VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Saulius PAKALKA

FAZINIO VIRSMO MEDŽIAGOS PAGRINDU
VEIKIANČIO ŠILUMOS KAUPIMO
ĮRENGINIO CHARAKTERISTIKŲ TYRIMAI

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
MECHANIKOS INŽINERIJA (T 009)

Vilnius, 2022

Disertacija rengta 2017–2022 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Vadovas

doc. dr. Kęstutis VALANČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, mechanikos inžinerija – T 009).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Mechanikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

prof. dr. Dalius MAŽEIKA (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, mechanikos inžinerija – T 009).

Nariai:

doc. dr. Juozas BIELSKUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, mechanikos inžinerija – T 009),

doc. dr. Sergejus BORODINAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, mechanikos inžinerija – T 009),

dr. Darius MILČIUS (Lietuvos energetikos institutas, energetika ir termoinžinerija – T 006),

prof. habil. dr. Anatolij PAVLENKO (Kelcų technologijos universitetas, Lenkija, energetika ir termoinžinerija – T 006).

Disertacija bus ginama viešame Mechanikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2022 m. kovo 25 d. 10 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel. (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vilniustech.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2022 m. vasario 24 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus Gedimino technikos universiteto talpykloje <http://dspace.vgtu.lt> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto 2022-001-M mokslo literatūros knyga
doi:10.20334/2022-001-M

© Vilniaus Gedimino technikos universitetas, 2022

© Saulius Pakalka, 2022

saulius.pakalka@vilniustech.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Saulius PAKALKA

RESEARCH OF CHARACTERISTICS OF A
PHASE CHANGE MATERIAL BASED
THERMAL ENERGY STORAGE UNIT

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
MECHANICAL ENGINEERING (T 009)

Vilnius, 2022

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2017–2022.

Supervisor

Assoc. Prof. Dr Kęstutis VALANČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Mechanical Engineering – T 009).

The Dissertation Defence Council of Scientific Field of Mechanical Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Prof. Dr Dalius MAŽEIKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Mechanical Engineering – T 009).

Members:

Assoc. Prof. Dr Juozas BIELSKUS (Vilnius Gediminas Technical University, Mechanical Engineering – T 009),

Assoc. Prof. Dr Sergejus BORODINAS (Vilnius Gediminas Technical University, Mechanical Engineering – T 009),

Dr Darius MILČIUS (Lithuanian Energy Institute, Energetics and Power Engineering – T 006),

Prof. Dr Habil. Anatolij PAVLENKO (Kielce University of Technology, Poland, Energetics and Power Engineering – T 006).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Mechanical Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **10 a. m. on 25 March 2022**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vilniustech.lt

A notification on the intent to defend the dissertation was sent on 24 February 2022.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at Vilnius Gediminas Technical University repository <http://dspace.vgtu.lt> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Reziumė

Disertacijoje taikant analitinį modelį, skaitinį modeliavimą ir eksperimentinius tyrimus tiriamas fazinio virsmo medžiagos pagrindu veikiantis šilumos kaupimo įrenginys.

Darbe sprendžiami keli pagrindiniai uždaviniai, susiję su fazinio virsmo medžiagų termofizikinių savybių, šilumokaičio geometrijos ir šilumnešio parametrų įtaka fazinio virsmo medžiagos (FVM) pagrindu veikiančio šilumos kaupimo įrenginio veikimo charakteristikoms.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai ir du priedai.

Įvadiniamе skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pristatomos disertacijos tema autoriaus paskelbtos publikacijos ir pranešimai konferencijose bei disertacijos struktūra.

Pirmasis skyrius skirtas literatūros analizei. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir tikslinami disertacijos uždaviniai.

Antrajame skyriuje pateikta FVM pagrindu veikiančio šilumos kaupimo įrenginio tyrimų metodika, kurios pagrindu atliekamas kompleksinis tyrimas, apimantis skaitinį modeliavimą, analitinių išraiškų taikymą ir eksperimentus.

Trečiajame skyriuje pateikti FVM pagrindu veikiančio šilumos kaupimo įrenginio tyrimų rezultatai. Analizuojami skaitinio modeliavimo rezultatai, nagrinėjant temperatūros pasiskirstymą ir fazės virsmo trukmę pasirinktuose FVM šilumos kaupimo įrenginio taškuose ir plokštumoje. Atliekamas šilumos atidavimo koeficiento nustatymas taikant analitines išraiškas, gauti rezultatai lyginami su eksperimentiniais. Aprašomi ir analizuojami eksperimentinių tyrimų, apimančių FVM tankio kitimo, šilumokaičio geometrijos, šilumnešio masinio debito ir temperatūros įtaką įrenginio veikimo charakteristikoms, rezultatai.

Abstract

This dissertation dissects the phase change material based thermal energy storage unit by applying an analytical model, numerical modelling, and experimental research.

The thesis addresses several key objectives related to the effect of the thermophysical properties of phase change materials, the geometry of the heat exchanger, and the parameters of the heat transfer fluid on the operational characteristics of the phase change material (PCM) based thermal energy storage unit.

The dissertation consists of an introduction, three chapters, general conclusions, lists of used literature and the author's publications on the subject of the dissertation, and two appendices.

The introduction covers the investigated problem and the relevance of the thesis, describes the object of the research, formulates the aim and tasks of the thesis, describes the research methodology, the scientific novelty of the thesis, the practical significance of its results and defended statements. The introduction closes with the overview of the author's publications and conference reports on the subject of the dissertation and the outline of the dissertation structure.

Chapter 1 deals with the literature analysis and closes with a formulation of conclusions and specification of the objectives of the dissertation.

Chapter 2 covers the research methodology for the PCM thermal energy storage unit providing the foundation for the integrated study that includes numerical modelling, application of analytical expressions, and experimentation.

The research results for the PCM thermal energy storage unit are presented in Chapter 3. It analyses the outcomes of numerical modelling whilst studying the distribution of temperature and the duration of phase change at the selected points and plane of the PCM thermal energy storage unit. A determination of the heat transfer coefficient is conducted by applying analytical expressions, and the results obtained are compared to the results of the experiments. The further description and analysis delve into the results of experimental research covering the effects of the change in the PCM density, the geometry of the heat exchanger, and the mass flow rate and temperature of the heat transfer fluid on the operational characteristics of the unit.

Žymėjimai

Simboliai

A – plotas;
 a – temperatūros laidumo koeficientas;
 c_p – savitoji šiluma esant pastoviam slėgiui;
 g – laisvojo kritimo pagreitis;
 h – savitoji entalpija;
 L – būdingasis matmuo, aukštis;
 $\dot{m}$ – šilumnešio masinis debitas;
 m – masė;
 Nu – Nuselto kriterijus;
 $\dot{Q}$ – šilumos srautas;
 Q – energijos kiekis;
 Pr – Prandtlio kriterijus;
 Ra – Reilio kriterijus;
 S – būdingasis matmuo, plotis;
 T – temperatūra;

α – šilumos atidavimo koeficientas;
 β – terminis tūrinio plėtimosi koeficientas;
 λ – šilumos laidumo koeficientas;
 μ – dinaminės klampos koeficientas;
 ν – kinematinės klampos koeficientas;
 ρ – tankis;
 τ – proceso trukmė.

Indeksai

1, 2, 3, ... – matavimo taško numeris;
f – fazė;
FVM – fazinio virsmo medžiaga;
G – grįžtamas šilumnešis (vanduo);
KV – karštas vanduo;
PAV – šilumokaičio paviršius;
SF – skystoji fazė;
ŠV – šaltas vanduo;
T – tiekiamas šilumnešis (vanduo);
VID – vidutinis.

Santrumpos

3D – trimatis;
AEI – atsinaujinantys energijos ištekliai;
DSK – diferencinė skenuojamoji kalorimetrija;
FVM – fazinio virsmo medžiaga;
MEL – veikimo režimas (įkrovimas);
SOL – veikimo režimas (iškrovimas);
VP – vamzdinis plokštelinis (kompaktiškas);
VPV – vamzdžių pluoštas vamzdyje.
VV – vamzdis vamzdyje.

Turiny

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas.....	3
Darbo tikslas.....	3
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai	5
Darbo rezultatų aprobavimas.....	5
Disertacijos struktūra.....	5
 1. FAZINIO VIRSMO MEDŽIAGŲ NAUDOJIMO ŠILUMAI KAUPTI TYRIMŲ ANALIZĖ.....	 7
1.1. Šilumos kaupimo metodai	8
1.2. Fazinio virsmo medžiagų naudojimas šilumai kaupti.....	11
1.3. Fazinio virsmo medžiagų parinkimo kriterijai.....	13
1.4. Šilumos kaupimo įrenginių teoriniai tyrimai.....	18
1.4.1. Natūrali konvekcija.....	23
1.4.2. Tankio pokytis	25
1.5. Šilumos kaupimo įrenginių eksperimentiniai tyrimai.....	26
1.6. Šilumos kaupimo įrenginių charakteristikų prognozavimas.....	29

1.7. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	30
2. FAZINIO VIRSMO MEDŽIAGOS PAGRINDU VEIKIANČIO ŠILUMOS KAUPIMO ĮRENGINIO CHARAKTERISTIKŲ TYRIMŲ METODIKA.....	33
2.1. Kompleksinis šilumos kaupimo įrenginio charakteristikų vertinimas.....	33
2.2. Šilumos mainų proceso skaitinis modelis.....	36
2.3. Šilumos kaupimo įrenginio galios ir energijos kiekio nustatymas	38
2.4. Šilumos atidavimo koeficiento nustatymas	39
2.5. Šilumos kaupimo įrenginio eksperimentinių tyrimų metodika.....	41
2.5.1. Eksperimentinių tyrimų stendas.....	42
2.5.2. Tiriamasis šilumos kaupimo įrenginys	45
2.5.3. Šilumos atidavimo koeficiento tyrimas	50
2.5.4. Šilumokaičio geometrijos tyrimas	51
2.5.5. Šilumnešio masinio debito tyrimas.....	51
2.5.6. Fazinio virsmo medžiagos tankio pokyčio tyrimas.....	52
2.5.7. Šilumos kaupimo įrenginio įkrovimo ir iškrovimo trukmės prognozavimas.....	53
2.5.8. Eksperimentinių tyrimų neapibrėžtis	54
2.6. Antrojo skyriaus išvados	54
3. FAZINIO VIRSMO MEDŽIAGOS PAGRINDU VEIKIANČIO ŠILUMOS KAUPIMO ĮRENGINIO CHARAKTERISTIKŲ TYRIMŲ REZULTATAI	57
3.1. Skaitinis modeliavimas.....	57
3.2. Šilumos atidavimo koeficientas.....	64
3.2.1. Šilumos atidavimo koeficiento eksperimentinis nustatymas	65
3.2.2. Šilumos atidavimo koeficiento eksperimentinių ir teorinių verčių palyginimas.....	68
3.3. Šilumokaičio geometrija.....	71
3.4. Šilumnešio debitas.....	78
3.5. Fazinio virsmo medžiagos tankio pokytis	84
3.6. Šilumos kaupimo įrenginio įkrovimo ir iškrovimo trukmė	90
3.7. Trečiojo skyriaus išvados	103
BENDROSIOS IŠVADOS	105
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	107
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS .	119
SUMMARY IN ENGLISH.....	121

PRIEDAI ¹	137
A priedas. Autoriaus sąžiningumo deklaracija	139
B priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos	140

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Contents

INTRODUCTION	1
Formulation of the problem.....	1
Relevance of the thesis	2
The object of research	3
The aim of the thesis	3
The tasks of the thesis	3
Research methodology	3
Scientific novelty of the thesis	4
Practical value of the research findings	4
Defended statements.....	5
Approval of the research findings	5
The structure of the dissertation	5
1. ANALYSIS OF THE APPLICATION OF PHASE CHANGE MATERIALS FOR THERMAL ENERGY STORAGE	7
1.1. Methods of thermal energy storage	8
1.2. Use of phase change materials for thermal energy storage.....	11
1.3. Selection criteria of phase change materials.....	13
1.4. Theoretical investigation of thermal energy storage units	18
1.4.1. Natural convection.....	23
1.4.2. Density variation	25
1.5. Experimental investigation of thermal energy storage units.....	26
1.6. Prediction of the characteristics of thermal energy storage units	29

1.7. Conclusions of the first chapter and formulation of the thesis tasks	30
2. METHODOLOGY OF RESEARCH OF THE PHASE CHANGE MATERIAL BASED THERMAL ENERGY STORAGE UNIT CHARACTERISTICS.....	33
2.1. Integrated evaluation of thermal energy storage unit characteristics.....	33
2.2. Numerical model of heat transfer	36
2.3. Determination of power and energy of thermal energy storage unit	38
2.4. Determination of heat transfer coefficient.....	39
2.5. Methodology of experimental research of the thermal energy storage unit.....	41
2.5.1. Experimental research setup	42
2.5.2. The object of research.....	45
2.5.3. Investigation of heat transfer coefficient	50
2.5.4. Investigation of heat exchanger geometry	51
2.5.5. Investigation of heat transfer fluid mass flow rate.....	51
2.5.6. Investigation of phase change material density variation	52
2.5.7. Prediction of thermal energy storage unit charging and discharging duration	53
2.5.8. Uncertainty of experimental research	54
2.6. Conclusions of the second chapter	54
3. RESULTS OF RESEARCH OF THE PHASE CHANGE MATERIAL BASED THERMAL ENERGY STORAGE UNIT CHARACTERISTICS.....	57
3.1. Numerical modelling.....	57
3.2. Heat transfer coefficient	64
3.2.1. Experimental determination of heat transfer coefficient.....	65
3.2.2. Comparison between the theoretical results and experimental data	68
3.3. Geometry of the heat exchanger.....	71
3.4. Mass flow rate of the heat transfer fluid.....	78
3.5. Phase change material density variation.....	84
3.6. Thermal energy storage unit charging and discharging duration.....	90
3.7. Conclusions of the third chapter.....	103
GENERAL CONCLUSIONS	105
REFERENCES	107
LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION.....	119
SUMMARY IN ENGLISH.....	121

ANNEXES² 137

Annex A. Author's declaration of academic integrity..... 139

Annex B. Copies of scientific publications by the author on the topic of the
dissertation..... 140

² The annexes are supplied in the enclosed compact disc.

Įvadas

Problemos formulavimas

Nuosekliai didėjanti atsinaujinančių energijos išteklių (AEI) dalis bendrame energijos balanse skatina ieškoti vis efektyvesnių energijos kaupimo būdų, siekiant subalansuoti energijos generavimo ir vartojimo režimus, nes AEI dažniausiai generuoja didžiausią energijos kiekį esant mažiausiam vartojimui. Siekiant tvaraus ir efektyvaus energijos vartojimo pramonės procesuose, taip pat svarbu atgauti į aplinką šalinamą šilumą ir grąžinti atgal į procesą. Šilumos kaupimo įrenginių naudojimas yra vienas iš būdų, užtikrinančių efektyvų ir stabilų atsinaujinančios, perteklinės ar atliekinės energijos vartojimą, kai energijos gamybos ir vartojimo režimai nesutampa.

Didelio energijos tankio šilumos kaupimo problema sprendžiama, kuriant fazinio virsmo medžiagų (FVM) pagrindu veikiančius šilumos kaupimo įrenginius. FVM pasižymi savybe sukaupti didelį energijos kiekį, keičiantis medžiagos agregatinei būsenai. Tinkamai panaudojant šias medžiagas galima žymiai padidinti šilumos kaupimo sistemų ir įrenginių šiluminę talpą, tenkančią tūrio vienetui, t. y. sumažinti jų užimamą tūrį, lyginant su tradicinėmis, nekintančios fazės šilumos kaupimo technologijomis. FVM taip pat pritaikomos procesuose, kuriuose reikalingas pastovios temperatūros palaikymas, nes fazės virsmas vyksta nekintant temperatūrai. Tačiau dėl žemo daugelio FVM šilumos laidumo koefi-

ciento būtina užtikrinti efektyvų šilumos perdavimą. Vienas iš efektyviausių būdų spręsti šilumos perdavimo problemą yra šilumokaičio šilumos mainų paviršiaus ploto didinimas ir / arba papildomų, šilumai laidžių medžiagų integravimas. Siekiant projektuoti efektyvius ir ekonomiškai pagrįstus FVM pagrindu veikiančius šilumos kaupimo įrenginius, svarbu parinkti tinkamas FVM bei nustatyti optimalius šilumos kaupimo įrenginių konstrukcinius sprendinius ir veikimo režimus. Tačiau dėl nuolat kintančių FVM termofizikinių savybių, vykstant fazės virsmui, nekintančios fazės šilumos kaupimo įrenginių skaičiavimo metodikos nėra visiškai pritaikomos FVM įrenginiams projektuoti. Dėl neoptimalių eksploataavimo sąlygų (veikimo režimų) neužtikrinamas FVM medžiagų ilgaamžiškumas ir neefektyviai panaudojama fazinio virsmo šiluma. Todėl svarbu tobulinti skaičiavimų metodiką, įvertinant FVM termofizikines savybes, ir nustatyti empirines priklausomybes, kurios leistų greičiau priimti techninius ar ekonominius sprendimus atskiruose FVM įrenginių vystymo etapuose.

Darbo aktualumas

Europos Sąjungos atsinaujinančių energijos išteklių, šildymo ir vėsinimo, šilumos energijos saugojimo strategijoje ir gairėse numatyta, kad šilumos kaupimo sistemos turi būti aktyviai tobulinamos ir ieškoma naujų efektyvių bei ekonomiškai pagrįstų technologijų, siekiant didinti šilumos kaupimo sistemų energijos tankį, veikimo trukmę, ilgaamžiškumą (EU strategy, 2016). Sistemos, galinčios efektyviai sukaupti didelį energijos kiekį mažame tūryje, suteikia galimybę atlikti energijos tiekimo tinklų apkrovos valdymą ir balansavimą, didinti energijos generavimo ir vartojimo efektyvumą, mažinti aplinkos taršą.

Fazinio virsmo medžiagų panaudojimas šilumai kaupti leidžia pasiekti didesnę energijos tankį, lyginant su tradicinėmis technologijomis, tačiau vystant šias technologijas susiduriama su iššūkiais, kylančiais dėl medžiagos fazės virsmo. Fazinio virsmo medžiagų naudojimas šilumai kaupti šiuo metu plačiausiai paplitęs integruojant FVM į pastatų konstrukcinius elementus (pasyvios technologijos). Tačiau šis FVM panaudojimo būdas neužtikrina aukšto efektyvumo bei lankstumo. Todėl vystomos aktyvios technologijos kuriant šilumos kaupimo įrenginius su FVM, jie gali būti naudojami pastatų inžinerinėse sistemose, pramonės technologiniuose procesuose, transporto sektoriuje.

