tvertnē.

## Pētījumu metodes

Promocijas darbā tiek lietotas šādas izpētes metodes: literatūras analīze, eksperimentālā izpēte, termodinamikas analīze, jutības analīze un optimizācija. Simulāciju veikšanai tika izmantots *COMSOL* un *TRNSYS*.

## Promocijas darba zinātniskā novitāte

Atradumi promocijas darbā nodrošina jaunu informāciju FMM izmantošanai enerģijas akumulācijas jomā MSS sistēmās. Izstrādāta inovatīva koncepcija stratificētu fāžu pārejas materiālu izmantošanai siltumenerģijas akumulācijai, koncepcija novērtēta reālā sistēmā.

## Pētījuma praktiskā nozīme

FMM izmantošana siltumenerģijas akumulācijai ir uzskatīta par risinājumu ar augstu potenciālu, kas nodrošinātu enerģijas blīvuma paaugstināšanu un novērstu limitējošos faktorus, kas palēnina saules siltuma sistēmu uzstādīšanas ātrumu un to saules frakciju. Saules enerģijas mainīgums palielina FMM izmantošanas nenoteiktību darbības principu dēļ, jo šiem materiāliem ir jāmaina fāze, lai uzkrātu vairāk enerģijas, salīdzinot ar fiziskā siltuma sistēmām. Kombinācijā ar citiem iespējamajiem mainīgajiem aspektiem sistēmas dizainā pētījumi ir nepieciešami, lai turpinātu latentu siltumenerģijas akumulācijas sistēmu nonākšanu tirgū.

Promocijas darbā izstrādāts testēšanas sistēmas dizains, un tā tika uzstādīta saules siltuma sistēmu laboratorijā. Tā nodrošina iespēja testēt jaunus dizainus un iegūt nepieciešamos eksperimentālos datus matemātiskā modeļa validēšanai. Šķidrums dinamikas sarežģītība kombinācijā ar fāžu maiņu procesiem palielina matemātisko modeļu nenoteiktību, tāpēc eksperimentāla validācija ir svarīgs posms jauna dizaina izstrādē, ko šī sistēma varēs nodrošināt arī tālākā izpētē.



Lielākā daļa esošo eksperimentālo pētījumu ir veikti maza izmēra sistēmās, un pētījumi galvenokārt koncentrējas uz konkrētu fizikālu procesu pētīšanu. Šajā promocijas darbā tika nolemts, ka eksperimentālajai sistēmai ir jābūt reālas sistēmas lielumā, lai nodrošinātu jaunu zinātnisku informāciju. Sistēma ir būvēta pēc izmēriem, kādi ir saules siltuma sistēmās viengimeņu mājsaimniecībās. Tas samazina nenoteiktības, kas rodas no sistēmu mērogošanas, kad sistēmām piemīt sarežģīti siltuma pārnese procesi, tāpēc nodrošina labāku platformu matemātiskā modeļa validācijai.

Simulācijas ir veiktas gan īstermiņam validācijas ietvaros, gan ilgtermiņā (gada), lai iegūtu rezultātus par FMM izmantošanu reālas izmantošanas scenārijā. FMM joprojām ir izstrādes fāzē, kur termofizikālās īpašības materiāliem tiek uzlabotas un pētītas. Ir veikta jutības analīze un atrasti rādītāji ar lielāko ietekmi uz saules frakciju un saules kolektoru efektivitāti.

Izstrādāta metode FMM kušanas punkta atrašanai, kas balstīta uz temperatūras biežuma grafiku. Ražotāji var izmantot šo metodi, lai noskaidrotu biežāk sastopamās temperatūras tvertnē un to, vai notiek temperatūru svārstība virs un zem šī punkta, kas nodrošinātu fāžu maiņu. Izstrādātā metodoloģija piemērota FMM izvēlei, balstoties uz to, kādi materiāli būs kontaktā ar FMM un kāds ir FMM blīvums.

## Darba rezultātu aprobācija

Par promocijas darba tēmu ir publicēti seši zinātniski raksti, kas ir iekļauti *SCOPUS* datubāzē:

- Jansone, D., Dzikevics, M., & Veidenbergs, I. (2018). Determination of thermophysical properties of phase change materials using T-history method. Paper presented at the *Energy Procedia*, 147, 488–494. doi:10.1016/j.egypro.2018.07.057.
- Dzikevics, M., Ansone, A., & Veidenbergs, I. (2017). Experimental investigation of flow rate impact on thermal accumulation system with PCM. Paper presented at the *Energy Procedia*, 128, 386–392. doi:10.1016/j.egypro.2017.09.043.
- Dzikevics, M., Kirsanovs, V., Blumberga, D., & Veidenbergs, I. (2017). Design of experimental investigation about the effects of flow rate and PCM placement on thermal accumulation. Paper presented at the *Energy Procedia*, 113 58-62. doi:10.1016/j.egypro.2017.04.014.
- Dzikevics, M., Ansone, A., & Blumberga, D. (2016). Modelling of phase change in spheres for applications in solar thermal heat storage systems. Paper presented at the *Energy Procedia*, 95, 112–118. doi:10.1016/j.egypro.2016.09.031.
- Dzikevics, M., Blumberga, A., & Blumberga, D. (2015). Conceptual design of experimental solar heat accumulation system with phase change materials. *Agronomy Research*, 13 (2), 477–484. ISSN 1406-894X.
- Dzikevics, M., & Zandeckis, A. (2015). Mathematical model of packed bed solar thermal energy storage simulation. Paper presented at the *Energy Procedia*, 72, 95–102. doi:10.1016/j.egypro.2015.06.014.

Promocijas darba rezultāti prezentēti sešās konferencēs.

- Starptautiskā zinātniskā konference par Vides un klimata tehnoloģijām, CONECT, 2018, Rīga; Latvija.
- Starptautiskā zinātniskā konference par Vides un klimata tehnoloģijām, CONECT, 2017, Rīga; Latvija.
- Starptautiskā zinātniskā konference “Vides un klimata tehnoloģijas”, CONECT, 2016, Rīga; Latvija.
- Starptautiskā konference Biosistēmu Inženierija (Biosystems Engineering), 2015, Tartu, Igaunija.
- Starptautiskā zinātniskā konference “Vides un klimata tehnoloģijas”, CONECT, 2015, Rīga; Latvija.
- Starptautiskā zinātniskā konference par Vides un klimata tehnoloģijām, CONECT, 2014, Rīga; Latvija.