Analizuojant FVM šilumos kaupimo įrenginius atliktas didelis kiekis mokslinių tyrimų ir eksperimentų. Nagrinėjama įvairių parametų įtaka šilumos kaupimo įrenginių veikimo charakteristikoms, tiriamos įvairios FVM, eksperimentiškai tikrinami skaitinio modeliavimo ir analitinių tyrimų rezultatai. Tačiau trūksta tyrimų, kurie sujungia skirtingus tyrimo metodus ir leidžia kompleksiskai

vertinti FVM įrenginių veikimą bei prognozuoti įkrovimo ir iškrovimo proceso trukmę.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – organinės fazinio virsmo medžiagos pagrindu veikiantis šilumos kaupimo įrenginys.

Darbo tikslas

Šio darbo tikslas – ištirti fazinio virsmo medžiagos termofizikinių savybių, šilumokačio geometrijos ir šilumnešio parametrų įtaką FVM šilumos kaupimo įrenginio veikimo charakteristikoms.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti sprendžiami šie uždaviniai:

1. Atliktos mokslinių tyrimų analizės pagrindu parengti FVM šilumos kaupimo įrenginio tyrimų metodiką.
2. Remiantis projekcinėmis sąlygomis, parinkti FVM šilumos kaupimo įrenginio koncepciją ir atlikti pradinės geometrijos skaitinį modeliavimą. Atsižvelgiant į modeliavimo rezultatus, parengti dvi FVM įrenginio šilumokačio versijas eksperimentiniams tyrimams.
3. Parengti eksperimentinių tyrimų stendą, pagaminti fazinio virsmo medžiagos pagrindu veikiančio šilumos kaupimo įrenginio prototipus ir atlikti eksperimentinius tyrimus.
4. Remiantis eksperimentinių tyrimų rezultatais, sudaryti regresijos modelį, leidžiantį prognozuoti FVM šilumos kaupimo įrenginio įkrovimo ir iškrovimo trukmę.

Tyrimų metodika

Šiame darbe tiriama specialiai suprojektuoti ir pagaminti fazinio virsmo medžiagos pagrindu veikiančio šilumos kaupimo įrenginio prototipai. FVM šilumos kaupimo įrenginyje vykstančių šilumos mainų proceso analizei taikomi analiti-

niai, skaitiniai ir eksperimentiniai tyrimai. Skaitiniam modeliavimui taikomas baigtinių elementų metodas, naudojama „COMSOL Multiphysics“ programinė įranga. Eksperimentiniai tyrimai atlikti Perspektyvinių technologijų taikomųjų tyrimų instituto šilumos kaupimo sistemų tyrimų ir bandymų laboratorijoje. Imituojant skirtingas šilumos kaupimo įrenginio įkrovimo ir iškrovimo sąlygas (veikimo režimus), matuojamas šilumnešio masinis debitas ir temperatūra, FVM temperatūra ir oro slėgis FVM šilumos kaupimo įrenginyje. Taikant analitines išraiškas, apskaičiuojamas šilumos atidavimo koeficientas, FVM įrenginio šilumos srautas (galia), sukauptas energijos kiekis, FVM įkrovimo ir iškrovimo procesų trukmė. Eksperimentinių tyrimų rezultatams apdoroti ir palyginti taikomi statistiniai metodai, koreliacinė ir regresinė analizė. Atliekama analitinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatų lyginamoji analizė.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie mechanikos inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Nustatyta, kad fazės virsmui vykstant uždaramame tūryje, kuriame didėja oro slėgis, sutrumpėja FVM įkrovimo (lydymosi) ir iškrovimo (kietėjimo) procesas.
2. FVM įkrovimo ir iškrovimo lygis gali būti nustatomas pagal vidutinę FVM temperatūrą.
3. Eksperimentinių tyrimų pagrindu sudarytas regresijos modelis, leidžiantis prognozuoti FVM šilumos kaupimo įrenginio įkrovimo ir iškrovimo trukmę priklausomai nuo tiekiamo šilumnešio temperatūros ir masinio debito.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Darbo rezultatų taikymas, projektuojant inovatyvius, FVM pagrindu veikiančius didelio energijos tankio šilumos kaupimo įrenginius, leidžia atlikti supaprastintą panašaus tipo įrenginių galios, šilumos kiekio ir įkrovimo / iškrovimo trukmės nustatymą. Detali FVM temperatūros kitimo analizė naudinga šilumokačio konstrukcinių sprendinių parinkimo etape, siekiant nustatyti optimalius geometrinus parametrus.

Ginamieji teiginiai

1. FVM šilumos kaupimo įrenginio veikimo charakteristikos skiriasi uždaro ir atviro veikimo režimų atvejais. Oro slėgio poveikis, atsirandantis dėl FVM turinio plėtimosi, turi įtakos FVM įkrovimo ir iškrovimo proceso trukmei.
2. FVM vidutinė temperatūra yra tinkamas kriterijus FVM sukauptam ir atiduotam šilumos kiekiui apskaičiuoti, pagal jį nustatomas įkrovimo ir iškrovimo lygis.
3. Regresinės analizės taikymas priklausomiesiems kintamiesiems (atsakai) prognozuoti leidžia įvertinti FVM įkrovimo ir iškrovimo trukmę, atsižvelgiant į tiekiamo šilumnešio temperatūrą ir masinį debitą.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema paskelbti 6 straipsniai: du – „Clarivate Analytics Web of Science“ duomenų bazės leidiniuose, turinčiuose citavimo rodiklį (Pakalka et al. 2021, Pakalka et al. 2020); vienas – „Clarivate Analytics Web of Science“ duomenų bazės leidiniuose, neturinčiuose citavimo rodiklio (Pakalka et al. 2021); vienas – „Clarivate Analytics Web of Science“ duomenų bazės „Conference Proceedings“ leidiniuose (Pakalka et al. 2020); du – kitų tarptautinių duomenų bazių leidiniuose (Pakalka et al. 2019, Pakalka et al. 2018).

Disertacijos tema atliktų tyrimų rezultatai pristatyti dvejose tarptautinėse konferencijose Ispanijoje ir Latvijoje:

- Tarptautinėje konferencijoje „Innovation for an energy efficient industry (EU Sustainable Energy Week)“ 2018 m. Durange (Ispanija).
- Tarptautinėje konferencijoje „The Conference of Environmental and Climate Technologies (CONNECT)“ 2021 m. Rygoje.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai ir bendrosios išvados. Taip pat yra du priedai.

Darbo apimtis yra 136 puslapiai, neskaitant priedų, tekste panaudotos 36 numeruotos formulės, 62 paveikslai ir 7 lentelės. Rašant disertaciją buvo panaudota 118 literatūros šaltinių.

Fazinio virsmo medžiagų naudojimo šilumai kaupti tyrimų analizė

Šiame skyriuje apžvelgiamas šilumos kaupimo metodų ir medžiagų klasifikavimas, atliekamas jų palyginimas. Analizuojamos fazinio virsmo medžiagų (FVM) naudojimo šilumai kaupti galimybės. Nagrinėjami fazinio virsmo medžiagų tipai ir savybės, jų veikimo principai ir medžiagų parinkimo kriterijai, analizuojami FVM šilumos kaupimo įrenginių ir sistemų vystymo etapai, šilumos mainų proceso gerinimo principai ir techniniai sprendiniai. Pateikiama FVM šilumos kaupimo įrenginių teorinių ir eksperimentinių tyrimų analizė atkreipiant dėmesį į šilumokaičio tipo šilumos kaupimo įrenginius, organines FVM, mažą FVM šilumos laidumo koeficientą, natūralios konvekcijos įtaką fazės virsmo procesui, FVM tankio kitimą, įrenginio veikimo charakteristikų prognozavimą taikant regresinę analizę. Remiantis atlikta tyrimų analize, aprašoma nagrinėjamos temos problema ir formuluojami disertacijos uždaviniai.

Skyriaus tematika paskelbtos keturios publikacijos (Pakalka et al., 2021; Pakalka et al., 2021; Pakalka et al., 2020; Pakalka et al., 2018).

1.1. Šilumos kaupimo metodai

Pagrindinis šilumos kaupimo tikslas yra užtikrinti patikimą ir efektyvų šilumos energijos tiekimą, ypač tuomet, kai energijos generavimo ir vartojimo režimai nesutampa. Šilumos kaupimo įrenginių naudojimas yra vienas iš būdų, užtikrinančių efektyvų ir stabilų atsinaujinančios, perteklinės ar atliekinės energijos panaudojimą. Šilumos kaupimo ciklas susideda iš šių etapų: įkrovimo, saugojimo ir iškrovimo (1.1 pav.).

1.1 pav. Šilumos kaupimo ciklas

Fig. 1.1. Complete storage cycle

Atsižvelgiant į šilumai kaupiti naudojamas medžiagas ir vykstantį procesą, šilumos kaupimo technologijos skirstomos į tris grupes: nekintančios fazės, kintančios fazės ir cheminių reakcijų (Nazir et al., 2019; Mehling & Cabeza, 2008). Šilumos kaupimo metodų klasifikavimas pateiktas 1.2 paveiksle.

1.2 pav. Šilumos kaupimo metodų klasifikavimas

Fig. 1.2. Classification of thermal energy storage methods

Nekintančios fazės šilumos kaupimo sistemose šilumai akumuliuoti panaudojama medžiagos savitoji šiluma. Tokiu atveju sukauptos šilumos kiekis prik-

lauso nuo medžiagos savitosios šilumos, medžiagos kiekio ir temperatūros pokyčio:

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} mc_p dT, \quad (1.1)$$

čia m – šilumą kaupiančios medžiagos masė, kg; c_p – medžiagos savitoji šiluma esant pastoviam slėgiui, J/kgK; dT – temperatūrų skirtumas, °C; T_i – temperatūra proceso pradžioje, °C; T_f – temperatūra proceso pabaigoje, °C.

Kintančios fazės šilumos kaupimo sistemos veikimas pagrįstas šilumos absorbavimu arba atidavimu, kai įvyksta šilumą kaupiančios medžiagos fazės pokytis iš kietosios į kietąją, iš kietosios į skystąją, iš kietosios į dujinę ir iš skystosios į dujinę, ir atvirkščiai (Mehling & Cabeza, 2008). Atkreiptinas dėmesys, kad fazės virsmas iš skystosios į dujinę pasižymi dideliu tūrio pokyčiu, todėl taikyti šį procesą yra nepraktiška, nes reikalingos didelio tūrio talpos dujų fazei saugoti (Himran et al., 1994; Sharma et al., 2009). Tokie terminai kaip *fazinio virsmo šiluma* ir *fazinio virsmo medžiagos* dažniausiai vartojami kalbant apie medžiagos fazės virsmą iš kietosios į skystąją, ir atvirkščiai. Fazinio virsmo šiluma apibūdina energijos kiekį, reikalingą medžiagos agregatinei būsenai pakeisti. Vykstant fazės virsmui iš kietosios į skystąją, t. y. medžiagos lydymosi (įkrovimo) procesui, šilumą kaupianti medžiaga absorbuoja šilumą. Atitinkamai, vykstant medžiagos kietėjimo (iškrovimo) procesui, medžiaga atiduoda sukauptą šilumos kiekį.

Bendruoju atveju FVM šilumos kaupimo įrenginio šilumos kiekis Q skaičiuojamas pagal (1.2) formulę (Sharma et al., 2009):

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} mc_p dT + ma_m \Delta h_m + \int_{T_m}^{T_f} mc_p dT, \quad (1.2)$$

čia a_m – išsilydžiusios (skystosios) FVM tūrio dalis (angl. *PCM fraction melted*), Δh_m – FVM entalpijos pokytis, J/kg; T_m – FVM lydymosi temperatūra, °C.

Vykstant termocheminėms reakcijoms energija sukaupiama arba atiduodama nutrūkstant ir atsikuriant tarpmolekuliniams ryšiams esant grįžtamajai cheminei reakcijai. Vykstant endoterminei reakcijai šiluma yra sugerama, vykstant egzoterminei reakcijai – išskiriama. Taigi, daugelis cheminių reakcijų, pasižyminčių dideliu reakcijos šilumos kiekiu, gali būti naudojamos šilumai kaupti, jeigu reakcijos produktas gali būti pasaugomas, o sukaupta šiluma išskiriama vykstant atvirkštinei reakcijai. Šiuo atveju sukauptos energijos kiekis priklauso nuo medžiagos kiekio, endoterminės reakcijos šilumos ir konversijos laipsnio (Sharma et al., 2009):

$$Q = a_r m \Delta h_r, \quad (1.3)$$

čia a_r – sureagavusios medžiagos dalis; m – šilumą kaupiančios medžiagos masė, kg; Δh_r – entalpijos pokytis, J/kg.

Lyginant nekintančios fazės šilumos kaupimo technologiją su kintančios fazės, pastaroji pasižymi didesniu sukaupiamos energijos tankiu (J/kg, Wh/kg, Wh/m³), o tai leidžia sumažinti šilumos kaupimo sistemos (įrenginio) tūrį. Be to, kintančios fazės šilumos kaupimo sistemos pasižymi beveik nekintančia įkrovimo ir iškrovimo temperatūra, todėl šios sistemos gali būti labiau orientuotos į konkrečius procesus. Didžiausią energijos tankį įgalina pasiekti termocheminių reakcijų šilumos kaupimo technologijos, tačiau šių sistemų technologinės parangties lygis yra žemiausias. Atkreiptinas dėmesys, kad šilumos kaupimo sistemų energijos tankis, efektyvumas, eksploatavimo trukmė ir kaina priklauso nuo sistemų pritaikymo srities (energijos gamyba, pramonė, pastatai), veikimo temperatūros ir naudojamų medžiagų. Šilumos kaupimo metodų fizikinių ir technologinių savybių palyginimas pateiktas 1.1 lentelėje (IEA-ETSAP & IRENA, 2013; IRENA, 2020).

1.1 lentelė. Šilumos kaupimo sistemų savybės

Table 1.1. Parameters of thermal energy storage systems

Šilumos kaupimo technologija	Energijos tankis, kWh/m ³	Efektyvumas, %	Sistemos galia, MW	Eksploataavimo trukmė, metai	Kaina, Eur/kWh
Nekintanti fazė (karštas vanduo)	15–80	55–90	0,001–10	10–30	0,1–35
Kintanti fazė (FVM iki 120 °C)	30–135	75–90	0,001–0,01	10–20	10–90
Termocheminė reakcija	120–250	75–100	0,01–1	15–20	15–150

FVM pagrindu veikiančios kintančios fazės šilumos kaupimo sistemos apibūdinamos kaip efektyvus šilumos akumuliacijos būdas. FVM gali būti naudojamos tiek trumpalaikiam (kelios valandos), tiek ilgalaikiam šilumos akumuliacijai (kelios dienos). Lyginant nekintančios ir kintančios fazės šilumos kaupimo sistemas konstrukciniu požiūriu, sistemos su FVM pasižymi labai didele konstrukcinių sprendinių įvairove bei plačiomis medžiagų pasirinkimo galimybėmis. Tačiau pažymėtina, kad šilumos perdavimo procesas ir tinkamos FVM parinkimas yra sudėtingesnis (Gil et al., 2010). Šilumos kaupimo sistemų, naudojančių FVM, tyrimų kiekis (patentai ir publikacijos) pastaruoju metu auga eksponentiškai (Calderón et al., 2020; Nazir et al., 2019).

1.2. Fazinio virsmo medžiagų naudojimas šilumai kaupti

Fazinio virsmo medžiagų naudojimas šilumai kaupti leidžia iki kelių kartų sumažinti įrenginių (sistemų) tūrį, lyginant su tradicinėmis (nekintančios fazės) technologijomis. Tačiau didesnis energijos tankis priklauso ne tik nuo FVM savybių, bet ir nuo šilumos kaupimo įrenginių projektinių sprendinių. Tai reiškia, kad, siekiant maksimaliai išnaudoti fazinio virsmo šilumą ir užtikrinti FVM įrenginio charakteristikoms keliamus reikalavimus (pvz., susijusius su galia, šilumos kiekiu), reikia aiškiai suprasti vykstančius šilumos mainų procesus ir kritinius parametrus.

FVM naudojamos daugelyje sričių, tokiose kaip šilumos ir vėsos kaupimas pastatų konstrukcijose (Ali & Deshmukh, 2020), buitinio karšto vandens sistemose (Amagour et al., 2018; Singh et al., 2018; Tay et al., 2012), šildymo, vėdinimo ir oro kondicionavimo sistemose (Khan & Khan, 2017), šilumos kaupimo sistemose su šilumos siurbliais (Wu et al., 2018; Lin et al., 2018), perteklinės ir atliekinės energijos kaupimas pramonės procesuose (Kunkel et al., 2018; Zhang & Akiyama, 2009), transporto sektoriuje (Shon et al., 2014), elektronikos gaminiuose, džiovinimo įrenginiuose. Įvairios FVM ir jų taikymo sritys išsamiai apžvelgtos šaltiniuose (Ali & Deshmukh, 2020; Guelpa & Verda, 2019; Pereira da Cunha & Eames, 2016).

Rinkoje yra platus skirtingo tipo FVM, galinčių veikti esant įvairioms temperatūroms, pasirinkimas. FVM skirstomos į šias kategorijas: organinės, neorganinės, eutektinės (žr. 1.3 pav.).

1.3 pav. FVM klasifikacija (Sharma et al., 2009; Zhang et al., 2016)

Fig. 1.3. Classification of PCMs (Sharma et al., 2009; Zhang et al., 2016)

Prie organinių FVM priskiriami parafinai, riebalų rūgštys, cukraus alkoholiai. Organinės FVM apima temperatūrų intervalą nuo 0 °C iki 200 °C, tačiau dauguma iš šių medžiagų nėra stabilios aukštoje temperatūroje. Iš organinių FVM viena iš dažniausiai naudojamų – parafinas. Parafinas yra kietųjų naftos alkanų mišinys. Alkanai yra alifatiniai sotieji angliavandeniliai; anglies ir vandenilio junginiai. Bendroji alkanų cheminė formulė yra C_nH_{2n+2} . Parafino lydymosi temperatūra priklauso nuo anglies atomų skaičiaus, t. y. didesnis anglies atomų skaičius reiškia aukštesnę lydymosi temperatūrą. Parafinas pasižymi ne tik dideliu energijos tankiu, bet ir terminiu stabilumu bei suderinamumu su daugeliu kitų medžiagų (Gasia et al., 2017; Khan & Khan, 2017). Tačiau parafinui yra būdingas mažas šilumos laidumo koeficientas (Yousef & Hassan, 2019).

Neorganinės FVM apima platų temperatūrų intervalą ir, lyginant su organinėmis FVM, pasižymi didesniu medžiagos tankiu. Dėl šios priežasties neorganinės FVM pasižymi didesniu energijos kiekiu, tenkančiu tūrio vienetui, nors organinių ir neorganinių FVM fazinio virsmo šilumos kiekis, tenkantis masės vienetui, yra panašus.

Eutektinės FVM sudarytos iš dviejų ar daugiau kietųjų fazių kristalitų. Eutektinių vandens ir druskos mišinių lydymosi temperatūra dažniausiai yra žemiau 0 °C. Šie mišiniai pasižymi dideliu energijos tankiu, tenkančiu masės vienetui, o šilumos laidumo koeficientas yra artimas vandens šilumos laidumo koeficientui (Mehling & Cabeza, 2008; Nazir et al., 2019).

Teorinės FVM lydymosi (įkrovimo) ir kietėjimo (iškrovimo) kreivės pateiktos 1.4 paveiksle.

1.4 pav. Temperatūros kitimas vykstant FVM įkrovimo ir iškrovimo procesams

Fig. 1.4. Evolution of temperature during the charging and discharging process

Iš 1.4 pav. matyti, kad FVM įkrovimo ir iškrovimo procesą sudaro trys pagrindiniai etapai. FVM įkrovimo proceso pradžioje vyksta FVM temperatūros kilimas iki FVM lydymosi temperatūros (atkarpa 1–2), FVM temperatūrai pasiekus lydymosi temperatūrą ji išlieka pastovi tol, kol vyksta medžiagos fazės

virsmas (atkarpa 2–3), įvykus fazės virsmui temperatūra kyla iki nustatytos ribos (atkarpa 3–4). FVM iškrovimo metu skystosios medžiagos temperatūra mažėja iki kietėjimo temperatūros (atkarpa 4–3′) ir pasiekus šią ribą prasideda FVM fazės virsmas iš skystosios į kietąją, jo metu temperatūra išlieka pastovi (atkarpa 3′–2′). Įvykus fazės virsmui, kietosios medžiagos temperatūra pradeda mažėti iki nustatytos ribos (atkarpa 2′–1′). FVM įkrovimo ir iškrovimo proceso etapuose, kuriuose kinta temperatūra, sukauptos šilumos kiekis priklauso nuo medžiagos kiekio, jos savitosios šilumos ir temperatūrų skirtumo. Fazės virsmo metu sukauptos arba atiduotos šilumos kiekis priklauso nuo medžiagos masės ir jos fazinio virsmo šilumos, kuri išreiškiama entalpijų skirtumu tarp kietosios ir skystosios fazės.

Vykstant šilumos perdavimui fazės virsmo metu, medžiagos temperatūra išlieka artima jos lydymosi temperatūrai ir priklausomai nuo FVM tipo svyruoja tik siaurame temperatūros intervale (Doerte et al., 2012), todėl FVM gali būti naudojamos temperatūrai stabilizuoti atitinkamuose įrenginiuose ar procesuose (pvz., elektronikos komponentams aušinti).

1.3. Fazinio virsmo medžiagų parinkimo kriterijai

Du pagrindiniai parametrai, pagal kuriuos atliekamas pradinis FVM tinkamumo vertinimas, yra fazinio virsmo temperatūra ir fazinio virsmo šilumos kiekis. Tačiau siekiant FVM efektyviai panaudoti šilumai kaupti, medžiagos turi atitikti termofizikinėms, kinetinėms ir cheminėms savybėms keliamus reikalavimus. Taip pat turi būti atsižvelgiama į ekonominį naudingumą, medžiagų prieinamumą ir ekologiją (Mehling & Cabeza, 2008; Wu et al., 2020). Pagrindiniai FVM parinkimo kriterijai, atsižvelgiant į FVM savybes, pateikti 1.5 paveiksle.

1.5 pav. FVM parinkimo kriterijai (Ali & Deshmukh, 2020; Elarem et al., 2020)

Fig. 1.5. Selection criteria of PCM (Ali & Deshmukh, 2020; Elarem et al., 2020)

Vienas iš kritinių parametų, projektuojant ir eksploatuojant FVM šilumos kaupimo sistemas, yra mažas daugelio medžiagų šilumos laidumo koeficientas (Gil et al., 2010; Hofmann et al., 2019; Khan, Khan & Ghafoor, 2016; A. K. Raul et al., 2018). Pavyzdžiui, daugumos organinių FVM šilumos laidumo koeficientas yra apie 0,2 W/mK. Kitos neigiamos daugelio FVM savybės yra: nepakankamas terminis stabilumas, peršaldymas, tūrio kitimas vykstant fazės virsmui, nesuderinamumas su konstrukcinėmis medžiagomis, degumas (Nazir et al., 2019).

Atsižvelgiant į mažą FVM šilumos laidumo koeficientą, taikomos įvairios priemonės, kurios leidžia intensyvuoti šilumos perdavimo procesą. Vystomi inovatyvūs konstrukciniai sprendiniai bei šilumos laidumą gerinančios technikos, pvz., nanodalelių integravimas į FVM (Singh et al., 2019), porėtų struktūrų naudojimas (pvz., aliuminio, vario, grafito) (Li et al., 2017; Liu et al., 2016; Merlin et al., 2016; Righetti et al., 2019), FVM įkapsuliavimas (A. Raul et al., 2018; Zayed et al., 2020), šilumai laidžių paviršių didinimas (Besagni & Croci, 2019; Kabbara et al., 2016). Taip pat galimi kombinuoti techniniai sprendiniai, sujungiantys skirtingas technikas, pvz., šilumos mainų paviršiaus didinimas ir FVM laidumo gerinimas integruojant papildomas, šilumai laidžias, medžiagas (Elarem et al., 2020). Detalus šilumos mainų gerinimo principų grupavimas ir galimų techninių sprendimų pavyzdžiai pateikti 1.6 paveiksle.

Kitas svarbus parametras – terminis stabilumas. Nepakankamas terminis stabilumas (fazių atsiskyrimas) būdingas iš dviejų ar daugiau komponentų sudarytoms FVM (pvz., vandens ir druskos mišinys). Tokiu atveju, kartojantis kietėjimo / lydymosi ciklams, gali susiformuoti skirtingos sudėties fazės. Šio efekto metu skirtingos sudėties fazės atsiskiria viena nuo kitos makroskopiškai, o tai lemia žymiai mažesnę FVM šiluminę talpą lyginant su pradine sudėtimi. Pagrindiniai šio efekto pašalinimo būdai yra dirbtinis (mechaninis) maišymas, skirtingų medžiagų koncentracijos keitimas, gelių įterpimas į medžiagą (suformuojamas 3D tinklas, išlaikantis skirtingas FVM fazes mikroskopiniu lygmeniu), medžiagos klappos didinimas. Terminis nestabilumas yra nebūdingas organinėms FVM.

Daugeliui neorganinių ir eutektinių FVM būdingas peršaldymo efektas (angl. *subcooling* arba *supercooling*). Peršaldymas – medžiagos atšaldymas iki temperatūros, žemesnės už pusiausviros fazinio virsmo temperatūrą, nesukeliant fazinio virsmo. Peršaldyta FVM gali būti žemesnės temperatūros negu jos kristalizacijos temperatūra. Jei kristalizacija neįvyksta, sukaupta fazinio virsmo šiluma neišskiriama. Viena iš pagrindinių priemonių, taikomų siekiant išvengti peršaldymo – specialių priedų, sudarančių kristalizacijos centrus, naudojimas. Tokiu atveju į FVM įterpiami kristalai, leidžiantys FVM kietėjai fazei formuotis ant jų paviršiaus.

1.6 pav. FVM pagrindu veikiančių šilumos kaupimo įrenginių šilumos mainų gerinimo technikos (Mazhar et al., 2020)

Fig. 1.6. Heat transfer enhancement techniques of PCM based thermal energy storage units (Mazhar et al., 2020)

FVM tūrio kitimas, vykstant fazės virsmui, turi neigiamos įtakos tiek šilumos mainų procesui (netolygiai pasiskirsto FVM, formuojasi tuštumos, blogėja šilumos perdavimas), tiek šilumos kaupimo įrenginio komponentams, nes dėl medžiagos tūrinio plėtimosi atsiranda talpos ir šilumokaičio deformacijų. Siekiant užtikrinti mechaninį stabilumą formuojamos struktūros iš FVM ir kitų medžiagų. Pavyzdžiui, integruojant FVM į laikančiąsias konstrukcijas mikroskopiniu lygmeniu arba formuojant mechanškai stabilias struktūras, impregnuojant mechanškai stabilias porėtas medžiagas (Righetti et al., 2019; Wu et al., 2016).

Siekiant pagerinti šilumos mainus ir efektyviai panaudoti fazinio virsmo šilumą, reikia atsižvelgti į daugelį kriterijų. Todėl dažniausiai FVM ir jų panaudojimo šilumai kaupiti tyrimai susideda iš kelių etapų bei tenka priimti tam tikras prielaidas ir aiškiai suformuoti kraštines sąlygas, kurios gali supaprastinti kompleksinio tyrimo eigą. Tačiau prielaidų arba kraštinių sąlygų pasirinkimas turi užtikrinti rezultatų tikslumui ir patikimumui keliamus reikalavimus.

Atliekant kompleksinius tyrimus, pirmiausia nagrinėjamos skirtingos FVM ir analizuojamos jų savybės (Kunkel et al., 2018; Wu et al., 2018; Zondag et al., 2018), prisidedant tiek prie gilesnio šilumos mainų proceso supratimo FVM šilumos kaupimo įrenginiuose, tiek prie šilumos kaupimo įrenginių dydžio (tūrio) nustatymo (Kunkel et al., 2018) bei praktiniam taikymui tinkamų pigesnių medžiagų paieškos (Agarwal & Sarviya, 2017). Kitaip tariant, atliekamas FVM charakterizavimas, o gauti rezultatai naudojami tolesniuose medžiagų parinkimo, analitinio šilumos mainų skaičiavimo ir skaitinio modeliavimo etapuose.

FVM tyrimui gali būti taikomi tokie terminės analizės metodai kaip įprastoji kalorimetrija, diferencinė terminė analizė (DTA) (angl. *differential thermal analysis* (DTA)) ir diferencinė skenuojamoji kalorimetrija (DSK) (angl. *differential scanning calorimetry* (DSC)). DSK yra labiausiai paplitęs metodas FVM tyrimams, o DTA analizė yra labiau tinkama kokybinei FVM analizei. DSK tyrimo metu vyksta energijos, reikalingos tiriamojo ir etaloninio bandinio temperatūroms suvienodinti, matavimas, esant tam tikram temperatūriniam režimui specifinėje dujų aplinkoje. Šiuo metodu galima nustatyti: savitąją šilumą, lydymosi temperatūrą, entalpijos pokytį, fazių perėjimo diagramas, kristalizacijos temperatūrą, skilimo efektus, medžiagos grynumą (Rathod & Banerjee, 2013; Solé et al., 2013; Zalba et al., 2003). Kita didelė dalis tyrimų orientuota į konkrečių techninių sprendinių taikymo analizę, pvz.: šilumokaičio tipo parinkimas (Medrano et al., 2009; Eslamnezhad & Rahimi, 2017; Saeed et al., 2019) ir jo konfigūracijos (optimalaus šilumai laidžių plokštelių skaičiaus nustatymas) (Amagour et al., 2018; Kamkari & Groulx, 2018; Kamkari & Shokouhmand, 2014), šilumokaičio plokštelių forma (Eslamnezhad & Rahimi, 2017; Abdulateef et al., 2018) ir jų medžiaga (Singh et al., 2018).

FVM įrenginių tyrimų etapų principinė schema pavaizduota 1.7 paveiksle.

1.7 pav. FVM šilumos kaupimo įrenginių vystymo etapai (Sharma et al., 2009)

Fig. 1.7. Development stages of a PCM based thermal energy storage units (Sharma et al., 2009)

Šiuo atveju schemoje (žr. 1.7 pav.) pavaizduotas technologijos vystymo ciklas, apimantis medžiagų tyrimus, konstrukcinių sprendinių parinkimą, prototipų testavimą, ekonominę analizę ir FVM įrenginių gamybą.

Kaip vieną iš pagrindinių šilumos perdavimo gerinimo technikų galima išskirti šilumos mainų paviršiaus ploto didinimą (Ibrahim et al., 2017; Lacroix & Benmadda, 1997; Sciacovelli et al., 2015; Zayed et al., 2020; Zhang et al., 2020), o šiam tikslui plačiausiai naudojami šilumokaičių tipai yra vamzdis vamzdyje (VV), vamzdžių pluoštas vamzdyje (VPV) ir vamzdinis plokštelinis šilumokaitis (VP) (Han et al., 2017; Kalapala & Devanuri, 2018; Zayed et al., 2020). Tokio tipo šilumokaičių naudojimas kartu su FVM leidžia pasiekti didesnę nei 70 % energinį efektyvumą (Zayed et al., 2020). Šilumai laidžių metalinių plokštelių pridėjimas gali pagreitinoti lydymosi procesą beveik 50 % (M. S. Mahdi et al., 2019), o tai žymiai pagreitina FVM įkrovimo laiką. Tačiau svarbus faktorius yra šilumos kaupiklio geometrijos parinkimas užtikrinant optimalų FVM ir konstrukcinių medžiagų santykį (Agyenim et al., 2010). Kalapala ir Devanuri (Kalapala & Devanuri, 2018) savo apžvalgoje išskyrė nemažai parametų, į kuriuos reikia atsižvelgti projektavimo metu, pvz., šilumokaičio padėtis, plokštelių skaičius, plotis ir ilgis. Buvo nustatyta, kad vienas iš didžiausių įtaką turinčių geometrinių parametų yra šilumokaičio korpuso ir vamzdelių skersmens santykis. Liang et al. (Liang et al., 2020) pažymėjo, kad nuodugni geometrijos įtakos FVM šilumos kaupimo įrenginio veikimo charakteristikoms analizė yra labai svarbus etapas, ypač kai sistema veikia kintančiomis sąlygomis (pvz., kinta šilumnešio debitas).

1.4. Šilumos kaupimo įrenginių teoriniai tyrimai

Analizuojant FVM pagrindu veikiančius šilumos kaupimo įrenginius, svarbu tinkamai aprašyti šilumos perdavimo procesą. Atkreiptinas dėmesys, kad tam tikrais atvejais šilumos mainams skaičiuoti galima iš dalies pritaikyti šilumokaičių skaičiavimo principus. Šilumokaičiuose vyksta konveciniai šilumos mainai tarp šilumnešių, o per sienelę, skiriančią šilumnešius, šiluma sklinda laidumu (1.8 pav., a). Skaičiuojant šilumokaičius, naudojamas bendras šilumos perdavimo koeficientas U (angl. *overall heat transfer coefficient*), kurį pasitelkus įvertinami kiekvieno šilumnešio konveciniai šilumos mainai ir laidumas per šilumnešius skiriančią sienelę. Šilumos srautas tarp dviejų šilumnešių priklauso nuo temperatūrų skirtumo ir kinta pagal šilumokaičio ilgį (Cengel & Ghajar, 2015). Jeigu vienas iš šilumnešių pakeičiamas FVM, kaip pavaizduota 1.8 pav., b), šilumokaitis tampa šilumokaičio tipo šilumos kaupimo įrenginiu. Atliekant tolesnius skaičiavimus, rekomenduojama laikyti, kad FVM temperatūra yra pastovi ir nekinta per visą šilumokaičio ilgį (Mehling & Cabeza, 2008).

1.8 pav. Šilumokaičio principinė schema: a) pasrovinio šilumokaičio tekėjimo schema, b) šilumokaičio tipo šilumos kaupimo įrenginio koncepcija – FVM įkrovimas, c) šilumokaičio tipo šilumos kaupimo įrenginio koncepcija – FVM iškrovimas

Fig. 1.8. Principle scheme of the heat exchanger: a) parallel-flow heat exchanger, b) heat exchanger type heat storage unit – PCM charging, c) heat exchanger type heat storage unit – PCM discharging

Pasrovinio šilumokaičio atveju šilumos srautas tarp pirmojo ir antrojo šilumnešių (1.8 pav., a) apskaičiuojamas taikant vidutinį logaritminį šilumnešių temperatūros skirtumą (angl. *logarithmic mean temperature difference* (LMTD)).

$$\dot{Q} = A \cdot U \cdot \Delta T_{lm}, \quad (1.4)$$

čia A – šilumos mainų paviršiaus plotas, m^2 ; U – šilumos perdavimo koeficientas, W/m^2K ; ΔT_{lm} – vidutinis logaritminis šilumnešių temperatūros skirtumas, kuris apskaičiuojamas pagal 1.5 lygtį.

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_T - \Delta T_G}{\ln \frac{\Delta T_T}{\Delta T_G}} = \frac{(T_{KV,T} - T_{ŠV,T}) - (T_{KV,G} - T_{ŠV,G})}{\ln \frac{(T_{KV,T} - T_{ŠV,T})}{(T_{KV,G} - T_{ŠV,G})}}, \quad (1.5)$$

čia ΔT_T – temperatūrų skirtumas tarp tiekiamo karšto ir šalto šilumnešių, $^{\circ}C$; ΔT_G – temperatūrų skirtumas tarp grįžtamo karšto ir šalto šilumnešių, $^{\circ}C$; $T_{KV,T}$ – tiekiamo karšto šilumnešio temperatūra, $^{\circ}C$; $T_{ŠV,T}$ – tiekiamo šalto šilumnešio temperatūra, $^{\circ}C$; $T_{KV,G}$ – grįžtamo karšto šilumnešio temperatūra, $^{\circ}C$; $T_{ŠV,G}$ – grįžtamo šalto šilumnešio temperatūra, $^{\circ}C$.

Vieną iš šilumnešių pakeitus fazinio virsmo medžiaga (1.8 pav., b ir c) ir laikant, kad FVM temperatūra yra pastovi ir vienoda per visą šilumokaičio ilgį, gaunama energijos balanso lygties išraiška (Mehling & Cabeza, 2008):

$$c_p \cdot \frac{dV}{dt} \cdot (T_G - T_T) = A \cdot U \cdot \frac{(T_{FVM} - T_T) - (T_{FVM} - T_G)}{\ln \frac{T_{FVM} - T_T}{T_{FVM} - T_G}}, \quad (1.6)$$

čia c_p – šilumnešio savitoji šiluma, J/kgK; dV/dt – šilumnešio tūrinis debitas, m³/h; T_{FVM} – fazinio virsmo medžiagos temperatūra, °C.