# 1. ESOŠIE PĒTĪJUMI FMM IZMANTOŠANĀ SILTUMA AKUMULĀCIJAI

Potenciāls uzkrāt vairāk enerģiju ir devis iespēju plašākai latentu siltuma akumulāciju sistēmu pētīšanai no aptuveni 100 publikācijām 2000. gadā līdz aptuveni 1000 publikācijām 2017. gadā (*Calderón et al.*, 2019). FMM izmantošana ir pētīta dažādiem lietojumiem – ēkās dzesēšanas un apkures nepieciešamībai, lai samazinātu temperatūras svārstības (*Buttitta, Serale, & Cascone*, 2015; *Cabeza, Castell, Barreneche, De Gracia, & Fernández*, 2011; *Lin, Jia, Alva, & Fang*, 2017) un palīdzētu ēku temperatūras regulēšanai, kas ir vadošā tēma ēku sektorā (*Albatayneh, Alterman, Page, & Moghtaderi*, 2017), akumulācijas tvertnēs (*Buttitta et al.*, 2015), saules enerģijas akumulācijā (*Anson, Dzikevics & Zandeckis*, 2016), audumos (*Sarier & Onder*, 2012) un citur. Visu citu pētījumu pamatā ir bijusi FMM termofizisko parametru pētīšana – kā paaugstināt siltuma vadītspēju, samazināt fāžu atdalīšanos, samazināt superatdzišanu un atrast materiālus ar augstu latentu siltumu (*Barreneche, Navarro, Cabeza, & Fernández*, 2015).

Promocijas darbā ir izmantota brīvi stāvoši iekapsulēti FMM, kas ir ievietoti tvertnē. Brīvi stāvoši nozīmē to, ka konteineri nav nostiprināti fiksētā pozīcijā. Tas ir izvēlēts ar nodomu, ka šāds konteineru novietojums ir vienkāršāks, kas ir svarīgi, ja FMM izmantošana tiktu veikta kā uzlabojums jau esošām fiziskā siltuma akumulācijas sistēmām. Kapsulācija var palielināt siltuma pārneši starp FMM un siltuma pārnesei šķidrums (SPŠ), palielināt mehānisko stabilitāti, kas nodrošina stabili fāžu maiņu ilgākam materiālu mūžam un palielina saderību starp dažādiem FMM un SPŠ.

Pildījuma un apvalka attiecība tika atrasta kā svarīgs aspekts, kas var tikt optimizēts, lai izgatavotu konteineru, kas ir pietiekami spēcīgs un nodrošina maksimālo iespējamo FMM tilpumu tajā. Dabiski, ka materiāli ar augstu siltuma vadītspēju, piemēram, metāli, ir labāki siltuma pārnesei aspektā, tomēr organiskie FMM var arī tikt kombinēti ar tādiem materiāliem kā silīcija dioksīds, kam piemīt augsta mehāniskā izturība, augsta siltumvadītspēja un kas nodrošina augstu pretestību difūzijai. (*Salunkhe & Shembekar*, 2012)

FMM cena ir bijis galvenais limitējošais faktors to plašākai izmantošanai. Promocijas darbā cenas tika iegūtas iepirkumu procedūras rezultātā, kad tika izstrādāta saistošā sistēmā laboratorijā. Tika atrasts, ka FMM cena ir diapazonā no 3,2 EUR/kg līdz 43 EUR/kg. Cena ir atkarīga no pasūtītā apjoma – minimālais pasūtāmais apjoms ir 1 t, kas ir nepieciešama visbiežāk, lai iegūtu standarta nepaaugstinātu cenu; konteineru tipa plātnes, kas tiek plašāk izmantotas atdzesēšanas jomā, maksā mazāk, salīdzinot ar lodveida kapsulām un mazāka izmēra konteineriem, kuru izgatavošana ir sarežģītāka un dārgāka; konteineru materiāls HDPE (augsta blīvuma polietilēns) ir salīdzinoši lētāks, jo no tā ir viegli izgatavojamas formas. Tam piemīt labas saderības ar dažādiem FMM, bet tam ir salīdzinoši sliktas termiskās īpašības un salīdzinoši zema mehāniskā izturība, tāpēc nepieciešamas biezas konteineru sienas. Metāli ir dārgāki, bet nodrošina labāku siltuma pārneši un izturību, tomēr var būt problēmas saistībā ar saderību ar FMM, kas ir korozīvi.

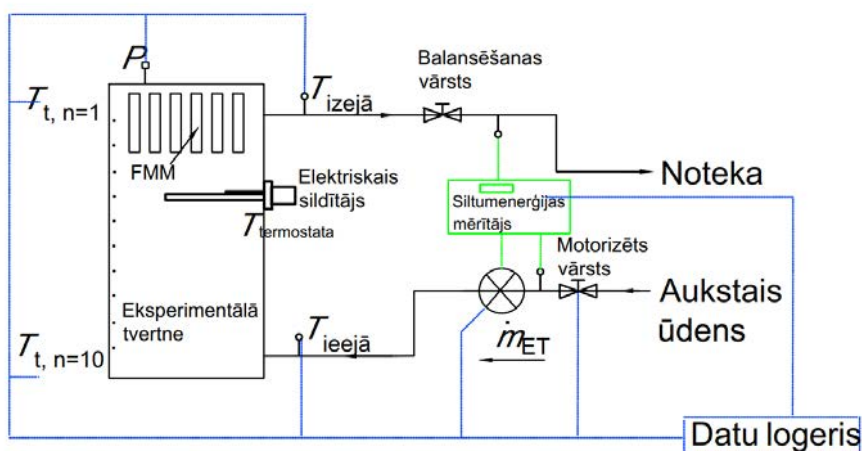
Eksistē divi galvenie matemātisko simulāciju paņēmieni termodinamisku procesu analīzei siltuma akumulācijas sistēmās – datorizētu šķidrums dinamika, ko izmanto specifisku

parametru analīzē, un mainīgu procesu modelēšana ilgtermiņa analīzēm. *TRNSYS* programmatūra tiek bieži lietota siltumenerģijas akumulācijai (SA) un dažos gadījumos SA ar FMM (*Baldwin & Cruickshank, 2016; Belmonte, Eguía, Molina, Almendros-Ibáñez, & Salgado, 2015; Drück & habil Müller-Steinhagen Pfaffenwaldring, 2006; Najafian, Haghghat, & Moreau, 2015; Terziotti, Sweet, & McLeskey, 2012*), tāpēc tas promocijas darbā tika izvēlēts kā simulācijas rīks.