Žinant tiekiamo šilumnešio temperatūrą, šilumokaicio šilumos mainų paviršiaus plotą, šilumos perdavimo koeficientą ir FVM temperatūrą bei taikant 1.6 išraišką, galima apskaičiuoti grįžtamo šilumnešio temperatūrą T_G :

$$T_G - T_T = (T_{FVM} - T_T) \cdot \left[1 - \exp \left(- \frac{A \cdot U}{c_p \cdot \frac{dV}{dt}} \right) \right]. \quad (1.7)$$

Pažymėtina, kad esant dideliame šilumos mainų paviršiaus plotui ir šilumos perdavimo koeficientui bei mažai šilumnešio savitajai šilumai ir mažam tūriniam debitui, eksponentinės funkcijos reikšmė tampa lygi nuliui, todėl grįžtamo šilumnešio temperatūra artėja prie FVM temperatūros. Priešingu atveju eksponentinės funkcijos reikšmė tampa lygi vienetui, todėl grįžtamo šilumnešio temperatūra lieka artima tiekiamo šilumnešio temperatūrai.

Remiantis 1.8 formule, nustatoma FVM šilumos kaupimo įrenginio galia:

$$\dot{Q} = c_p \cdot \frac{dV}{dt} \cdot (T_G - T_T) = c_p \cdot \frac{dV}{dt} \cdot (T_{FVM} - T_T) \cdot \left[1 - \exp \left(- \frac{A \cdot U}{c_p \cdot \frac{dV}{dt}} \right) \right]. \quad (1.8)$$

Tačiau grįžtamo šilumnešio temperatūros ir galios nustatymo formulės galioja tik tam tikromis sąlygomis. Pagrindinė sąlyga gaunant šias išraiškas yra ta, kad FVM temperatūra yra pastovi ir lygi fazinio virsmo temperatūrai. Šiuo atveju rezultato tikslumas priklauso nuo besiformuojančio FVM kieto sluoksnio, kuris suformuoja papildomą šiluminę varžą tarp šilumokaicio ir FVM. Taigi, turi būti pasirenkamas kriterijus, kuriuo remiantis laikoma, kad supaprastinto skaičiavimo rezultatai yra pakankamai tikslūs ir gali būti naudojami tolesniuose skaičiavimuose. Vienas iš kriterijų yra šiluminės varžos santykis, kuris turi būti mažesnis už 10 %, siekiant gauti pakankamai tikslus rezultatus (Mehling & Cabeza, 2008):

$$\frac{\frac{s}{\lambda}}{\frac{1}{\alpha} + \frac{s}{\lambda}} < 10\%, \quad (1.9)$$

čia s – FVM kieto sluoksnio storis, arba kitaip – FVM skirtingų fazių sandūros sluoksnio atstumas iki šilumokaicio paviršiaus, mm; λ – FVM šilumos laidumo koeficientas, W/mK; α – šilumos atidavimo koeficientas, W/m²K.

Iš (1.9) išraiškos matyti, kad, norint atlikti skaičiavimus, svarbu žinoti sluoksnio storį ir šilumnešio šilumos atidavimo koeficientą. Esant sudėtingai šilumokaičio geometrijai, šio sluoksnio storio nustatymas (sekimas) ir šilumos atidavimo koeficiento apskaičiavimas, vykstant nestacionariems šilumos mainams, tampa sunkiai įgyvendinami. Taip pat atkreiptinas dėmesys, kad ši išraiška gali būti taikoma tuomet, kai šilumos mainai FVM vyksta laidumu. Tokia prielaida yra teisinga FVM iškrovimo (kietėjimo) atveju, tačiau FVM įkrovimo (lydymosi) atveju didelę įtaką šilumos mainams turi natūrali konvekcija. Dėl šios priežasties reikia įvertinti ne tik šilumnešio, bet ir FVM šilumos atidavimo koeficientą. Todėl šios metodikos taikymas turi daug apribojimų ir reikalauja didelių laiko sąnaudų tam tikriems pradiniais eksperimentams atlikti, siekiant nustatyti empirinius koeficientus. Be to, skaičiavimo rezultatų tikslumui didelę įtaką turi pasirinktos termodinaminio proceso kraštinės sąlygos ir šilumokaičio tipas bei šilumokaičio konstrukcijos geometriniai parametrai ir FVM savybės.

Siekdami optimizuoti FVM šilumos kaupimo įrenginių projektavimą ir gauti pakankamai tikslų skaičiavimo metodiką, tyrėjai vysto analitinius ar pusiau analitinius modelius (Mostafavi et al., 2020). Supaprastinant nagrinėjamą problematiką, dažnai FVM termofizikinės savybės laikomos pastoviomis (Mosaffa et al., 2012), pati medžiaga virsmo metu išlieka homogeniška ir izotropinė (Han et al., 2017), FVM lydymosi režimas laikomas laminariu (Seddegh et al., 2016). Lamberg (Lamberg, 2004) pateikė supaprastintą analitinį modelį, kuris leido apytiksliai nustatyti kietosios ir skystosios fazių sandūros sluoksnio padėtį bei nagrinėti plokštelės temperatūros pasiskirstymą. Tačiau pateikto modelio tikslumas buvo stipriai veikiamas talpos geometrijos. Mosaffa et al. (Mosaffa et al., 2012) pristatė FVM kietėjimo proceso VPV šilumokaityje su papildomomis šilumos mainų paviršiaus plotą didinančiomis plokštelėmis apytikslų analitinį sprendinį. Bechiri ir Mansouri (Bechiri & Mansouri, 2015), taikydami kintamųjų atskyrimo metodą ir eksponentinės funkcijos integravimą, gavo analitinį sprendinį FVM temperatūrai, skystosios ir kietosios fazės sandūros sluoksnio padėčiai, skystosios fazės daliai ir sukauptam šilumos kiekiui nustatyti FVM šilumos kaupimo įrenginyje su VPV šilumokaičiu. Gauti rezultatai buvo palyginti su kitų autorių skaitinių modelių ir eksperimentų rezultatais. Nustatyta, kad nedimensinėje formoje pateiktas modelis yra universalesnis, lyginant su eksperimentiniu tyrimu, o, lyginant su skaitiniu modeliu, pasiūlytas analitinis sprendimas gali žymiai sumažinti skaičiavimo laiką. Mazzeo et al. (Mazzeo et al., 2017) pateikė analitinio modelio, kurį taikant sprendžiami stacionarūs periodiniai šilumos mainai baigtiniame FVM sluoksnyje, eksperimentinę validavimą. Analitinio modelio validavimas buvo atliekamas lyginant išmatuotą ir apskaičiuotą FVM temperatūrą skirtinguose cilindrinės formos bandinio aukščiuose, paviršiaus šilumos srautus ir bendrą sukauptos šilumos kiekį. Fornarelli et al. (Fornarelli et al., 2019) pateikė supaprastintą teorinį skaičiavimo

modelį VV tipo šilumokaičiui, kuriuo remiantis galima gana tiksliai numatyti FVM lydymosi laiką. Šis modelis gali būti taikomas pirminiame FVM įrenginio projektavimo ir optimizavimo etape.

Pastaraisiais metais taip pat atliekama daug FVM tyrimų, taikant įvairią kompiuterinio modeliavimo programinę įrangą. Šilumos mainų modeliavimas fazinio virsmo medžiagose yra kompleksiškas uždavinys, reikalaujantis taikyti įvairius metodus ir tiksliai formuoti kraštines sąlygas, nes, modeliuojant fazės virsmą, kinta medžiagos savybės priklausomai nuo jos būvio. Todėl, išaugus poreikiui skaičiuoti FVM pagrindu veikiančias šilumos kaupimo sistemas, vis aktyviau vystomi skaitinio modeliavimo metodai. Be tradicinių modeliavimo metodų, tokių kaip baigtinių tūrių metodas, baigtinių skirtumų metodas ir baigtinių elementų metodas, pastaruoju metu aktyviai taikoma Boltzmano gardelės metodu (BGM) (angl. *lattice Boltzmann method*) pagrįsta kinetinė teorija, skirta fazės virsmo uždaviniams spręsti. Šis metodas jau buvo taikomas modeliuojant kompleksinius skysčių srautus, tokius kaip daugiafaziai srautai, turbulencija, mikrosrautai, skysčio ir kietojo kūno sąveika, srautai porėtoje terpėje (Hu et al., 2017). Dažniausiai pasitaikantys FVM matematinio modeliavimo metodai skirstomi į keturias grupes (Zhao et al., 2018):

- fazių sandūros sluoksniu sekimo metodas (angl. *front tracking method*). Šiuo atveju aiškiai atskiriama riba tarp skystosios ir kietosios fazių. Kiekviena fazė modeliuojama atskirai;
- lygio nustatymo metodas (angl. *level set method*). Riba nustatoma netiesiogiai, tačiau ribos pozicija ir išlinkimas turi būti tiksliai apskaičiuojami;
- entalpijos metodas (angl. *enthalpy method*). Metodas paremtas skystosios ir kietosios fazių temperatūromis;
- fazės lauko metodas (angl. *phase field method*). Vienas iš naujausių metodų, pradedamas taikyti šioje srityje.

Analitinių, pusiau analitinių ar skaitinių metodų taikymas leidžia priimti tam tikrus pradinius projektinius sprendinius FVM šilumos kaupimo įrenginio vystymo etape, tačiau turi daug apribojimų, kurių neteisingas įvertinimas arba neįvertinimas gali turėti didelę įtaką rezultatų tikslumui. Taip pat pastebimas tyrimų trūkumas, kai nagrinėjama kintančių FVM termofizikinių savybių įtaka rezultatams analitiniuose skaičiavimuose, pusiau analitiniuose ar skaitiniuose modeliuose. Tikslus FVM termofizikinių savybių įvertinimas leistų mažinti klaidas projektuojant ar modeliuojant FVM pagrindu veikiančius šilumos kaupimo įrenginius (Soni et al., 2018).

1.4.1. Natūrali konvekcija

Pagrindinės savybės, veikiančios šilumos mainų procesą, yra FVM klampa ir tankis. Dėl nevienodos temperatūros skirtingi FVM sluoksniai yra nevienodo tankio, todėl atsiranda laisvas skystosios FVM fazės judėjimas. Maišantis skirtingų temperatūrų srautams, vyksta šilumos mainai dėl natūralios konvekcijos, o FVM klampa turi didelę įtaką konvekcijos intensyvumui. Dėl natūralios konvekcijos poveikio FVM sluoksnio (kietosios ar skystosios fazės) formavimasis skiriasi horizontalios ir vertikalios šilumokaičio padėties atveju. Vykstant FVM įkrovimo procesui, skystosios fazės tūrio dalis didėja viršutinėje šilumokaičio dalyje (1.9 pav., a ir c). Vykstant FVM iškrovimo procesui, fazės virsmui iš skystosios į kietąją, ties šilumos mainų paviršiumi formuojasi kietosios fazės sluoksnis ir šilumos mainai tarp FVM ir šilumnešio toliau vyksta per šį, nuolatos augantį, sluoksnį (1.9 pav., b).

1.9 pav. FVM skystosios ir kietosios fazės sluoksnių formavimasis dėl natūralios konvekcijos poveikio (Mehta et al., 2019; Vogel et al., 2016)

Fig. 1.9. Formation of PCM solid and liquid phase layers due to the natural convection (Mehta et al., 2019; Vogel et al., 2016)

Eksperimentiniai natūralios konvekcijos įtakos fazės virsmo procesui tyrimai jau vyko ir prieš 50 metų (Szekely & Chhabra, 1970), tačiau šilumai kaupti tinkamų FVM paieška ir termodinaminių procesų analizė vykdoma ir toliau.

Hale ir Viskanta (Hale & Viskanta, 1978) atliko eksperimentinius parafino fazės virsmo tyrimus, kurių metu nagrinėjo natūralios konvekcijos svarbą šilumos perdavimui lydymosi srityje. Nustatyta, kad dėl natūralios konvekcijos lydymosi proceso metu šilumos mainai vyksta intensyviau. Tai patvirtina ir kiti tyrimai bei apžvalgos (Akgün et al., 2007; Avci & Yazici, 2013; Gadgil & Gobin, 1984; Kalapala & Devanuri, 2018; Souayfane et al., 2018). Pastebėta, kad tinkamai suaktyvintos natūralios konvekcijos srovės leidžia su-

mažinti FVM šilumos kaupimo sistemos įkrovimo laiką, o šio reiškinio tinkamas aprašymas būtinai skaitiniuose ir analitiniuose tyrimuose (Castell et al., 2008; Deng et al., 2019; Hosseini et al., 2012). Pvz., viename iš eksperimentinių tyrimų (Sun et al., 2016) nustatyta, kad natūrali konvekcija leido sumažinti fazės virsmo (iš kietos į skystą) laiką 45 %, vykstant vertikaliems šilumos mainams, kitame eksperimentiniame tyrime (Sun et al., 2018) pastebėta, kad lydymosi laikas sumažėjo nuo 18,8 % iki 50,8 % priklausomai nuo plastikinių plokščių, pripildytų FVM, posvyrio kampo. Kamkari ir Shokouhmand (Kamkari & Shokouhmand, 2014) eksperimentiškai tyrė FVM pripildytą stačiakampės formos talpą su dalinėmis horizontaliomis plokštelėmis ir be jų. Autoriai patvirtino, kad plokštelės padidino šilumos srautą, tačiau per didelis (neoptimalus) plokštelių skaičius pradeda veikti kaip kliūtis natūralios konvekcijos srautams. Vėlesniame tyrime Kamkari ir Groulx (Kamkari & Groulx, 2018) analizavo talpos (plokštelių) posvyrio kampo įtaką FVM lydymuisi ir nustatė, kad lydymosi laikas sumažėjo nuo 37 % iki 52 % priklausomai nuo talpos padėties ir plokštelių skaičiaus.

Hosseini et al. (Hosseini et al., 2012, 2014) skaitiškai ir eksperimentiškai analizavo FVM (RT50) lydymosi proceso eigą VV šilumokaityje. Šiame tyrime buvo pasiūlyta FVM dinaminės klampos kitimo koreliacinė priklausomybė nuo temperatūros.

Lydymosi proceso asimetriją dėl natūralios konvekcijos horizontaliame VV šilumokaityje aprašė Avci ir Yazici (Avci & Yazici, 2013). Šią tendenciją pastebėjo ir Seddegh et al. (Seddegh et al., 2016), kurie vėlesniame tyrime (Seddegh et al., 2017) pateikė įžvalgas dėl natūralios konvekcijos ir vertikaliame VV šilumokaityje.

Vogel et al. (Vogel et al., 2016) atliko skaitinį ir eksperimentinį tyrimą ir natūralios konvekcijos įtaką šilumos mainų procesui charakterizavo taikydami nedimensinį rodiklį – konvekcijos pagerinimo faktorių (angl. *convective enhancement factor*). Autoriai taip pat nurodė papildomų tyrimų poreikį, susijusį su gilesne šilumos perdavimo proceso analize.

Souayfane et al. (Souayfane et al., 2018) pristatė supaprastintą FVM lydymosi dėl spinduliavimo ir natūralios konvekcijos modelį, kurio pagrindas yra pagerinto šilumos laidumo (angl. *enhanced thermal conductivity*) išraiškos taikymas ir panašumo teorija. Pagal gautus rezultatus dėl natūralios konvekcijos poveikio šilumos perdavimas pagerinamas 40–55 % ir išsilydžiusios FVM tūrio dalis padidėja apie 35 %, lyginant su modelio, kuriame taikomas tik šilumos perdavimas laidumu, rezultatais.

Joybari et al. (Joybari et al., 2017) nagrinėjo natūralios konvekcijos reiškinį taikant supaprastintą skystosios ir kietosios fazių sandūros sluoksnio padėties nustatymo (sekimo) metodą (angl. *front tracking method*). Autoriai horizontalios

padėties šilumokaityje atskyrė viršutinę ir apatinę sistemos dalis dėl šias dalis skirtingai veikiančių plūdrumo jėgų.

Han et al. (Han et al., 2017) analizavo natūralios konvekcijos poveikį FVM sistemos veikimui, esant skirtingoms šilumnešio įtekėjimo vietoms. Jų rezultatai parodė, kad natūrali konvekcija yra minimali, kai šilumnešio įtekėjimas vykdomas viršutinėje dalyje, o tai sukelia nevienodą kietosios ir skystosios fazių sąveikos sluoksnio pasiskirstymą įvairiomis šilumokaičio kryptimis. Mehta et al. (Mehta et al., 2019) savo eksperimentiniais tyrimais taip pat patvirtino, kad horizontalios konfigūracijos VV šilumokaičio atveju jo viršutinėje dalyje lydymasis prasideda anksčiau dėl natūralios konvekcijos reiškinio. Zhang et al. (S. Zhang et al., 2020) 3D skaitiniame tyrime nagrinėjo šilumokaičio plokštelių struktūras, vertinant natūralią konvekciją, ir nustatė, kokios formos plokštelės užtikrina didžiausias konvekcines sroves vertikalios ir horizontalios konfigūracijos šilumokaičiuose. Mahdi et al. (M. S. Mahdi et al., 2019) analizavo parafino lydymosi procesą (įkrovimą) VV šilumokaityje. Jie nustatė, kad procesas efektyviau vyko esant horizontaliai FVM sistemos padėčiai, kai šilumokaitis buvo be plokštelių. Šilumokaičio su plokštelėmis atveju sistemos padėtis (vertikali ar horizontali) turėjo minimalią įtaką FVM lydymosi procesui. Nagrinėjant konvekcinius šilumos mainus dėl natūralios konvekcijos vienas iš diskusijos objektų taip pat yra būdingojo matmens pasirinkimas (Vogel et al., 2016; Vogel & Johnson, 2019).

Atliktų tyrimų analizė rodo, kad natūrali konvekcija turi didelę įtaką šilumos mainų procesui FVM šilumos kaupimo įrenginyje. Tinkamai parinkta šilumokaičio geometrija gali pagreitinti FVM įkrovimo ir iškrovimo procesą, todėl natūralios konvekcijos poveikis turi būti analizuojamas FVM įrenginių projektavimo etape. Siekiant įvertinti natūralios konvekcijos įtaką šilumos perdavimo procesui, taikant analitines išraiškas, turi būti apskaičiuojamas natūralios konvekcijos šilumos atidavimo koeficientas.

1.4.2. Tankio pokytis

Vystant analitinius ar skaitinius modelius yra sudėtinga įvertinti medžiagos tankio kitimą. Klasikiniai uždavinių sprendimo metodai, tokie kaip *Stefano* uždavinys, taikomi laikant, kad medžiagos tankis nekinta ir yra pastovus. Tačiau ši prielaida daro įtaką tam tikroms paklaidoms, kurių gali atsirasti dėl termomechaninės sąsajos tarp FVM ir talpos korpuso (Dallaire & Gosselin, 2016). Pavyzdžiui, Peng et al. (Peng et al., 2019) atliko FVM šilumos laidumo ir tankio kitimo įtakos šilumos kaupimo įrenginio charakteristikoms tyrimą. Cabeza et al. (Cabeza et al., 2020) tyrinėjo skirtingų FVM tūrio kitimą, kuris įvyksta dėl medžiagos tankio skirtumo tarp skystosios ir kietosios fazės, laboratoriniuose bandiniuose ir realaus dydžio FVM įrenginių prototipuose. Janghel et al.

(Janghel et al., 2020) pasiūlė vienmatį pusiau analitinį modelį, skirtą tuštumų formavimuisi analizuoti, vykstant medžiagos kietėjimui (tūrio mažėjimui), ir šio proceso įtaką įrenginio charakteristikoms. Hernández-Cooper ir Otero (Hernández-Cooper & Otero, 2019) tyrinėjo slėgio sukkelto FVM tankio pokyčio įtaką sukaupiamam energijos kiekiui. Dallaire ir Gosselin (Dallaire & Gosselin, 2016) klasifikavo skirtingus metodus, kuriuos taikant įvertinama tankio pokyčio įtaka, vykstant fazės virsmui, ir pasiūlė du naujus modelius, leidžiančius įvertinti termomechaninę sąsają tarp FVM ir talpos paviršių. Šie du modeliai buvo integruoti į baigtinių tūrių judančio tinklelio metodą ir buvo keičiama spyruoklės, imituojančios oro slėgio poveikį, konstanta. Esant labai mažoms konstantų vertėms, rezultatas buvo toks pat kaip fazės virsmui vykstant atviroje talpoje. Tačiau padidinus vertes buvo pastebėta, kad fazės virsmo trukmė gali būti iki 19 % ilgesnė ir proceso metu absorbuojamas iki 9 % didesnis šilumos kiekis.

Chiew et al. (Chiew et al., 2017) skaitiškai ir eksperimentiškai tyrė oro tuštumų, kurios formuojasi dėl tankio pokyčio, poveikį šilumos mainų procesui cilindrinės formos talpoje. Chiew et al. (Chiew et al., 2019) taip pat sukūrė FVM įrenginio prototipą, kuris gali kompensuoti FVM plėtimąsi, taip išvengiant tuštumų formavimosi, vykstant medžiagos kietėjimui, ir užtikrinant gerą terminį kontaktą tarp FVM ir šilumos mainų paviršių.

FVM tankio kitimas, vykstant medžiagos fazės virsmui, sukelia nepageidaujamą medžiagos tūrio pasikeitimą. Vykstant fazės virsmui iš kietosios į skystąją, FVM tūryje (prie šilumos šaltinio) formuojasi uždaros skystosios fazės sritys, kurios plečiasi, dėl to atsiranda mechaninis poveikis įrenginio konstrukcijai ir FVM. Praktikoje uždaroje sistemoje, kuriose tūrinis plėtimasis kompensuojamas numatant laisvąjį tūrį (pripildytą oro arba inertinių dujų), vyksta dujų slėgimas, o susidarantis slėgis veikia įrenginio komponentus ir FVM laisvąjį paviršių. Vykstant atvirkštiniam procesui, t. y. medžiagos kietėjimui, FVM tūryje formuojasi tuštumos: kietosios medžiagos sluoksnis formuosi prie aušinančio kontūro, todėl kietoji FVM pasiskirsto netolygiai ir susiformuoja sritys, kuriose lieka atviri šilumos mainų paviršiaus plotai. Todėl medžiagos tankio kitimas turi būti įvertintas, projektuojant FVM šilumos kaupimo įrenginius.

1.5. Šilumos kaupimo įrenginių eksperimentiniai tyrimai

Atliekant eksperimentus, pirmiausia siekiama gauti FVM temperatūros kitimo grafikus, pagal kuriuos nustatoma įkrovimo ir iškrovimo proceso trukmė. Kiti pagrindiniai uždaviniai yra: nustatyti fazės virsmo (lydymosi / kietėjimo) trukmę, nustatyti kietosios / skystosios FVM kiekio kitimą laike, nustatyti šilumos srauto (galios) priklausomybę nuo laiko, išmatuoti sukauptos / atiduotos energijos

jos kiekius, palyginti rezultatus su teoriniais skaičiavimais. Praktikoje eksperimentinės kreivės nuo teorinių skiriasi, įgauna kitokią formą dėl daugelio faktorių. Vieni pagrindinių yra šilumos nuostoliai į aplinką, temperatūros gradientas. Dar vienas svarbus faktorius, leidžiantis įvertinti FVM šilumos kaupimo sistemos efektyvumą, yra skystosios arba kietosios FVM tūrio dalies kitimas laike. Ši priklausomybė leidžia nustatyti fazinio virsmo šilumos panaudojimo efektyvumą ir eliminuoti savitosios šilumos efektą. Atkreiptinas dėmesys, kad skystosios ar kietosios fazės tūrio dalies nustatymas (stebėjimas) yra gana daug resursų reikalaujantis procesas, kurio metu reikia tinkamai sukaupiti ir apdoroti vaizdo medžiagą, susiejant ją su testuojamo FVM įrenginio techniniais parametrais, FVM mase ir tūriu. Todėl eksperimentiniai tyrimai dažnai papildomi validuotais skaitiniais modeliais, kurie leidžia išplėsti tyrimų ribas ir ekonomiškiau išbandyti tiek skirtingus veikimo režimus, tiek konstrukcinius patobulinimus (Eslamnezhad & Rahimi, 2017; Lin et al., 2018; Tay et al., 2013). Be to, skaitinis modeliavimas prisideda prie šilumos kaupimo įrenginių optimizavimo uždavinių įgyvendinimo (Fang et al., 2018). Tačiau autoriai pastebi, kad nors skaitiniai tyrimai suteikia vertingos informacijos apie FVM šilumos kaupimo įrenginio veikimą, ieškant optimalių sprendimų turi būti atsižvelgiama ir į kuriamo įrenginio kainą bei konstrukcijos sudėtingumą (technologines galimybes) (Riahi et al., 2018). Toliau pateikiama FVM įrenginių eksperimentinių tyrimų apžvalga.

Medrano et al. (Medrano et al., 2009) atliko nedidelių skirtingo tipo ir skirtingų konfigūracijų šilumokaičių panaudojamo FVM šilumos kaupimo sistemose eksperimentinį tyrimą. Gauti rezultatai parodė, kad vamzdinis plokštelinis (kompaktiškas) šilumokaitis užtikrina didžiausią šilumos srautą, lyginant su VV ir plokštelinio tipo šilumokaičiais.

Eksperimentiniame tyrime Gasia et al. (Gasia et al., 2017) palygino keturis FVM šilumos kaupimo įrenginius. Buvo tiriami VPV šilumokaičio tipo šilumos kaupimo įrenginiai, naudojant organinę FVM (parafiną RT58). Autoriai nagrinėjo šilumai laidžių plokštelių integravimo į konstrukciją ir skirtingų šilumnešių įtaką šilumos mainų procesui. Tyrime buvo naudojami trys eksperimentiniai stendai, o rezultatai lyginami pagal nustatytus kriterijus: sukauptos šilumos kiekis, vidutinė galia, didžiausioji galia (5 min laikotarpiu), didžiausiosios galios ir šilumos kiekio santykis, FVM įkrovimo laikas.

Amagour et al. (Amagour et al., 2018) eksperimentiškai tyrė šilumnešio srauto įtaką FVM lydymosi ir kietėjimo procesams vamzdiame plokšteliniame (kompaktiškame) šilumokaityje. Skirtingų režimų rezultatai buvo lyginami grafiškai, pavaizduojant temperatūros kitimo profilius, FVM įkrovimo / iškrovimo galią, sukauptos / atiduotos šilumos kiekį, FVM šilumos kaupimo įrenginio efektyvumą.

Zondag et al. (Zondag et al., 2018) testavo VPV šilumokaičio tipo FVM įrenginio prototipą, pripildytą skirtingų FVM, parafino RT70 ir druskos hidratų. Testuojant prototipą buvo keičiama įeinančio šilumnešio temperatūra, šilumnešio srautas, prototipo padėtis (vertikali ir horizontali). Nustatyta, kad šilumnešio temperatūra turi didelę įtaką šilumos mainų procesui, šilumnešio debito įtaka – mažesnė, horizontali prototipo padėtis užtikrina didesnę FVM įkrovimo galią, taip pat didesnė įkrovimo galia matyti FVM RT70 atveju. Eksperimento rezultatai taip pat buvo palyginti su skaitiniu modeliu ir nustatyta, kad skaitinis modelis turi būti koreguojamas įvertinant natūralios konvekcijos įtaką.

Besagni ir Croci (Besagni & Croci, 2019) tyrė bandomąjį didesnio paviršiaus ploto (kompaktišką) VP šilumokaičio tipo FVM šilumos kaupimo įrenginį. Eksperimentai buvo atliekami, bandant lygiagretų ir nuoseklų šilumokaičio kontūrų jungimą, keičiant šilumnešio srautą. Buvo nustatyta, kad tiriamasis įrenginys, lyginant su tokio paties tūrio nekintančios fazės šilumos kaupimo sistema (talpa pripildyta vandens), gali sukaupti 65 % daugiau energijos.

Koukou et al. (Koukou et al., 2020) testavo realaus dydžio VP šilumokaičio tipo FVM įrenginio prototipą. Prototipas pritaikytas naudoti pastatų šildymo sistemose, kuriose kaip šilumos šaltinis naudojami saulės kolektoriai arba šilumos siurblys. Eksperimentai buvo atliekami naudojant dvi skirtingas organines FVM (parafiną A44 ir A46). Siekiant imituoti skirtingus šilumos šaltinius ir skirtingas šildymo sistemos apkrovas, tyrimai atlikti esant skirtingiems šilumnešio srautams FVM įkrovimo ir iškrovimo procesų metu. Nustatyta, kad FVM A44 užtikrina didesnę šiluminę talpą ir didesnę įkrovimo galią, lyginant su FVM A46.

Fadl ir Eames (Fadl & Eames, 2019) atliko FVM įrenginio, skirto karštam vandeniui ruošti, eksperimentinį tyrimą. FVM įrenginio šilumokaitis buvo sudarytas iš vertikalių vamzdelių pluošto, o stačiakampė akumuliacinė talpa pripildyta 80 kg FVM RT44HC. Eksperimento metu, keičiant šilumnešio debitą ir temperatūrą, buvo stebimas FVM temperatūros kitimas, sukauptas energijos kiekis, įkrovimo ir iškrovimo galia bei trukmė. Nustatyta, kad šilumnešio temperatūros didinimas turi žymiai didesnę įtaką FVM įkrovimo proceso trukmei lyginant su šilumnešio debito didinimu. Taip pat pastebėta, kad FVM įkrovimo trukmė efektyviai mažėja tik iki tam tikros šilumnešio debito vertės, virš kurios debito didinimas tik labai nežymiai veikia lydymosi procesą.

Daugelyje šiame darbe analizuotų mokslinių tyrimų nagrinėjama įvairių parametų įtaka FVM įrenginių veikimo charakteristikoms. Tačiau didelis eksperimentinių ir teorinių tyrimų skaičius taip pat rodo, kad plati FVM ir šilumokaičių konstrukcijų įvairovė kelia papildomų klausimų dėl optimalių veikimo sąlygų ir techninių sprendinių parinkimo projektuojant FVM įrenginius. Lyginant šilumokaičių tipus, konfigūraciją, konstrukcines medžiagas, šilumnešio masinius debitus, fazinio virsmo medžiagų tipus ir lydymosi temperatūrą, komplek-

sinis šių parametų vertinimas leistų detaliai analizuoti kuriamuose prototipuose vykstančius procesus bei prognozuoti įrenginių veikimo charakteristikas.

1.6. Šilumos kaupimo įrenginių charakteristikų prognozavimas

Eksperimentinių ir teorinių tyrimų rezultatai yra pagrindas šilumos perdavimo procesui gerinti bei FVM pagrindu veikiančio šilumos kaupimo įrenginio veikimo režimams optimizuoti. Todėl svarbu nustatyti, kaip skirtingi parametrai ir jų deriniai veikia fazės virsmo procesą, bei nustatyti ryšį tarp nepriklausomųjų kintamųjų parametų ir atsako (priklausomųjų parametų). Tokiu atveju atliekama koreliacinė ir regresinė duomenų analizė. Toliau pateikiama tyrimų, susijusių su FVM įrenginių veikimo charakteristikų prognozavimu, apžvalga.

Yu et al. (Yu et al., 2021) atliko tyrimą, kurio metu nustatė FVM termofizikinių savybių įtaką FVM įkrovimo procesui, esant pastoviam ir kintančiam šilumos šaltiniui, bei gavo regresijos modelį, leidžiantį prognozuoti sukauptos šilumos kiekį ir šilumos srautą. Yu et al. (Yu et al., 2020) atliko VPV šilumokaicio tipo FVM šilumos kaupimo įrenginio su sudėtingos „medžio“ formos plokštelėmis geometrijos optimizavimą, taikydami atsako paviršiaus metodą (angl. *Response Surface Method* (RSM)). FVM lydimosi trukmė buvo pasirinkta kaip prognozuojamas atsakas, o nepriklausomieji kintamieji buvo šilumokaicio plokštelių atšakų ilgio santykis ir jų storio rodiklis. Sciacovelli et al. (Sciacovelli et al., 2015), taikydami skaitinį modeliavimą ir atsako paviršiaus metodą, atliko VPV šilumokaicio tipo FVM šilumos kaupimo įrenginio šilumai laidžios „Y“ formos plokštelės geometrijos optimizavimą. Kaip kintamieji buvo pasirinkti plokštelės geometrijos parametrai, t. y. kampas tarp plokštelės atšakų ir šių atšakų ilgis. Nustatyta, kad optimali plokštelės geometrija priklauso ne tik nuo atitinkamo geometrinių parametų derinio, bet ir nuo FVM įrenginio veikimo trukmės. Nóbrega et al. (Nóbrega et al., 2019) atliko eksperimentinį tyrimą, kurio tikslas buvo nustatyti veikimo charakteristikų koreliacijas, siekiant prognozuoti vamzdeliams lygiagrečių (ašinių) plokštelių skaičiaus, jų pločio, šilumnešio masinio debito ir jo temperatūros įtaką šilumos mainų procesui FVM šilumos kaupimo įrenginyje. Šiuo atveju kaip priklausomieji kintamieji (atsakas) pasirinkti FVM skystosios ir kietosios fazių sandūros sluoksnio padėtis ir judėjimo greitis, kietosios fazės masė ir FVM kietėjimo (iškrovimo proceso) trukmė.

Atkreiptinas dėmesys, kad didžioji dalis tyrimų, taikant regresinę analizę arba atsako paviršiaus metodą, yra atliekama remiantis skaitinio modeliavimo rezultatais. Pastebimas trūkumas tyrimų, kuriuose ši metodika būtų taikoma FVM šilumos kaupimo įrenginių, veikiančių imituojant realias sąlygas arba realiomis sąlygomis, analizė.

1.7. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

Atlikus FVM naudojimo šilumai kaupiti mokslinių tyrimų analizę, paaiškėjo:

1. FVM šilumos perdavimui skaičiuoti galima iš dalies pritaikyti šilumokaičių skaičiavimo principus. Tačiau dėl proceso metu vykstančio fazės virsmo šių metodikų taikymas turi daug neapibrėžtumų, o rezultatų tikslumui didelę įtaką turi pasirinktos šilumos mainų proceso kraštinės sąlygos, FVM termofizikinės savybės bei šilumokaičio tipas.
2. Trūksta tyrimų, kai detalai nagrinėjamas šilumos atidavimo koeficientas, vykstant natūraliai konvekcijai FVM lydymosi metu, o eksperimentiniai rezultatai lyginami su teoriniais.
3. Dažnais atvejais, skaičiuojant FVM šilumos kaupimo įrenginio galią ir fazės virsmo trukmę, neįvertinamas dėl medžiagos tūrinio plėtimosi atsirandantis mechaninis poveikis fazinio virsmo medžiagai.
4. Trūksta tyrimų, kuriuose nustatomos FVM įrenginio įkrovimo ir iškrovimo proceso empirinės lygtys, remiantis eksperimentiniais duomenimis.

Apžvelgus tyrimus nustatyta, kad tikslinga sudaryti kompleksinę FVM įrenginio veikimo charakteristikų vertinimo metodiką, apimančią skaitinį modeliavimą, analitinių išraiškų taikymą ir eksperimentinius tyrimus. Siekiant atlikti eksperimentinius tyrimus, tikslinga, remiantis projektiniais reikalavimais, sukurti FVM pagrindu veikiančio šilumos kaupimo įrenginio prototipą ir atlikti testavimus imituojant skirtingus veikimo režimus. Tam reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Atliktos mokslinių tyrimų analizės pagrindu parengti FVM šilumos kaupimo įrenginio tyrimų metodiką.
2. Remiantis projektinėmis sąlygomis parinkti FVM šilumos kaupimo įrenginio koncepciją ir atlikti pradinės geometrijos skaitinį modeliavimą. Atsižvelgiant į modeliavimo rezultatus parengti dvi FVM įrenginio šilumokaičio versijas eksperimentiniams tyrimams.
3. Parengti eksperimentinių tyrimų standą, pagaminti fazinio virsmo medžiagos pagrindu veikiančio šilumos kaupimo įrenginio prototipus ir atlikti eksperimentinius tyrimus.

4. Remiantis eksperimentinių tyrimų rezultatais sudaryti regresijos modelį, leidžiantį prognozuoti FVM šilumos kaupimo įrenginio įkrovimo ir iškrovimo trukmę.

Fazinio virsmo medžiagos pagrindu veikiančio šilumos kaupimo įrenginio charakteristikų tyrimų metodika

Šiame skyriuje pateikta kuriamo FVM šilumos kaupimo įrenginio veikimo charakteristikų nustatymo ir vertinimo metodika bei pagrindinės projektinės sąlygos.

Skyriaus tematika paskelbtos šešios publikacijos (Pakalka et al., 2021; Pakalka et al., 2021; Pakalka et al., 2020; Pakalka et al., 2020; Pakalka et al., 2019; Pakalka et al., 2018).