Literatūrā atrodami pētījumi lielākoties apraksta maza izmēra sistēmas, analizē specifiskus procesus FMM izmantošanā un nedod skaidru atbildi par to, vai FMM var tikt izmantoti MSS sistēmās un nodrošināt uzlabojumus, kas samazinātu papildu nepieciešamo enerģijas daudzumu un palielinātu saules frakciju, tāpēc šī jautājuma pētīšana tika definēta par promocijas darba mērķi.

## 2. EKSPERIMENTĀLĀ IZPĒTE UN VALIDĀCIJA

Eksperimentālo sistēmu izstrādāja darba autors. Tā tika uzbūvēta Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātes Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūtā. Tā sastāv no vairākiem saules kolektoriem, hidrauliskās sistēmas, kontroles un eksperimentālās siltuma akumulācijas tvertnes. Hidrauliskā sistēmā ir divi slodzes simulācijas veidi – izmantojot auksto ūdeni un jumta dzesētāju. Daļa no sistēmas, kas izmantota eksperimentālā izpētē, ir parādīta 2.1. attēlā. Galvenās komponentes ir eksperimentālā tvertne (ET), kuras tilpums ir 353 litri, tai ir noņemams vāks, kas nodrošina iespēju tajā ievietot FMM un siltummaiņus (SM). Temperatūras mērīšanas sistēma sastāv no sensoriem, kas izvietoti vertikāli pa tvertnes sānu, kas raksturo temperatūru tvertnē, ieejā un izejā, telpā un FMM konteinerā.



2.1. att. Dzesēšanas eksperimenta ar auksto ūdeni diagramma.

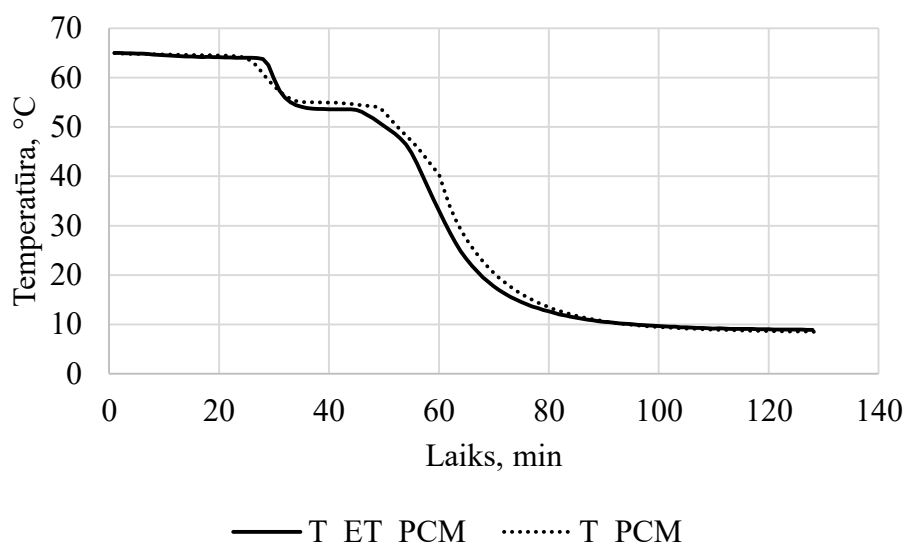
FMM izmantoti eksperimentos ir organiskā veida ar latentā siltuma vērtību 210 kJ/kg, īpatnējo siltumu 0,73 kJ/(kg·K), kušanas punkts ir 55 °C, blīvums – 840 kg/m<sup>3</sup>, siltuma vadītspēja ir 0,2–0,3 W/(m·K). FMM ir ievietoti taisnstūrveida HDPE konteineros ar 1,2 litru tilpumu. Tvertnes augšdaļā tika ievietots 21 konteiners.

Tika pētīti gan sildīšanas, gan dzesēšanas testi. Matemātiska modeļa ierobežojums liedza izmantot iebūvētu elektrisko sildelementu, tāpēc validācijai izmantoja dzesēšanas eksperiments, kas nodrošina stabilākus datus. Ņemot vērā, ka izmantotajam FMM nepiemita superatdzišana, dzesēšanas procesā FMM sekoja tai pašai histerēzei kā sildīšanas eksperimentā, ļaujot rezultātus attiecināt arī uz sildīšanas procesu. Eksperimenta laikā tvertne tiek uzsildīta līdz 65 °C. Kad visi slāņi un FMM sasniedza šo temperatūru, tika uzsākts dzesēšanas process ar tiešas dzesēšanas principu ar 600 L/h caurplūdi.

Galvenie secinājumi, kas izriet no eksperimentālās izpētes, bija: pirmkārt, ātrums, ar kādu FMM un ūdens maina temperatūru, ir līdzīgs, jo ūdenim ir augstāka siltumietilpība un augstāka siltuma vadītspēja, savukārt FMM ir zemāka siltumvadītspēja, bet arī zemāka siltumietilpība; otrkārt, fāžu maiņa konkrētā tvertnes vietā ilga tikai 11 minūtes, tāpēc laika solis simulācijās nevar būt lielāks par 1 minūti; treškārt, siltuma zudumu koeficients  $U = 1,75 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  tika aprēķināts no eksperimentāli iegūtajām vērtībām, un šī  $U$  vērtība tiek vēlāk izmantota matemātiskā modeļa izstrādē un validācijā.

Simulācijas modeļa validācija tiek veikta *TRNSYS* programmatūrā. *TRNSYS* jau sākotnēji ir iebūvētās komponentes fiziskā siltuma akumulācijai, tomēr tajā nav iekļautas komponentes, kas var simulēt FMM tvertnēs. Pētījumu procesā divas komponentes, kas var simulēt FMM, tika iegūtas no citiem pētniekiem, kas tās izstrādāja saistībā ar saules apkures un dzesēšanas programmu (*IEA SHC*) *Task 32, Subtask C* (Streicher et al., 2008). Viens no tiem ir tips 860 un otrs – tips 840. Abi tipi tiek izmantoti, lai validētu eksperimentālos datus no fiziskā siltuma eksperimentiem, bet tikai tips 860 tiek izmantots, lai validētu modeli ar FMM, jo tips 840 neatbalsta tāda izmēra un skaitu ar konteineriem, kādi tika izmantoti eksperimentos. Īstermiņa modelī vienīgā komponente ir tvertne, pārējie elementi ir datu ievadei, izvadei un vizualizācijai. Abi tipi izmanto entalpijas metodi un apraksta fāžu maiņas procesu. Tipā 840 tvertne ir sadalīta 100 slāņos ar kopējo tvertnes augstumu 1260 mm, katra slāņa biezums ir 12,6 mm. Katrā laika solī kalkulācija tiek veikta starp katrām diviem slāņiem, lai ņemtu vērā masas plūsmas no ieejām un izejām, kustības starp slāņiem, siltuma plūsmu no iebūvētajiem siltummaiņiem un papildu siltuma avotiem, siltuma vadītspēju starp slāņiem, siltuma zudumus un enerģijas apmaiņu starp akumulācijas vidi un FMM moduļiem.

Lai arī abus tipus ir validējuši to izstrādātāji (Bony & Citherlet, 2007; Schranzhofer, Schranzhofer, Puschnig, Heinz, & Streicher, 2006), validācija tika veikta tipam 840 ar ūdeni un tipam 860 tikai ar ūdeni un ar ūdeni un FMM. Salīdzinot eksperimentālos datus ar modeļiem bez FMM, izmantojot tipu 860, enerģija no sistēmas abos scenārijos tika novadīta par 11 % mazāk, savukārt tipam 840 – par 4 % mazāk scenārijā bez FMM. Salīdzinot temperatūras izmaiņas ūdenī un FMM, tika iegūta laba saderība ar noteikšanas koeficienta  $R^2$  vērtībām virs 0,9. Piemēram, FMM temperatūru sakritība ir ar koeficientu  $R^2 = 0,99$ , kas liecina, ka fāžu maiņai ir vienāds raksturs (2.2. att.).



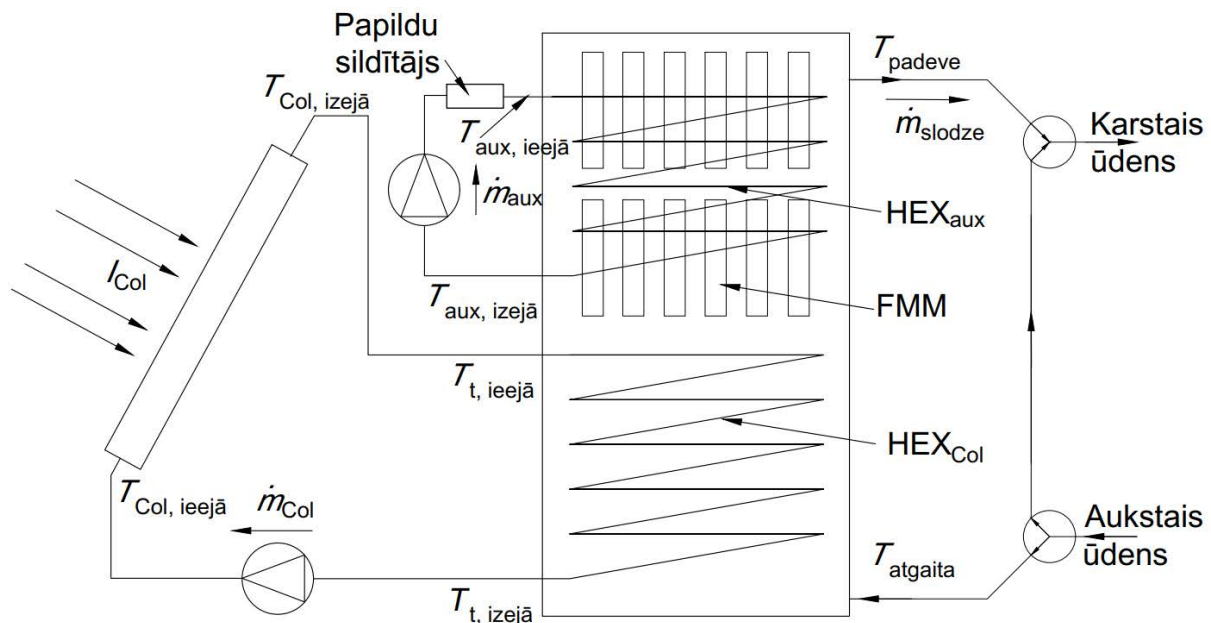
2.2. att. FMM temperatūras salīdzinājums dzesēšanas eksperimentam un modelī.

Gada simulācijās tiek izmantoti cilindriski konteineri, tāpēc tipa 840 ierobežojumi uz taisnstūrveida konteineru izvietojumu nav būtiski, turklāt šim tipam bija labāka enerģijas vērtību sakritība, kā arī ar to ir ērtāk strādāt, tāpēc tas tika izvēlēts kā galvenais tips gada simulācijās.