2.1. Kompleksinis šilumos kaupimo įrenginio charakteristikų vertinimas

Fazinio virsmo medžiagų pagrindu veikiančiuose šilumos kaupimo įrenginiuose vyksta sudėtingas šilumos mainų procesas, o pagrindiniai neapibrėžtumai, skaičiuojant šilumos perdavimą, kyla dėl FVM kietosios ir skystosios fazės tūrio dalių kitimo laike ir skirtingų fazių sandūros sluoksnio padėties nustatymo (sekimo) bei prognozavimo. Šie neapibrėžtumai gali būti apibendrinti kaip:

- fazės virsmo netiesiškumas, lemiantis sunkiai nuspėjamą skystosios ir kietosios fazės sandūros sluoksnio judėjimą, vykstant fazės virsmui;
- nepakankamos žinios apie skystojoje fazėje ir kietosios bei skystosios fazės sandūroje vykstančių šilumos mainų mechanizmą;
- nenuspėjamas FVM tūrio kitimas ir mechaninis poveikis šilumokaičio konstrukcijai, vykstant fazės virsmui, ypač vykstant medžiagos kietėjimui. Taip pat, mažėjant medžiagos užimam tūriui, vyrauja tuštumų formavimasis, kuris mažina FVM kontaktą su šilumokaičiu, o tai turi neigiamą įtaką šilumos perdavimui (mažėja šilumos srautas).

Šiame darbe vykdomi moksliniai tyrimai, siekiant nustatyti įvairių parametrų įtaką FVM šilumos kaupimo įrenginio veikimui. Darbe nagrinėjama šilumokaičio tipo šilumos kaupimo įrenginio koncepcija ir pateikiama šiai koncepcijai būdingų veikimo charakteristikų analizė. Šiame darbe taikomos tyrimų metodikos principinė schema pateikta 2.1 paveiksle.

2.1 pav. Bendra tyrimų metodikos schema

Fig. 2.1. General scheme of the research methodology

Pirmasis tyrimų etapas yra nustatyti FVM šilumos kaupimo įrenginio projektinius reikalavimus, pagal kuriuos, remiantis mokslinės literatūros analize, parinkti šilumokaičio koncepciją (tipą). Remiantis pasirinktai šilumokaičio kon-

cepcijai būdingais projektavimo ir gamybos principais, atlikti analitinius skaičiavimus ir parengti pradinę FVM šilumos kaupimo įrenginio geometriją bei atlikti jos skaitinį tyrimą. Atsižvelgus į tyrimo rezultatus, koreguojama pradinė geometrija ir gaminamos dvi prototipo versijos, su kuriomis atliekami eksperimentiniai tyrimai.

Šiuo atveju kuriamo įrenginio projektiniai reikalavimai nustatomi remiantis Europos Sąjungos mokslinių tyrimų ir inovacijų programos „Horizontas 2020“ projektu „Sustainable Production of Industrial Recovered Energy using energy dissipative and storage technologies (SusPIRE)“ (SusPIRE, 2019). Vienas iš projekto tikslų – sukurti didelio energijos tankio šilumos kaupimo įrenginį ir pademonstruoti jo veikimą realiomis sąlygomis pramonės įmonėje. Svarbi sąlyga – atgautas šilumos kiekis turi būti sukaupiamas mažesniame tūryje lyginant su nekintančios fazės šilumos kaupimo įrenginiais. Šio projekto atveju keliamas reikalavimas dideliame energijos tankiui (FVM panaudojimui) ir ribojamas šilumos kaupimo įrenginio užimamas tūris.

Atsižvelgiant į SusPIRE projektą, šiame tyrime analizuojamo FVM šilumos kaupimo įrenginio paskirtis yra atgauti ir sukaupiti iš pramonės technologinio proceso šalinamą atliekinę šilumą ir panaudoti ją to paties proceso pradinėje etape. Šiuo atveju po technologinio proceso į aplinką pašalinamas vandens garas / kondensatas, o iš šio šilumos šaltinio atgauta šiluma panaudojama į tą patį procesą tiekiamam šaltam vandeniui, skirtam ruošti vandens garą, pašildyti. SusPIRE projekto technologinio proceso vieno ciklo trukmės matavimo rezultatai pavaizduoti 2.2 paveiksle.

2.2 pav. Atliekinės šilumos šalinimo ciklas (SusPIRE, 2019)

Fig. 2.2. One cycle of residual heat stream (SusPIRE, 2019)

Iš grafiko (2.2 pav.) matyti, kad vandens garo / kondensato išleidimas po technologinio proceso į aplinką trunka iki 540 sekundžių, temperatūra kinta ribose 97–100 °C. Šie parametrai (proceso trukmė ir šilumos šaltinio temperatūra)

yra pagrindinės projektinės sąlygos. Taip pat pažymėtina, kad vandens garo / kondensato išleidimas į aplinką nėra pastovus ir susideda iš daug ciklų. Tai reiškia, kad svarbu suprojektuoti įrenginį, kuris per vieno ciklo trukmę atgautų ir sukauptų į aplinką šalinamą perteklinę šilumą. Taigi, vienas iš pagrindinių kriterijų, kuriant FVM šilumos kaupimo įrenginį, yra greitas FVM įkrovimo ir iškrovimo procesas.

2.2. Šilumos mainų proceso skaitinis modelis

Šiame tyrime šilumos mainų skaitiniam modeliavimui taikomas tariamosios savitosios šilumos (angl. *apparent heat capacity*) metodas. Šio metodo pagrindinis privalumas yra tas, kad atliekant skaičiavimą nereikalingas FVM skirtingų fazių sandūros sluoksnio padėties nustatymas (sekimas). Šio metodo esmė yra dirbtinai padidinti FVM savitąją šilumą medžiagos lydymosi intervale. Tokiu atveju FVM išlydyti reikalingas šilumos kiekis, priklausantis nuo dirbtinai padidintos savitosios šilumos, turi būti lygus fazinio virsmo šilumai. Šio metodo iliustracija pateikta 2.3 paveiksle. Matematinė tariamosios (modifikuotos) savitosios šilumos išraiška (Proell et al., 2020):

$$\int_{T_K}^{T_S} c_T dT = \int_{T_K}^{T_S} c(T) dT + L, \quad (2.1)$$

čia c_T – tariamoji (modifikuota) fazinio virsmo savitoji šiluma, J/kgK; L – fazinio virsmo šiluma, J/kg; T_K – fazės virsmo pradžios temperatūra (kietoji fazė), °C; T_S – fazės virsmo pabaigos temperatūra (skystoji fazė), °C.

2.3 pav. Tariamosios savitosios šilumos metodo iliustracija (Proell et al., 2020)

Fig. 2.3. Illustration of the apparent heat capacity method (Proell et al., 2020)

Šiame darbe FVM šilumos kaupimo įrenginyje vykstančių šilumos mainų procesui modeliuoti naudojama „COMSOL Multiphysics“ programinė įranga, turinti integruotą fazės virsmo skaičiavimo modulį. Lygtys šioje programoje sprendžiamos, taikant baigtinių elementų metodą. Šilumos mainų procesas aprašomas šiais etapais:

- šilumos perdavimas kietuosiuose kūnuose;
- pradinės sąlygos;
- šilumos mainai su aplinka;
- pradinė temperatūra;
- šilumos perdavimas vykstant fazės virsmui.

Šilumos perdavimo procesas kietajame kūne aprašomas tokia lygtimi:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q + Q_{ted}, \quad (2.2)$$

čia ρ – tankis; c_p – savitoji šiluma esant pastoviam slėgiui; T – temperatūra; t – laikas; u – greičio vektorius; q – šilumos srauto tankis; Q – šilumos šaltinis; Q_{ted} – termoelastinis slopinimas; ∇ – Laplaso operatorius.

Šilumos srauto tankis dėl šilumos laidumo nustatomas pagal formulę:

$$q = -\lambda \nabla T, \quad (2.3)$$

čia λ – medžiagos šilumos laidumo koeficientas.

Vykstant šilumos mainams su aplinka $-n \cdot q = 0$, čia n yra vienetinis vektorius. Pradiniu laiko momentu $T = T_0$. Vykstant medžiagos fazės virsmui, šilumos perdavimo procesas aprašomas tokia lygtimi:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q + Q_p + Q_{vd}, \quad (2.4)$$

čia papildomai vertinama Q_p – slėgio jėgų darbas; Q_{vd} – klampos disipacijos dydis.

Taikant tariamosios (modifikuotos) savitosios šilumos metodą, fazinio virsmo šiluma įtraukiama į savitosios šilumos skaičiavimą. FVM tankio, savitosios šilumos ir šilumos laidumo koeficiento kitimas, vykstant FVM įkrovimo (lydymosi) procesui, aprašomas tokiomis lygtimis:

$$\rho = \theta \rho_{f1} + (1 - \theta) \rho_{f2}; \quad (2.5)$$

$$c_p = \frac{1}{\rho} \left(\theta \rho_{f1} c_{p,f1} + (1 - \theta) \rho_{f2} c_{p,f2} \right) + L \frac{\partial \alpha_m}{\partial T}; \quad (2.6)$$

$$\lambda = \theta \lambda_{f1} + (1 - \theta) \lambda_{f2}, \quad (2.7)$$

čia θ – FVM tūrio dalis pirmoje fazėje; f_1 – kietoji fazė; f_2 – skystoji fazė; α_m – koeficientas, apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\alpha_m = \frac{1}{2} \cdot \frac{(1-\theta)\rho_{f2} - \theta\rho_{f1}}{\theta\rho_{f1} + (1-\theta)\rho_{f2}}. \quad (2.8)$$

Esant FVM kietajai fazei, šio koeficiento vertė lygi 0, esant skystajai fazei – 1.

2.3. Šilumos kaupimo įrenginio galios ir energijos kiekio nustatymas

Šilumos srautas ($\dot{Q}$) tarp šilumnešio (vandens) ir FVM nustatomas pagal energijos balanso lygtį:

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p\Delta T, \quad (2.9)$$

čia $\dot{m}$ – šilumnešio masinis debitas, kg/s; c_p – medžiagos savitoji šiluma, esant pastoviam slėgiui, J/kgK; ΔT – temperatūrų skirtumas, K.

Šilumos srauto tankis q (W/m²) apskaičiuojamas pagal formulę:

$$q = \frac{\dot{Q}}{A} = \frac{\dot{m}c_p\Delta T}{A}. \quad (2.10)$$

FVM sukauptas arba atiduotas šilumos kiekis, remiantis dalinės entalpijos pasiskirstymu atskirais temperatūros intervalais, apskaičiuojamas pagal formulę:

$$Q = m\Delta h, \quad (2.11)$$

čia m – FVM masė, kg; Δh – FVM dalinė entalpija, J/kg.

Per laiko intervalą $\Delta\tau$ perduotas šilumos kiekis Q apskaičiuojamas pagal vidutinį šio intervalo šilumos srautą $\dot{Q}_{VID}$ tarp šilumnešio (vandens) ir FVM. Šiuo atveju laiko intervalas reiškia FVM įkrovimo arba iškrovimo proceso trukmę, per kurią FVM temperatūra pakinta 1 °C.

$$Q = \dot{Q}_{VID}\Delta\tau. \quad (2.12)$$

Atkreiptinas dėmesys, kad perduotą šilumos kiekį sudaro ne tik fazinio virsmo medžiagoje sukauptas arba atiduotas šilumos kiekis, bet ir FVM šilumos kaupimo įrenginio komponentų medžiagose, t. y. nerūdijančiojo plieno talpoje, variniame šilumokaityje ir šilumos izoliacijoje sukauptas arba atiduotas šilumos kiekis. Taip pat dalį šilumos kiekio sudaro ir šilumos nuostoliai į aplinką.

2.4. Šilumos atidavimo koeficiento nustatymas

Šilumos atidavimo koeficientas α ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$) yra vienas pagrindinių parametru, reikalingų šilumos mainų uždaviniams spręsti, tačiau šio koeficiento reikšmė priklauso nuo daugelio faktorių: nuo fluideo judėjimo greičio v , jo savitosios šilumos c_p ir šilumos laidumo koeficiento λ , nuo kietojo kūno paviršiaus temperatūros t_p ir fluideo temperatūros t_f , nuo fluideo kinematinės klampos koeficiento ν_f ir nuo dinaminės klampos koeficiento μ , nuo šilumą atiduodančio paviršiaus formos Φ ir matmenų l_1, l_2, l_3 , nuo fluideo terminio tūrinio plėtimosi koeficiento β , tankio ρ , nuo laisvojo kritimo pagreičio g . Taigi, šilumos atidavimo koeficientas yra daugelio kintamųjų funkcija:

$$\alpha = f(\Phi, l_1, l_2, l_3, t_p, t_f, v, \nu_f, \mu, c_p, \lambda, \rho, \beta, g). \quad (2.13)$$

Šiame tyrime, atsižvelgiant į šilumokaičio geometriją, šilumos mainų uždavinys sprendžiamas laikant, kad vyksta natūralios konvekcijos procesas FVM skystojoje fazėje.

Šilumos atidavimo koeficientas nuo šilumokaičio paviršiaus fazinio virsmo medžiagai apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\alpha_{FVM} = \frac{\dot{Q}}{A_{FVM}(T_{PAV} - T_{FVM})}, \quad (2.14)$$

čia T_{PAV} – šilumokaičio paviršiaus temperatūra, K; A_{FVM} – suminis šilumokaičio paviršiaus plotas (plokštelės ir vamzdeliai), m^2 ; T_{FVM} – skystosios fazės FVM temperatūra, K.

Šilumokaičio paviršiaus temperatūra apskaičiuojama, remiantis vidutine tiekiamo ir grįžtamo šilumnešio temperatūra:

$$T_{PAV} = \frac{(T_{KV, T} + T_{KV, G})}{2}. \quad (2.15)$$

Toliau pateikiamos teorinio šilumos atidavimo koeficiento nuo šilumokaičio paviršiaus fazinio virsmo medžiagai skaičiavimo formulės, kai būdingasis matmuo yra šilumokaičio vertikalios plokštelės aukštis L . Šiuo atveju plokštelės aukštis yra lygus šilumokaičio aukščiui.

Reilio (Ra) kriterijui apskaičiuoti taikoma išraiška (Cengel & Ghajar, 2015):

$$\text{Ra}_L = \frac{g\beta(T_{PAV} - T_{FVM})L^3}{\nu^2} \text{Pr}, \quad (2.16)$$

čia g – laisvojo kritimo pagreitis, m/s^2 ; β – FVM terminis tūrinio plėtimosi koeficientas, K^{-1} ; Pr – Prandtlio kriterijus; ν – kinematinės klampos koeficientas,

m^2/s ; L – būdingasis šilumokaičio geometrijos matmuo (vertikalios plokštelės aukštis), m.

Prandtlio kriterijus apskaičiuojamas (Cengel & Ghajar, 2015):

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a}, \quad (2.17)$$

čia a – temperatūros laidumo koeficientas, m^2/s . Temperatūros laidumo koeficientas priklauso nuo FVM šilumos laidumo koeficiento λ , medžiagos tankio ρ ir savitosios šilumos c_p :

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p}. \quad (2.18)$$

Kinematinės klampos koeficientas apskaičiuojamas:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}, \quad (2.19)$$

čia μ – dinaminės klampos koeficientas, $\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$; ρ – medžiagos tankis, kg/m^3 . Šiame tyrime laikoma, kad dinaminės klampos koeficientas yra pastovus ir nepriklauso nuo FVM temperatūros.

FVM tankis proceso metu kinta ir jis nustatomas atsižvelgiant į žinomą medžiagos tankį tam tikroje temperatūroje (Kandasamy et al., 2008; Xie et al., 2019):

$$\rho = \frac{\rho_{SF}}{\beta(T_{FVM} - T_{FVM, SF}) + 1}, \quad (2.20)$$

čia T_{FVM} – FVM temperatūra, kuriai esant apskaičiuojamas tankis ρ , K; $T_{FVM, SF}$ – skystosios fazės FVM temperatūra, kuriai esant yra žinomas (išmatuotas) tankis ρ_{SF} , K.

Nuselto (Nu) kriterijus visame Ra intervale nustatomas pagal (Churchill & Chu, 1975):

$$\text{Nu} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387\text{Ra}_L^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{\text{Pr}} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2. \quad (2.21)$$

Žinant Nuselto kriterijų apskaičiuojamas šilumos atidavimo koeficientas:

$$\alpha_L = \frac{\lambda}{L} \text{Nu} . \quad (2.22)$$

Reilio (Ra) kriterijui apskaičiuoti, kuomet būdingasis matmuo yra atstumas tarp dviejų šilumokaičio plokštelių, taikoma išraiška:

$$\text{Ra}_S = \frac{g\beta(T_{PAV} - T_{FVM})S^3}{\nu^2} \text{Pr} , \quad (2.23)$$

čia S – būdingasis šilumokaičio geometrijos matmuo (atstumas tarp dviejų šilumokaičio plokštelių), m. Šiuo atveju erdvė tarp dviejų plokštelių suformuoja kanalą, kuriame vyksta šilumos mainai. Atstumas tarp dviejų plokštelių lygus kanalo pločiui.

Kanale tarp dviejų vertikalių plokštelių vyksta natūrali konvekcija ir kai vertikalios plokštelės yra izoterminės ($T_{PAV} = \text{const.}$). Nuselto kriterijus apskaičiuojamas (Bar-Cohen & Rohsenow, 1984):

$$\text{Nu} = \left[\frac{576}{\left(\frac{\text{Ra}_S S}{L} \right)^2} + \frac{2,873}{\left(\frac{\text{Ra}_S S}{L} \right)^{0,5}} \right]^{-0,5} . \quad (2.24)$$

Tuomet šilumos atidavimo koeficientas nustatomas pagal kanalo plotį S :

$$\alpha_S = \frac{\lambda}{S} \text{Nu} . \quad (2.25)$$

Atkreiptinas dėmesys, kad tyrime taikoma supaprastinta skaičiavimo metodika, kai laikoma, jog šilumokaičio varinė plokštelė yra izoterminė ir jos efektyvumas lygus 1. Taip pat, skaičiuojant teorines šilumos atidavimo koeficiento reikšmes, nevertinama horizontalių vamzdelių (statmenų plokštelių) įtaka natūralios konvekcijos srovėms.