### 3. GADA MODEĻA REZULTĀTI JUTĪBAS ANALĪZEI, OPTIMIZĀCIJAI UN IZMANTOŠANAI AR VAIRĀKU VEIDU FMM

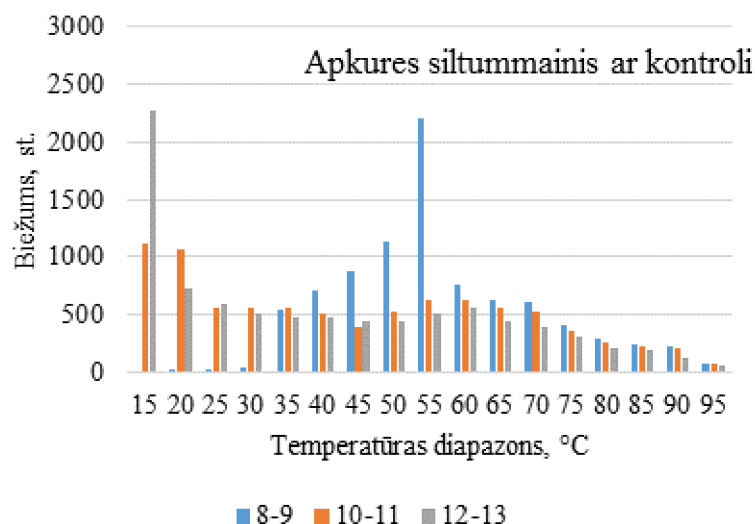
Īstermiņa eksperimenti un simulācijas, kas atrodami literatūrā, rādīja, ka FMM akumulācijas tvertnes var nodrošināt augstāku enerģijas blīvumu, tomēr šajos eksperimentos sildīšana pārsvarā notiek nemainīgos apstākļos. Lai FMM izmantotu brīvi stāvošu sistēmu veidā mājāsaimniecību SS sistēmās, ir nepieciešami gada dati ar faktiskiem klimata apstākļiem, un šādas informācijas literatūrā trūka. Tāpēc gada modelis tika izstrādāts, balstoties uz komponentēm, kas tika validētas, izmantojot eksperimentālos datus.

Sistēma sastāv no akumulācijas tvertnes, saules kolektora, sūkņa, kontroliera un papildu siltuma avota (3.1. att.). Saules kolektoru platība izvēlēta kā 1/60 daļa no akumulācijas tilpuma. Akumulācijas tilpums ir saglabāts tāds pats kā eksperimentālajā sistēmā – 353 litri, attiecīgi kolektoru platība – 5,8 m<sup>2</sup>. Hidrauliskais loks kolektora pusē ir tieši savienots ar tvertni, lai samazinātu nenoteiktības, ko radītu ārējā siltummaiņa izmantošana. Cirkulācijas sūknis tiek izmantots, lai kontrolētu caurplūdi kolektoros. Siltuma zudumi ir samazināti, salīdzinot ar eksperimentālo sistēmu no 4,29 W/K uz 2,4 W/K.



3.1. att. Saules siltuma sistēma gada simulācijai.

Papildu sildītājs var būt iebūvēts tvertnē, atrasties ārpus tvertnes un siltumu pievadīt ar iegremdētu siltummaini vai arī atrasties pēc tvertnes uz karstā ūdens padošanu. Lai izvēlētos FMM piemērotāko dizainu, tika veikta temperatūras biežuma analīze. Tika noskaidrots, ka iegremdēta siltummaiņa kombinācija ar kontrolieri, kam ir iespēja uzstādīt robežnosacījumus, nodrošina izteiktākus temperatūras biežuma pīķus, kas norāda uz temperatūrām, kas varētu būt piemērotas FMM izmantošanai (3.2. att.). Pēc temperatūras biežuma dažādos līmeņos tvertnē ir iespējams noteikt, cik bieži temperatūras ir virs un zem šiem pīķiem. Temperatūras svārstības ir nepieciešamas, lai notiktu FMM fāžu maiņa un tiktu izmantots to latentais potenciāls.



3.2. att. Temperatūras biežums stundu datiem gada simulācijai bez FMM ar apkures siltummaini un kontroli.

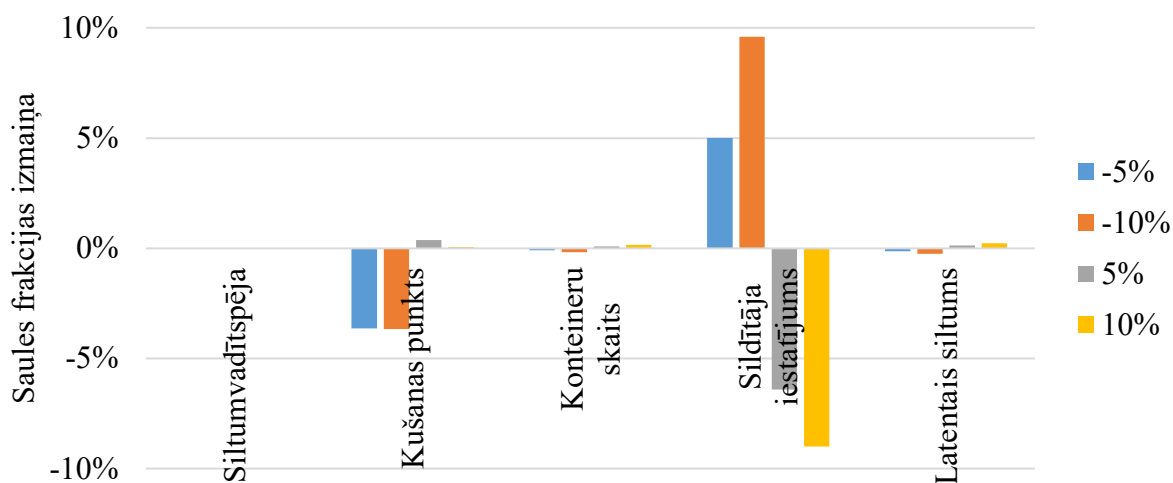
Gada modelī izmantotā FMM īpatnējais siltums ir  $1,8 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$  cietā fāzē un  $2,4 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$  šķidrā fāzē, latentais siltums –  $185 \text{ kJ}/\text{kg}$ , blīvums –  $1100 \text{ kg}/\text{m}^3$ , siltuma vadītspēja –  $4,5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Tiek izmantoti 150 cilindriski alumīnija konteineri ar 40 mm ārējo diametru un 38 mm iekšējo diametru.

Lietotāju patēriņš ir bāzēts uz pieņēmumiem, ka sistēma paredzēta trīs personām ar vidējo dienas patēriņu 50 litri uz personu, kas veido 150 litrus dienā. Lietošanas profils ir ar konstantu temperatūru izejā, kas tiek panākts, jaucot karsto ūdeni no tvertnes augšpusē ar auksto ūdeni no tīkla. Patēriņa profils ir balstīts uz Eiropas atsauci krāna ūdens ciklim (*Bonk, 2012*).