2.5. Šilumos kaupimo įrenginio eksperimentinių tyrimų metodika

Atsižvelgiant į išnagrinėtą mokslinę literatūrą, matyti, kad FVM eksperimentiniams tyrimams reikalinga sukaupti didelį kiekį duomenų ir tinkamai juos apdoroti, siekiant gauti patikimus rezultatus. Eksperimentiniai tyrimai dažniausiai apima realaus dydžio (taikomų praktikoje) šilumos kaupimo įrenginių bandy-

2.5 pav. FVM šilumos kaupimo įrenginio testavimo stendas: 1) proceso valdymo ir stebėsenos sistema; 2) karšto šilumnešio talpa / elektrinis šildytuvas; 3, 4) cirkuliaciniai siurbliai; 5) šalto šilumnešio talpa, 6) šalto šilumnešio aušintuvas; 7) šilumnešio masinio debito matuoklis; 8) FVM šilumos kaupimo įrenginys; 9) išsiplėtimo indas

Fig. 2.5. Experimental setup: 1) process control and monitoring system; 2) storage tank of hot HTF/electric heater; 3, 4) circulation pump; 5) storage tank of cold HTF; 6) cooler for cold HTF; 7) mass flow meter for HTF; 8) PCM thermal energy storage unit; 9) expansion vessels

2.6 pav. Valdymo ir stebėsenos sistemos langas

Fig. 2.6. Screenshot of the control and monitoring system

2.1 lentelė. Testavimo stendo komponentų techninės savybės**Table 2.1.** Technical features of the components of the experimental setup

Komponento Nr. (žr. 2.4 ir 2.5 pav.)	Pavadinimas	Techninės savybės
1	Proceso valdymo ir stebėsenos sistema	Proceso kontrolė atliekama naudojant programinį loginį valdiklį.
2	Karšto šilumnešio talpa su elektriniu šildytuvu	Talpos tūris 300 litrų. Elektrinio šildytuvo galia 6 kW.
3	Karšto kontūro cirkuliacinis siurblys Grundfos MAGNA3	Cirkuliacinis siurblys su integruotu valdikliu, leidžiančiu reguliuoti siurblio našumą pagal sistemos poreikius. Tyrimuose naudojamas masinis debitas nuo 0,05 kg/s iki 0,4 kg/s.
4	Šalto kontūro cirkuliacinis siurblys Wilo Stratos PICO	Cirkuliacinis siurblys su integruotu valdikliu, leidžiančiu reguliuoti siurblio našumą pagal sistemos poreikius. Tyrimuose naudojamas masinis debitas nuo 0,05 kg/s iki 0,36 kg/s.
5	Šalto šilumnešio talpa	Talpos tūris 300 litrų. Talpoje integruoti du šilumokaičiai, kurių plotas 0,94 m ² ir 0,76 m ² .
6	Šalto šilumnešio aušintuvas	Šaldymo galia 9,7 kW.
7	Masės srauto matuoklis OPTIMASS	Koriolio jėgos principu veikiantis masinio debito matuoklis, tikslumas $\pm 0,15$ %, maksimalus debitas 1,81 kg/s.
8	FVM šilumos kaupimo įrenginys	Nerūdijančiojo plieno korpusas (talpa) su integruotu variniu šilumokaičiu. Talpa pripildyta FVM RT82.
9	Išsiplėtimo indas	1 vnt. – tūris 50 litrų, 2 vnt. – tūris 25 litrai. Kompensuoja visos sistemos tūrio plėtimąsi dėl temperatūros svyravimo.
T	Temperatūros jutikliai	Temperatūros jutikliai PT100, tikslumas $\pm(0,3 + 0,005 \cdot t)$ °C (B klasė), 3-jų laidų (15 vnt.).
P	Slėgio jutikliai	Slėgio jutikliai skysčiams ir dujoms, matavimo ribos 0–600 kPa, tikslumas $\pm 0,5$ % (3 vnt.).

2.5.2. Tiriamasis šilumos kaupimo įrenginys

Tyrimų objektas – FVM šilumos kaupimo įrenginys su variniu šilumokaičiu. Šį įrenginį sudaro nerūdijančiojo plieno talpa, kurioje įmontuotas varinis šilumokaitis. Talpa pripildyta organinės fazinio virsmo medžiagos RT82. Tyrimai atliekami su dviem skirtingomis šilumokaičių versijomis: FVM1 (2.7 pav.) ir FVM2 (2.8 pav.).

a)

b)

2.7 pav. FVM1 šilumos kaupimo įrenginys: a) šilumokaitis; b) paruoštas testuoti
Fig. 2.7. PCM1 thermal energy storage unit: a) heat exchanger; b) ready for testing

a)

b)

2.8 pav. FVM2 šilumos kaupimo įrenginys: a) šilumokaitis; b) paruoštas testuoti
Fig. 2.8. PCM2 thermal energy storage unit: a) heat exchanger; b) ready for testing

Pagrindiniai šilumokaičių konfigūracijos skirtumai yra šilumos mainų paviršiaus plotą didinančių šilumai laidžių varinių plokštelių skaičius ir jų storis. FVM1 atveju naudojamos 1,5 mm storio varinės plokštelės (35 vnt.), FVM2 atveju – 0,15 mm (79 vnt.). Taip pat skiriasi varinių šilumokaičių išoriniai matmenys ir šilumokaičių gamybos būdas. FVM1 atveju varinės plokštelės lituojamos prie varinių vamzdelių, FVM2 atveju – variniai vamzdeliai išplečiami iš vidaus, taip suformuojant kontaktą su varinėmis plokštelėmis. Tiriamųjų FVM šilumos kaupimo įrenginių techniniai parametrai pateikti 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. Tiriamojo FVM šilumos kaupimo įrenginio parametrai
Table 2.2. Parameters of analysed PCM thermal energy storage unit

Parametras	Šilumos kaupimo įrenginys	
	FVM1	FVM2
Varinių plokštelių skaičius, vnt.	35	79
Atstumas tarp plokštelių, mm	10	5
Varinės plokštelės storis, mm	1,5	0,15
Vamzdelio išorinis skersmuo ($\varnothing$), mm	15	12,7
Vamzdelio storis, mm	1,5	0,5
Varinio šilumokaičio masė, kg	6,9	2,1
Šilumokaičio (šilumos mainų) paviršiaus plotas, m ²	1,0	1,75
FVM svoris, kg	4,34	
FVM tūris (skystoji / kietoji fazė), l	4,93/5,64	

FVM šilumos kaupimo įrenginys izoliuotas akmens vatos šilumos izoliacija, o įrenginio viduje (uždaroje sistemoje) vykstančių fazės virsmo procesų vizualinei apžiūrai įrengtas skaidrus (polikarbonato) akli dangtis. FVM įrenginio nerūdijančiojo plieno talpa be šilumos izoliacijos pavaizduota 2.9 paveiksle.

2.9 pav. FVM šilumos kaupimo įrenginio talpa be šilumos izoliacijos
Fig. 2.9. Storage tank of a PCM unit without thermal insulation

Siekiant nustatyti FVM temperatūros pasiskirstymą FVM šilumos kaupimo įrenginyje yra sumontuota 10 temperatūros jutiklių: T_{FVM1} – T_{FVM10} (žr. 2.10 pav.). Jutikliai išdėstyti taip, kad būtų galima stebėti FVM temperatūrą skirtingose FVM įrenginio srityse per visą jo ilgį ir aukštį. Temperatūros jutikliai T_{FVM1} , $FVM4$, $FVM6$, $FVM9$, T_{FVM2} , $FVM5$, $FVM7$, $FVM10$ ir T_{FVM3} , $FVM9$ įgilinti nuo FVM įrenginio talpos sienelės atitinkamai 14, 24 ir 30 mm. Šios pozicijos pasirinktos, siekiant stebėti temperatūrą skirtingais atstumais nuo šilumokaičio vamzdelių nutolusiuose taškuose. Šilumnešio temperatūrai matuoti naudojami 4 temperatūros jutikliai: $T_{KV,T}$ – tiekiamo karšto šilumnešio temperatūros jutiklis, $T_{KV,G}$ – grįžtamo karšto šilumnešio temperatūros jutiklis, $T_{ŠV,T}$ – tiekiamo šalto šilumnešio temperatūros jutiklis, $T_{ŠV,G}$ – grįžtamo šalto šilumnešio temperatūros jutiklis. Šilumokaičio paviršiaus (varinės plokštelės) temperatūrai matuoti įrengtas vienas jutiklis T_{PAV} . FVM šilumos kaupimo įrenginyje taip pat integruotas slėgio jutiklis oro slėgio matavimams.

2.10 pav. Temperatūros jutiklių pozicijos (matmenys mm), viršuje – vaizdas iš priekio, apačioje – vaizdas iš viršaus

Fig. 2.10. Positions of the temperature measuring points (dimensions in mm), above – front view, below – top view

Temperatūros matavimo taškų pozicijos FVM įrenginio 3D modelyje pa-vaizduotos 2.11 paveiksle. Temperatūros matavimo taškų pozicijos xy plokštumoje (FVM įrenginio skerspjūvyje) ir šilumokaičio plokštelės geometrija pa-vaizduotos 2.12 paveiksle. Atkreiptinas dėmesys, kad visų temperatūros

matavimo taškų pozicijos vaizduojamos vienoje plokštumoje, nors šilumokaityje tokių plokštumų yra penkios (žr. 2.11 pav.).

2.11 pav. FVM1 šilumos kaupimo įrenginio 3D modelis su temperatūros jutiklių pozicijomis

Fig. 2.11. 3D model of PCM1 heat storage unit with temperature sensor positions

2.12 pav. Šilumokaicio plokštelės geometrija (FVM įrenginio skerspjūvis) ir temperatūros matavimo taškų pozicijos

Fig 2.12. Geometry of the heat exchanger fin (PCM unit cross-section) and positions of the temperature measuring points

Tyrimė naudojama organinė fazinio virsmo medžiaga RT82 (parafinas), kurios cheminių medžiagų santrumpų tarnybos registracijos numeris (CAS numeris) yra 8002-74-2. Ši medžiaga pasirinkta, atsižvelgiant į tiriamojo objekto projektinius reikalavimus. Pagrindiniai kriterijai yra FVM lydymosi temperatūra ir didžiausia leidžiamoji temperatūra. Iš projektinių sąlygų matyti (2.2 pav.), kad didžiausia šilumos šaltinio temperatūra yra 100 °C, didžiausia FVM RT82 veikimo temperatūra taip pat yra 100 °C (Rubitherm, 2016). Kitas parinkimo kriterijus yra suderinamumas su FVM įrenginio (šilumokaičio ir korpuso) medžiagomis. FVM RT82 pasižymi suderinamumu su daugeliu medžiagų, tarp jų ir tiriamajame įrenginyje naudojamu variu ir nerūdijančiuoju plienu. Pažymėtina, kad organinės FVM neigiamai veikia tam tikrų polimerų mechanines savybes (Chalkia et al., 2018; Lázaro et al., 2006). Kaip ir daugeliui organinių FVM, RT82 būdingas mažas šilumos laidumo koeficientas. Sarwar ir Mansoor (Sarwar & Mansoor, 2016) atliktas FVM RT82 termofizikinių savybių charakterizavimo tyrimas parodė, kad ši medžiaga yra chemiškai stabili ir po 300 lydymosi / kietėjimo ciklų vyksta atsikartojantis fazės virsmas tokia pačia temperatūros ir fazinio virsmo šilumos intervale. Fazinio virsmo medžiagos termofizikinės savybės pateiktos 2.3 lentelėje.

2.3 lentelė. FVM RT82 termofizikinės savybės (Rubitherm, 2016)

Table 2.3. Thermophysical properties of PCM RT82 (Rubitherm, 2016)

Termofizikinė savybė	Reikšmė
Lydymosi temperatūros intervalas, °C	77–82
Kietėjimo temperatūros intervalas, °C	82–77
Šiluminė talpa ($\pm 7,5$ %), kJ/kg	170
Savitoji šiluma, kJ/kgK	2
Tankis esant 15 °C, kg/l	0,88
Tankis esant 90 °C, kg/l	0,77
Šilumos laidumas (skystosios ir kietosios fazių), W/mK	0,2
Terminis tūrinio plėtimosi koeficientas, K ⁻¹ (Mat et al., 2013; J. M. Mahdi et al., 2019)	0,001
Dinaminė klampa, kg/m·s (Mat et al., 2013; J. M. Mahdi et al., 2019)	0,03499
Tūrinis plėtimasis, %	12,5

FVM šilumos kaupimo įrenginio veikimo charakteristikos, imituojant skirtingus veikimo režimus, tiriamos testavimo stende. Eksperimentinių tyrimų eiga pavaizduota 2.13 paveiksle.

2.13 pav. Bendra eksperimentinių tyrimų eigos schema

Fig. 2.13. General scheme of experimental research

Eksperimentinių tyrimų eiga ir rezultatų neapibrėžtis plačiau aptariama tolesniuose poskyriuose.

2.5.3. Šilumos atidavimo koeficiento tyrimas

Siekiant detalai išnagrinėti natūralios konvekcijos įtaką šilumos mainams FVM šilumos kaupimo įrenginyje ir nustatyti šilumos atidavimo koeficiento eksperimentines vertes, atliekamas eksperimentinis bandymas. Pagrindinis šio tyrimo tikslas yra remiantis eksperimento rezultatais pateikti skaičiavimo metodiką, leidžiančią kuo tiksliau nustatyti vietinį ir vidutinį šilumos atidavimo koeficien-

tą. Kartu siekiama įvertinti, kaip tam tikrų FVM savybių verčių pasirinkimas pradiniuose skaičiavimuose daro įtaką šilumos atidavimo koeficientui FVM lydimosi metu. Gauti rezultatai leidžia greičiau ir efektyviau, netaikant daug laiko ir resursų užimančių skaičiavimo ar modeliavimo metodų, įvertinti natūralios konvekcijos įtaką šilumos mainams panašaus tipo ir geometrijos FVM įrenginiuose.

Eksperimentai buvo atliekami testavimo stende (2.5 pav.). Testuojamas FVM1 šilumos kaupimo įrenginys, atliekant FVM įkrovimo (lydimosi) procesą. Eksperimento pradžioje, FVM esant kietojoje fazėje (temperatūra 24 °C), atidaromi karšto šilumnešio įleidimo / išleidimo vožtuvai V2 ir V3 (žr. 2.4 pav.) ir per varinį šilumokaitį cirkuliuoja karštas šilumnešis. Vyksta šilumos mainai su FVM, kyla FVM temperatūra, vyksta lydymasis. Šio eksperimento metu karšto šilumnešio masinis debitas yra 0,4 kg/s, įeinančio šilumnešio temperatūra $T_{KV, T}$ yra 94 ± 1 °C. Užbaigus įkrovimo (lydimosi) procesą, FVM įrenginys aušinamas iki nustatytos temperatūros, naudojant šaltą šilumnešį iš talpos 5 (žr. 2.4 ir 2.5 pav.), siekiant užtikrinti vienodas pradines sąlygas, prieš pradėdant kitą lydimosi procesą. Aušinimo (iškrovimo) procesas šiame tyrime nenagrinėjamas.

2.5.4. Šilumokaičio geometrijos tyrimas

Šio tyrimo tikslas – eksperimentiškai palyginti ir įvertinti dviejų skirtingos konstrukcijos (konfigūracijos) varinių šilumokaičių veikimą (darbą) FVM šilumos kaupimo įrenginyje. Eksperimentai atliekami su šilumos kaupimo įrenginiais FVM1 ir FVM2.

Eksperimento pradžioje, FVM esant kietojoje fazėje (temperatūra 25 °C), atidaromi karšto šilumnešio įleidimo / išleidimo vožtuvai V2 ir V3 (žr. 2.4 pav.) ir per varinį šilumokaitį cirkuliuoja karštas šilumnešis, kurio temperatūra yra 95 ± 1 °C ir masinis debitas 0,4 kg/s. Vyksta šilumos mainai su FVM (lydymasis). Šalto šilumnešio įleidimo / išleidimo vožtuvai V4 ir V5 (žr. 2.4 pav.) uždaryti. Įvykus fazės virsmui ir esant FVM skystajai fazei, t. y. visuose temperatūros matavimo taškuose temperatūrai esant didesnei negu 80 °C, karšto šilumnešio vožtuvai uždaryti ir atidaromi šalto šilumnešio vožtuvai. Per varinį šilumokaitį cirkuliuoja šaltas šilumnešis ir vyksta FVM kietėjimas. Tiekiamo šalto šilumnešio $T_{SV, T}$ temperatūra 25 °C, masinis debitas 0,36 kg/s. FVM iškrovimo procesas trunka tol, kol FVM temperatūra tampa artima šilumnešio temperatūrai.

2.5.5. Šilumnešio masinio debito tyrimas

Šio tyrimo tikslas – eksperimentiškai palyginti karšto ir šalto šilumnešių masinio debito įtaką FVM įkrovimo ir iškrovimo procesui. Šio eksperimento metu kei-

čiamas šilumnešių masinis debitas ir jo vertės yra: didžiausias – 0,25 kg/s, vidutinis – 0,125 kg/s ir mažiausias – 0,05 kg/s. Eksperimentas atliekamas su šilumos kaupimo įrenginio versija FVM2.

Prie testavimo stendo (2.5 pav.) šilumnešio paskirstymo kolektorių prijungiamas FVM šilumos kaupimo įrenginys su variniu šilumokaičiu, per kurį cirkuliuoja karštas ir šaltas šilumnešis (vanduo). Eksperimento pradžioje, FVM esant kietojoje fazėje (temperatūra 30 °C), atidaromi karšto šilumnešio įleidimo / išleidimo vožtuvai ir per varinį šilumokaitį cirkuliuoja karštas šilumnešis, kurio temperatūra yra 95 ± 2 °C. Vyksta šilumos mainai su FVM (lydymasis). Šalto šilumnešio įleidimo / išleidimo vožtuvai uždaryti. Įvykus fazės virsmui ir esant FVM skystajai fazei, t. y. vidutinei FVM temperatūrai esant didesnei už 82 °C, karšto šilumnešio tiekimas sustabdomas (uždaromi vožtuvai) ir pradedamas tiekti šaltas šilumnešis (atidaromi šalto šilumnešio vožtuvai). Šaltas šilumnešis cirkuliuoja per varinį šilumokaitį ir vyksta FVM iškrovimas (kietėjimas). Procesas trunka tol, kol FVM temperatūra tampa artima tiekiamo šalto šilumnešio temperatūrai, kuri lygi 30 ± 2 °C.

2.5.6. Fazinio virsmo medžiagos tankio pokyčio tyrimas

Siekiant įvertinti, kaip FVM tankio pokytis, dėl kurio kinta medžiagos tūris ir oro slėgis uždaroje talpoje, veikia FVM įkrovimo ir iškrovimo procesą, atliekamas eksperimentinis bandymas. Eksperimentas atliekamas su šilumos kaupimo įrenginiu FVM2. Tyrimas vyksta, esant skirtingiems FVM šilumos kaupimo įrenginio veikimo režimams. Vienu atveju įrenginio talpa yra atvira, todėl, vykstant fazės virsmui ir kintant tankiui, FVM laisvai plečiasi. Šiuo atveju talpoje yra atmosferinis slėgis ir jis nekinta. Antruoju atveju įrenginio talpa yra uždara ir, vykstant fazės virsmui, dėl kintančio tankio vyksta talpos laisvame tūryje esančio oro slėgimas. Taigi, eksperimento metu FVM įrenginio charakteristikos matuojamos, esant atviram ir uždaram veikimo režimui.