Lai noskaidrotu galvenos parametrus, kas ietekmē saules siltuma sistēmu māsaimniecībai ar FMM, tika veikta jutības analīze. Tika konstatēti vismaz 12 aspekti, kas ietekmē sistēmu, no kuriem pieci tika izvēlēti, analīzei izmantojot metodi, kurā vienlaikus tiek mainīts tikai viens no rādītājiem. Tika analizēti šādi aspekti: 1) FMM siltuma vadītspēja; 2) kušanas temperatūra; 3) konteineru skaits; 4) latentais siltums; 5) sildītāja uzstādītā temperatūra. Katram aspektam tika pētītas +5 %, +10 %, –5 % un –10 % variācijas no bāzes scenārija.

Jutības analīze parādīja, ka galvenie aspekti, kas ietekmē sistēmas darbību, ir FMM kušanas punkts un sildītāja iestatījuma vērtība (3.3. att.). Kad kušanas temperatūra ir zemāka, salīdzinot ar bāzes scenāriju, samazinās saules kolektoru efektivitāte un saules frakcija, jo 99,7 % no gada FMM ir pilnībā izkusušā stāvoklī un darbojas tikai kā fiziska siltuma akumulators ar sliktākām īpašībām, salīdzinot ar ūdeni. Augstākai kušanas temperatūra nav būtiskas ietekmes uz saules frakciju un kolektoru efektivitāti. Ar zemāku uzstādīto papildu sildītāja temperatūru tvertne ir vēsāka, un tas palielina kolektoru efektivitāti un saules frakciju un samazina siltuma zudumus par 7,3 %. Samazinot iestatījumu par 10 %, vidējā temperatūra kolektoru ieejā samazinās no  $48,5 \text{ °C}$  uz  $47,6 \text{ °C}$  (1,8 % samazinājums), kas savukārt palielina kolektoru efektivitāti par 2 %. Tomēr samazinātā temperatūra rada situāciju, kad temperatūra, kas tiek padota patērētājam, ir zemāka par  $54 \text{ °C}$  vairāk nekā 50 % no karstā ūdens padošanas laika gadā. Siltuma vadītspējai un konteineru skaitam ir lineāra ietekme pētītajā diapazonā, kur, abiem palielinoties par 10 %, saules frakcija pieaug par mazāk nekā 0,2 %.



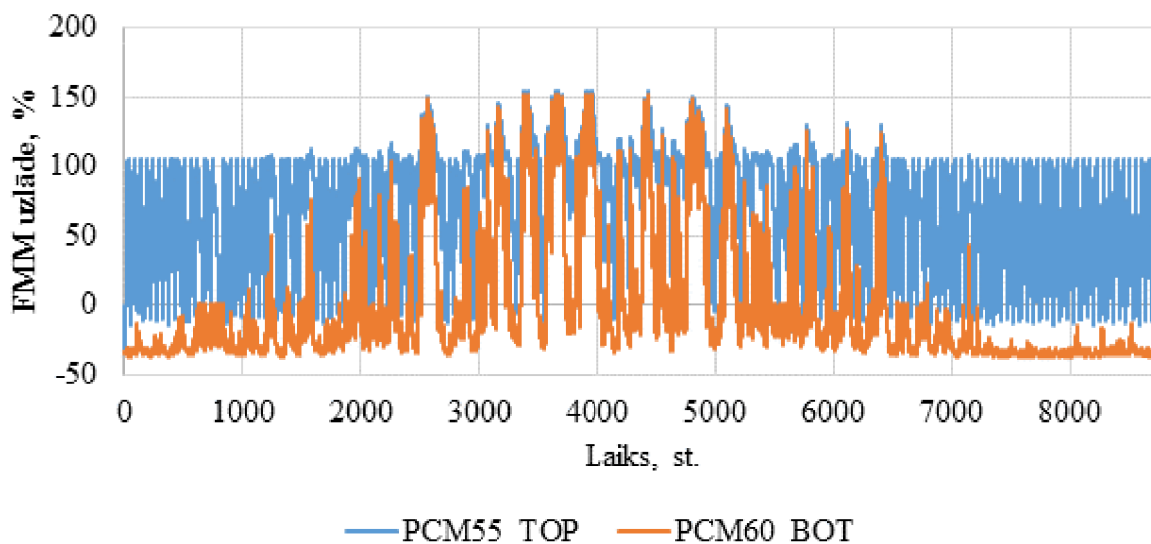


3.3. att. Saules frakcijas izmaiņa atkarībā no aspektu variācijām.

Balstoties uz jutības analīzi, galvenie aspekti, kas ietekmē sistēmas darbību, ir kušanas punkts un sildītāja iestatījums. Sildītāja temperatūras iestatījumam ir ierobežojums – temperatūrai ir jābūt augstākai par to, kas nepieciešama karstajam ūdenim – tāpēc tam nav plašas optimizācijas iespējas. Bet ir iespējams optimizēt kontroles mehānismu, kad sildītājs tiek ieslēgts. Optimizācijas scenārijā sildītājs darbojas, balstoties uz FMM nevis ūdens temperatūru, kas nodrošina to, ka FMM tiek pilnībā izkausēts, pēc tam ļaujot tam pilnībā sacietēt. FMM sacietēšanai temperatūra tvertnē nokrīt zem 55 °C, proti, zem temperatūras, kas nepieciešama patērētājam. Lai samazinātu periodus ar temperatūru zem nepieciešamās, tika pētītas robežvērtības (*deadbands* no ang. val.) un sildītāja jauda. Tika atrasts, ka robežvērtības samazināšana no 5 °C uz 4 °C ir optimālākais variants no pētītajiem.

Salīdzinot bāzes scenāriju, kurā tiek izmantots tvertnes augšpusē novietots FMM ar 55 °C kušanas punktu, ar scenāriju bez FMM, saules frakcija palielinājās par 6 %, kolektora efektivitāte par 3,5 % un par 11,6 % samazinājās papildu sildīšanai nepieciešamā enerģija, palielinot periodu, kurā netiek sasniegta nepieciešamā ūdens temperatūra izejā. Sildītāja kontrole, vadoties no FMM temperatūras, kombinācijā ar FMM ietekmē sistēmu, samazinot nepieciešamo papildu enerģiju, kas savukārt samazina vidējo tvertnes temperatūru un siltuma zudumus, palielina enerģijas daudzumu, ko var uztvert ar saules kolektoriem un attiecīgi saules frakciju.

Izvērtējot iespēju izmantot vairākus FMM ar dažādām kušanas temperatūrām, tika izanalizēti trīs scenāriji. Pirmais scenārijs balstīts uz temperatūras biežuma grafikiem, kas tika iegūti no sistēmas bez FMM, kurā ir divi pīķi – viens pie 55 °C (tvertnes augšpusē), otrs pie 60 °C (tvertnes lejasdaļā saules siltummaiņa līmenī). Šis scenārijs tiek analizēts, jo temperatūras biežuma grafikam nepieciešamos datus ražotāji var iegūt pirms FMM izmantošanas, lai noteiktu piemērotu FMM kušanas temperatūru. Otrs scenārijs balstīts uz temperatūras biežuma grafiku, kas tika iegūts, izmantojot viena veida FMM ar 55 °C tvertnes augšpusē. Otrajā scenārijā FMM ar kušanas temperatūru 55 °C tiek izmantots augšpusē un FMM ar kušanas temperatūru 35 °C tvertnes apakšā. Trešais scenārijs balstīts uz standarta stratifikāciju, kur FMM ar 55 °C ir augšpusē, ar 45 °C – vidū un ar 35 °C – apakšā.



3.4. att. FMM uzlāde gada laikā divu FMM izkārtojuma ar 55 °C FMM augšpusē (*PCM55\_TOP*) un 60 °C FMM (*PCM60\_BOT*) apakšpusē.

Kā var redzēt 3.4. attēlā, FMM ar 55 °C pilnībā uzlādējas un izlādējas periodos ar mazāku saules radiāciju, kad apsildi vairāk nodrošina papildu siltuma avots. Savukārt apakšējais FMM biežāk pilnībā uzlādējas un izlādējas tieši vasaras periodā, kad ir vairāk saules starojuma un tvertne mēdz pārkarst, sasniedzot 60 °C arī tvertnes apakšā. Tomēr, salīdzinot vairāku FMM izmantošanu, tika noskaidrots, ka, lai arī sistēma joprojām palielināja saules frakciju, salīdzinot ar scenāriju bez FMM, nevienā no scenārijiem ar vairākiem FMM netika iegūti labāki rezultāti par tiem, kādi iegūti ar vienu FMM tvertnes augšpusē.

Balstoties uz literatūras analīzi, augsta enerģijas blīvuma siltumenerģijas akumulācijas sistēmas varētu palielināt saules enerģijas tehnoloģiju ieviešanas ātrumu, kam varētu palīdzēt saistošu vadlīniju izstrāde. Tomēr simulāciju rezultāti rāda, ka ir liels mainīgo skaits, kas jāņem vērā, lai panāktu sistēmas efektivitātes pieaugumu, izmantojot brīvi stāvošus FMM, un dziļāka izvērtēšana ir nepieciešama katram individuālam lietojumam. Tāpēc ir izstrādātas vispārīgākas vadlīnijas, lai palīdzētu noteikt piemērotu FMM, balstoties uz FMM konteinera materiālu, siltumnesēja blīvuma un sistēmas darba temperatūras diapazonu.

## VISPĀRĪGIE SECINĀJUMI

1. Promocijas darbā ir veikta siltumenerģijas akumulācijas sistēmas ar FMM eksperimentālā izpēte un matemātiskā simulācija *TRNSYS* vidē. Īstermiņa analīze veikta eksperimentāli, un iegūtie dati tika izmantoti, lai validētu īstermiņa matemātisko modeli. Balstoties uz īstermiņa analīzes rezultātiem, tika izstrādāts ilgtermiņa modelis, lai analizētu FMM izmantošanu mājsaimniecībās saules siltuma sistēmā Latvijas klimatā.
2. Tika veikta jutības analīze, izmantojot metodi, kur tiek mainīts tikai viens parametrs katrā reizē. Analīzē tika pētīti pieci aspekti: FMM siltuma vadītspēja; kušanas temperatūra; konteineru skaits; sildītāja uzstādījumi; latentais siltums; un četras variācijas:  $-10\%$ ,  $-5\%$ ,  $+5\%$  un  $+10\%$ . Jutības analīzes rezultāti parāda, ka FMM kušanas punkts un papildus nepieciešamā sildītāja iestatījumam ir augstāka ietekme uz saules frakciju un kolektora efektivitāti.
3. Veicot siltuma akumulācijas optimizāciju ar FMM, tika noskaidrots, ka, lai panāktu pilnīgu FMM uzlādi un izlādi, papildu sildītāju ir jākontrolē ar temperatūras sensoru, kas ir ievietots FMM. Ar optimizētu kontroli papildu sildītāja patērētā enerģija tika samazināta par 148 kWh, bet par 42 kWh samazinājās arī enerģijas daudzums, kas tiek nodots patērētājam karstā ūdens veidā. Tā rezultātā temperatūra ūdenim, kas tiek padots uz slodzi, bija zem iestatītās temperatūras  $55\text{ °C}$   $10\%$  no darbības perioda. Vienlaikus kombinācija ar FMM par  $11\%$  samazināja papildu enerģiju, par  $6\%$  palielināja saules frakciju un par  $3,5\%$  – kolektora efektivitāti.
4. Promocijas darba hipotēze tika balstīta uz teorētisko tvertnes enerģijas blīvumu, kas pie noteikta temperatūras diapazona ( $40\text{ K}$ ) ir augstāks vairāku FMM sistēmās. Gada simulāciju rezultāti atbalsta hipotēzi, iegūstot augstāku saules frakciju un kolektoru efektivitāti, izmantojot stratificētus FMM salīdzinājumā ar sistēmu bez FMM. Tomēr tāpat ir secināms, ka teorētiskais tvertnes enerģijas blīvums nav izmantojams, lai novērtētu FMM lietderību saules apkures sistēmās. Trīs veidu FMM sistēmām enerģijas blīvums ir par  $26,3\%$  augstāks, salīdzinot ar viena veida FMM, bet ilgtermiņa simulācijās tika iegūta zemāka saules frakcija un kolektoru efektivitāte.

## LITERATŪRAS SARAKSTS

- Albatayneh, A., Alterman, D., Page, A., & Moghtaderi, B. (2017). The Significance of Temperature Based Approach Over the Energy Based Approaches in the Buildings Thermal Assessment, *19*, 39–50. <https://doi.org/10.1515/rtuct-2017-0004>.
- Ansone, A., Dzikevics, M., & Zandeckis, A. (2016). Energy Accumulation Using Encapsulated Phase Change Materials with Recycled Material Components. In *Energy Procedia* (Vol. 95). <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.037>.
- Baldwin, C., & Cruickshank, C. A. (2016). Using TRNSYS Types 4, 60 and 534 to model residential cold thermal storage units using water and water/glycol solutions. In *eSIM 2016 Conference Proceedings*. Retrieved from <http://www.ibpsa.org/proceedings/eSimPapers/2016/52-77-eSim2016.pdf>.
- Barreneche, C., Navarro, M. E., Cabeza, L. F., & Fernández, A. I. (2015). New database to select phase change materials: Chemical nature, properties, and applications. *Journal of Energy Storage*, *3*, 18–24. <https://doi.org/10.1016/j.est.2015.08.003>.
- Belmonte, J. F., Eguía, P., Molina, A. E., Almendros-Ibáñez, J. A., & Salgado, R. (2015). A simplified method for modeling the thermal performance of storage tanks containing PCMs. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.10.111>.
- Bonk, S. (2012). Methodology for the Assessment of the Hot Water Comfort of Factory Made Systems and Custom Built Systems.
- Bony, J., & Citherlet, S. (2007). Numerical model and experimental validation of heat storage with phase change materials. *Energy and Buildings*, *39*(10), 1065–1072. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.10.017>.
- Bourne, S., & Novoselac, A. (2015). PCM-based High-density Thermal Storage Systems for Residential and Small Commercial Retrofit Applications. *Procedia Engineering*, *121*, 536–543. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.1025>.
- Buttitta, G., Serale, G., & Cascone, Y. (2015). Enthalpy-temperature evaluation of slurry phase change materials with T-history method. *Energy Procedia*, *78*, 1877–1882. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.352>.
- Cabeza, L. F., Castell, A., Barreneche, C., De Gracia, A., & Fernández, A. I. (2011). Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *15*(3), 1675–1695. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.018>.
- Calderón, A., Barreneche, C., Hernández-Valle, K., Galindo, E., Segarra, M., & Fernández, A. I. (2019). Where is Thermal Energy Storage (TES) research going? – A bibliometric analysis. *Solar Energy*. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2019.01.050>.
- Centrālās statistikas pārvalde. (2019). Environment and Energy. Retrieved January 1, 2019, from [https://data1.csb.gov.lv/pxweb/lv/vide/vide\\_energetika\\_ikgad/ENG150.px/](https://data1.csb.gov.lv/pxweb/lv/vide/vide_energetika_ikgad/ENG150.px/).
- Drück, H., & habil Müller-Steinhagen Pfaffenwaldring, D.-I. H. (2006). *MULTIPOINT Store - Model for TRNSYS Stratified fluid storage tank with four internal heat exchangers, ten connections for direct charge and discharge and an internal electrical heater Type 340*. Stuttgart. <https://doi.org/10.03.06>.
- European Solar Thermal Industry Federation. (2017). *Solar Heat Markets in Europe: Trends and Market Statistics 2017*. Retrieved from [http://solarheateurope.eu/wp-content/uploads/2017/11/Solar\\_Heat\\_Markets\\_2017-Web-based-version.pdf](http://solarheateurope.eu/wp-content/uploads/2017/11/Solar_Heat_Markets_2017-Web-based-version.pdf).
- Eurostat. (2018). Energy consumption in households - Statistics Explained. Retrieved February 5, 2019, from [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy\\_consumption\\_in\\_households#cite\\_note-1](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_consumption_in_households#cite_note-1).
- Lin, Y., Jia, Y., Alva, G., & Fang, G. (2017). Review on thermal conductivity enhancement, thermal properties and applications of phase change materials in thermal energy storage.

- Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (September), 0–1.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.002>.
- Najafian, A., Haghghat, F., & Moreau, A. (2015). Integration of PCM in domestic hot water tanks: Optimization for shifting peak demand. *Energy and Buildings*, 106, 59–64.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.036>.
- Niemenmaa, V., Happach, B., Kubat, J., Otto, J., Pirelli, L., Simeonova, R., ... Coelho, J. (2018). *Special Report. Air pollution*. Retrieved from  
[https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR18\\_23/SR\\_AIR\\_QUALITY\\_EN.pdf](https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR18_23/SR_AIR_QUALITY_EN.pdf).
- Reddy, K. S., Mudgal, V., & Mallick, T. K. (2018). Review of latent heat thermal energy storage for improved material stability and effective load management. *Journal of Energy Storage*, 15, 205–227. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2017.11.005>.
- Salunkhe, P. B., & Shembekar, P. S. (2012). A review on effect of phase change material encapsulation on the thermal performance of a system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 5603–5616. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.05.037>.
- Sarier, N., & Onder, E. (2012). Organic phase change materials and their textile applications: An overview. *Thermochimica Acta*, 540, 7–60. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2012.04.013>.
- Schranzhofer, H., Schranzhofer, H., Puschnig, P., Heinz, A., & Streicher, W. (2006). Validation of a TRNSYS simulation model for PCM energy storage and PCM wall construction elements, Ecstock06 proceedings. Retrieved from  
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.520.6262>.
- Streicher, W., Bony, J., Citherlet, S., Heinz, A., Pusching, P., Schramzhofer, H., & Schultz, J. M. (2008). Simulation models of PCM storage units. *A Report of IEA Solar Heating and Cooling ...*, (March). Retrieved from  
<http://ww.ia-shc.org/publications/downloads/task32-c5.pdf>.
- Terziotti, L. T., Sweet, M. L., & McLeskey, J. T. (2012). Modeling seasonal solar thermal energy storage in a large urban residential building using TRNSYS 16. *Energy and Buildings*, 45, 28–31. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.10.023>.
- Weiss, W., & Biermayr, P. (2008). *Potential of Solar Thermal in Europe*. Vienna. Retrieved from [www.estif.org](http://www.estif.org).
- Weiss, W., & Spork-Dur, M. (2019). *Solar Heat Worldwide*. 8200 Gleisdorf, Austria.