Eksperimento pradžioje, FVM esant kietojoje fazėje (temperatūra 30 °C), atidaromi karšto šilumnešio įleidimo / išleidimo vožtuvai ir per varinį šilumokaitį cirkuliuoja karštas šilumnešis, kurio masinis debitas yra 0,2 kg/s. Vyksta šilumos mainai su FVM (lydymasis). Šalto šilumnešio įleidimo / išleidimo vožtuvai uždaryti. Įvykus fazės virsmui ir esant FVM skystajai fazei, karšto šilumnešio tiekimas sustabdomas ir pradedamas tiekti šaltas šilumnešis. Iškrovimo procesas trunka tol, kol FVM temperatūra tampa artima tiekiamo šalto šilumnešio temperatūrai, kuri lygi 23 ± 2 °C. FVM įrenginio talpoje esančio oro slėgis (manometrinis) kontroliuojamas slėgio reguliavimo vožtuvu V7 ir matuojamas slėgio jutikliu P (žr. 2.4 pav.). Testuojamo FVM2 įrenginio bendras vaizdas pateiktas 2.14 paveiksle.

2.14 pav. FVM2 šilumos kaupimo įrenginys paruoštas testuoti
Fig. 2.14. PCM2 heat storage unit ready for the experiment

FVM įrenginio talpa pripildyta fazinio virsmo medžiagos iki 75 % jos tūrio (esant kietajai fazei). Laisvas tūris skirtas FVM plėtimuisi kompensuoti lydantis. Vykstant fazės virsmui iš kietosios į skystąją, kinta FVM tankis ir sukelia medžiagos tūrinį plėtimąsi. Dėl šio tūrio pasikeitimo talpoje kyla skystosios fazės lygis, o, vykstant fazės virsmui iš skystosios į kietąją, vizualiai stebimas netolygus lygio mažėjimas ir tuštumų formavimasis FVM tūryje. Esant uždaram veikimo režimui ir lydantis FVM, oro slėgis veikia fazinio virsmo medžiagos laisvąjį paviršių. Atliekant eksperimentą, matuojamas oro slėgis uždaram inde (tūryje), FVM temperatūra, šilumnešio masinis debitas ir temperatūra. Apskaičiuojamas ir palyginamas FVM įrenginio šilumos srauto tankis bei fazės virsmo trukmė, esant uždaram ir atviram veikimo režimams.

2.5.7. Šilumos kaupimo įrenginio įkrovimo ir iškrovimo trukmės prognozavimas

Šio tyrimo tikslas yra, remiantis eksperimentiniais duomenimis, atlikti regresinę analizę ir rasti FVM įkrovimo / iškrovimo proceso trukmę aprašančią lygtį. Remiantis gauta lygtimi ir pasirinkus kintamųjų (šilumnešio masinis debitas ir temperatūra) reikšmes, galima prognozuoti atsaką, t. y. proceso trukmę. Siekiant nustatyti gauto modelio patikimumą, pasiūlytas metodas FVM sukauptam ir atiduotam šilumos kiekiui apskaičiuoti, remiantis dalinės entalpijos pasiskirstymu ir FVM vidutine temperatūra. Eksperimento rezultatai lyginami su FVM gamintojo deklaruojamu šilumos kiekiu.

Šis tyrimas atliekamas, naudojant skirtingus tiekiamo šilumnešio masinius debitus ir temperatūrą. Pagal tai sudaromi skirtingi veikimo režimai (3.2 lentelė), kurių bendras skaičius yra 16, t. y. 8 veikimo režimai FVM įkrovimo atveju ir 8 veikimo režimai FVM iškrovimo atveju. Tyrimas atliekamas su šilumos kaupimo įrenginio versija FVM2. Tyrimui pasirinkti masiniai debitai iš prieš tai atlik-

tų eksperimentų yra 0,125 kg/s, 0,2 kg/s ir 0,25 kg/s. Papildomai atliekamas eksperimentas, pasirinkus masinį debitą 0,1 kg/s. FVM įkrovimo ir iškrovimo eksperimentų eiga pateikta prieš tai aprašytuose tyrimuose.

2.5.8. Eksperimentinių tyrimų neapibrėžtis

Atliekant eksperimentinius tyrimus, siekiama išlaikyti vienodas sąlygas, todėl eksperimentai kartojami kelis kartus. Matavimų rezultatų vidurkis pateikiamas su standartiniu nuokrypiu. Matuojamų parametrų verčių nuskaitymo ir įrašymo dažnis yra 1 Hz. Koriolio jėgos principu veikiančio masės srauto matuoklio tikslumas yra $\pm 0,15\%$ išmatuotos vertės. Slėgio jutiklių tikslumas yra $\pm 0,5\%$ skalės vertės, manometrinio slėgio matavimo ribos nuo 0 iki 600 kPa. Temperatūrai matuoti naudojami varžos temperatūros jutikliai (PT100), B klasė, tikslumas $\pm(0,3 + 0,005 \cdot t)$ °C. Taigi, temperatūros jutiklių paklaidos priklauso nuo matuojamos temperatūros. Temperatūrai esant 20 °C, galima paklaida yra $\pm 0,40$ °C, temperatūrai esant 95 °C, galima paklaida yra $\pm 0,78$ °C.

Temperatūros jutikliai yra įtvirtinti į šilumokačio talpos korpusą, todėl FVM lydymosi ir kietėjimo metu vykstančios deformacijos nedaro įtakos jutiklio padėčiai. Temperatūros jutikliai į korpusą įmontuoti naudojant užveržiamas nerūdijančio plieno jungtis su mažo šilumos laidumo sandarinimo įvare iš politetrafluoroetileno, todėl užtikrinimas minimalus šilumos perdavimas tarp jutiklio nerūdijančio plieno gilzės ir šilumokačio talpos korpuso. FVM šilumos kaupimo įrenginio nerūdijančio plieno talpa (korpusas) izoliuota 60 mm storio akmens vatos ir 5 mm storio uždary porų sintetinio kaučiuko šilumos izoliacija. Šiuo atveju šilumos nuostolių galia priklauso nuo vidutinės FVM temperatūros ir kinta ribose nuo 12 W ($T_{FVM, VID} - 50$ °C) iki 33 W ($T_{FVM, VID} - 90$ °C). Atsižvelgiant į vidutinį šilumokačio šilumos srautą per visą įkrovimo procesą (apie 2000 W), šilumos nuostoliai sudaro nuo 0,6 % iki 1,7 %. Todėl laikoma, kad vidutinė šilumos nuostolių galia yra maža ir neturi reikšmingos įtakos tyrimų rezultatams.

2.6. Antrojo skyriaus išvados

1. Sudaryta FVM šilumos kaupimo įrenginio veikimo charakteristikų tyrimų metodika. Kompleksiniam šilumos mainų proceso parametrų vertinimui ir lyginamajai analizei pasiūlyta taikyti analitinius skaičiavimus, šilumos mainų proceso skaitinį modeliavimą ir eksperimentinius tyrimus.

2. Remiantis tyrime nagrinėjamu pramonės technologiniu procesu suformuoti kuriamo FVM pagrindu veikiančio šilumos kaupimo įrenginio projektiniai reikalavimai. Nustatyta, kad vienas iš pagrindinių kriterijų, siekiant užtikrinti

projektines sąlygas, yra greitas FVM įkrovimo ir iškrovimo procesas. Todėl, remiantis literatūros analize, tikslinga pasirinkti šilumokaičio tipo šilumos kaupimo įrenginio koncepciją.

3. Atsižvelgiant į šilumos mainų proceso neapibrėžtumus vykstant fazės virsmui, pradinės FVM įrenginio geometrijos skaitiniam modeliavimui pasirinktas ir aprašytas tariamosios savitosios šilumos metodas. Šio metodo taikymas leidžia atlikti FVM šilumos kaupimo įrenginio įkrovimo ir iškrovimo proceso modeliavimą be sudėtingo ir daug resursų reikalaujančio FVM skirtingų fazių sandūros sluoksnių padėties nustatymo (sekimo).

4. Parengta eksperimentinių tyrimų bazė (testavimo stendas ir tyrimo objektas – FVM šilumos kaupimo įrenginys) ir sudarytas eksperimentinių tyrimų planas, kurių tikslas – ištirti FVM šilumos kaupimo įrenginio veikimo charakteristikas imituojant skirtingus veikimo režimus. Eksperimentinių tyrimų rezultatai leidžia atlikti lyginamąją analizę ir įvertinti skirtingų parametrų įtaką šilumos mainų procesui FVM įrenginyje.

Fazinio virsmo medžiagos pagrindu veikiančio šilumos kaupimo įrenginio charakteristikų tyrimų rezultatai

Šiame skyriuje pateikiami skaitinio modeliavimo, analitinių išraiškų taikymo, apskaičiuojant šilumos atidavimo koeficientą, ir eksperimentinių tyrimų rezultatai.

Skyriaus tematika paskelbtos šešios publikacijos (Pakalka et al., 2021; Pakalka et al., 2021; Pakalka et al., 2020; Pakalka et al., 2020; Pakalka et al., 2019; Pakalka et al., 2018).

3.1. Skaitinis modeliavimas

Remiantis fazinio virsmo medžiagų panaudojimo šilumai kaupti tyrimų analize, pasirinkta didesnio šilumos mainų paviršiaus ploto šilumokaičio koncepcija – vamzdinis plokštelinis šilumokaitis. Šio tipo šilumokaičių naudojimas su FVM leidžia pasiekti didžiausią efektyvumą, o vertikali plokštelių padėtis užtikrina didžiausią natūralios konvekcijos poveikį. Atsižvelgiant į projektinius reikalavimus, parengta pradinė šilumokaičio geometrija (žr. 3.1 pav.) ir sudarytas jos skaitinis modelis.

Šiame tyrime modeliuojamas nestacionarus šilumos mainų procesas, kurio metu šilumnešis (vanduo), tekantis variniais šilumokaičio vamzdeliais, perduoda šilumą į FVM, t. y. vyksta FVM įkrovimo procesas. Siekiant supaprastinti šilumos perdavimo proceso modeliavimą, laikoma, kad šilumnešis įkaitina varinį šilumokaitį iki tam tikros pastovios temperatūros ir šilumos mainai vyksta laidumu tarp varinio šilumokaičio ir FVM. Natūralios konvekcijos ir tankio pokyčio (tūrinio plėtimosi) įtaka šilumos perdavimui šiame modelyje nevertinama. Siekiant sutrumpinti analizės laiką ir laikant, kad šilumokaičio paviršius yra izoterminis ($T_{PAV} = \text{const.}$), tyrime nagrinėjamas FVM šilumos kaupimo įrenginio fragmentas, apimantis šilumokaičio dalį su varinėmis plokštelėmis ir be jų (žr. 3.1 pav.). Tokiu atveju, atliekant tyrimą ir aprašant rezultatus, galima palyginti FVM temperatūros ir fazės pokyčius tiek srityje su dideliu šilumos mainų paviršiaus plotu (tarp plokštelių ir vamzdelių), tiek srityje su mažu šilumos mainų paviršiaus plotu (tik tarp vamzdelių).

3.1 pav. Modeliuojamas FVM šilumos kaupimo įrenginio fragmentas
Fig. 3.1. Model of the fragment of simulated PCM heat storage unit

Modeliuojamo fragmento geometrija ir medžiagų savybės aprašomos atskiriant skirtingas sritis, tarp kurių vyksta šilumos mainai. Šiuo atveju šilumokaičio šilumos mainų paviršiaus plotas susideda iš horizontalių varinių vamzdelių ir vertikalių varinių plokštelių (3.2 pav., a) paviršiaus ploto. Talpos (fragmento) tūris pripildytas FVM (3.2 pav., b).

3.2 pav. FVM šilumos kaupimo įrenginio sritys
Fig. 3.2. Domains of a PCM heat storage unit

Modeliuojant šilumos mainus fazinio virsmo medžiagoje, jos savybės turi būti aprašomos atskirai skystajai ir kietajai agregatinei būsenai. Pagrindinės tyrimo objekto medžiagų termofizikinės savybės ir kraštinės sąlygos, naudojamos sudarant skaičiuojamąjį modelį, pateiktos 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Skaičiuojamojo modelio medžiagų termofizikinės savybės ir kraštinės sąlygos

Table 3.1. Thermophysical properties of the materials and boundary conditions of numerical model

Parametras	Reikšmė	Parametras	Reikšmė
Šilumokaičio temperatūra	373,15 K	FVM šilumos laidumas (kietoji fazė)	0,3 W/(mK)
FVM tankis (kietoji fazė)	880 kg/m ³	FVM šilumos laidumas (skystoji fazė)	0,17 W/(mK)
FVM lydymosi temperatūra	353,15 K	FVM savitoji šiluma (kietoji fazė)	1800 J/(kgK)
FVM tankis (skystoji fazė)	770 kg/m ³	FVM savitoji šiluma (skystoji fazė)	2355 J/(kgK)
FVM pradinė temperatūra	298,15 K	Vario savitoji šiluma	385 J/(kgK)
Fazinio virsmo šiluma	170 kJ/kg	Vario tankis	8700 kg/m ³
Fazės virsmo intervalas	10 K	Vario šilumos laidumas	400 W/(mK)

Atsižvelgiant į mažą FVM šilumos laidumo koeficientą ir efektyvią FVM įrenginio šilumos izoliaciją, laikoma, kad nagrinėjamo fragmento išorinės sritys (sienelės) yra adiabinės.

Aprašius šilumos mainų procesą ir kraštines sąlygas, formuojamas baigtinių elementų tinklas. Analizei taikomo baigtinių elementų tinklo parametrai: minimalus elemento dydis – 2,59 mm; maksimalus elemento dydis – 14,4 mm; tetraedrų skaičius – 60 079; trikampių elementų skaičius – 21 953; briaunų skaičius – 3386; viršūnių skaičius – 328. Sudarytas baigtinių elementų tinklas FVM įrenginio fragmento analizei pavaizduotas 3.3 pav., a. Taip pat šiame paveiksle pavaizduoti du taškai išsamesnei FVM temperatūros kitimo ir fazės virsmo analizei: AT1 taškas – tarp šilumokačio plokštelių ir AT2 – kraštiniame FVM sluoksnyje (3.3 pav., c). Gauti rezultatai taip pat analizuojami tam tikrais laiko intervalais FVM šilumos kaupimo įrenginio yz plokštumoje (pjūvyje) (3.3 pav., b), siekiant išsamiau ištirti FVM temperatūros ir skystosios fazės pasiskirstymą tarp šilumokačio plokštelių bei įvertinti fazės virsmo procesą. Procesui modeliuoti naudotas laiko žingsnis – 1 s.

3.3 pav. Baigtinių elementų tinklas (a), analizuojama plokštuma (b) ir taškai (c)

Fig. 3.3. Meshing of the geometry (a), cut plane (b) and cut points (c) for analysis

Temperatūros ir skystosios FVM fazės tūrio dalies kitimas, vykstant nagrinėjamam šilumos mainų procesui, tarp šilumokačio plokštelių (AT1) ir kraštiniame FVM sluoksnyje (AT2) pateiktas 3.4 paveiksle.

3.4 pav. Temperatūros (T) ir skystosios FVM fazės tūrio dalies (f) kitimas skirtinguose šilumos kaupimo įrenginio taškuose

Fig. 3.4. Temperature (T) and liquid phase fraction (f) evolution in different points of a thermal energy storage unit

Iš grafiko (3.4 pav.) matyti, kad AT1 taške temperatūra kyla žymiai greičiau, lyginant su AT2 tašku. Taip yra todėl, kad tarp šilumokaičio plokštelių esantis AT1 taškas yra arčiau šilumos mainų paviršiaus, todėl jau po 47 s šiame taške pasiekama fazės virsmo intervalo pradžios temperatūra 75 °C, o po 130 s FVM temperatūra pasiekia fazės virsmo intervalo pabaigos temperatūrą 85 °C. Taigi, šiame intervale įvyksta fazės virsmas iš kietosios į skystąją, o toliau skystosios fazės FVM temperatūra kyla ir po 300 s nuo proceso pradžios tampa artima šilumokaičio temperatūrai (100 °C). Pagal skystosios fazės tūrio dalies kitimo kreivę AT1 (f) taip pat matyti, kad medžiagos fazės virsmas visiškai įvyksta po 130 s nuo proceso pradžios, t. y. sukaupiama 100 % fazinio virsmo šilumos (skystosios FVM fazės tūrio dalis yra 1,0). Analizuojamas taškas AT2 yra kraštiniame FVM sluoksnyje, nutolusiame nuo šilumokaičio, todėl temperatūra šiame taške kinta žymiai lėčiau (žr. 3.4 pav.). Fazės virsmo intervalo pradžios temperatūra 75 °C pasiekama per 344 s nuo proceso pradžios. Toliau vyksta fazės virsmas iš kietosios į skystąją ir proceso pabaigoje (po 1000 s) FVM temperatūra yra 81 °C. Šiuo atveju fazės virsmo intervalo pabaigos temperatūra 85 °C nepasiekama. Tai reiškia, kad išoriniuose FVM sluoksniuose fazės virsmas neviseškai įvyksta. Pagal skystosios fazės tūrio dalies kitimo kreivę AT2 (f) matyti, kad

proceso pabaigoje skystosios FVM fazės tūrio dalis yra 0,7. Tai rodo, kad per visą proceso trukmę sukaupiama apie 70 % fazinio virsmo šilumos.

Skystosios FVM fazės tūrio dalies kitimas nagrinėjamoje plokštumoje po 200, 500 ir 1000 sekundžių pavaizduotas 3.5 paveiksle.

3.5 pav. Skystosios fazės FVM tūrio dalis po 200 s, 500 s ir 1000 s

Fig. 3.5. Liquid phase fraction of PCM after 200 s, 500 s and 1000 s

Iš 3.5 pav. matyti, kad tarp šilumokaičio plokštelių esanti FVM jau proceso pradžioje (po 200 s) yra skystojo būvio. Proceso pabaigoje išsilydžiusios FVM kiekis didėja ir tik nuo šilumokaičio toliau esančiuose išoriniuose FVM sluoksniuose yra kietoji fazė. Atkreiptinas dėmesys, kad FVM įkrovimo procesas pradedamas modeliuoti nuo pradinės temperatūros 25 °C. Tai reiškia, kad procesui vykstant siauresniame temperatūros intervale (artimame fazės virsmo intervalui), proceso trukmė būtų mažesnė. Kitaip tariant, per tyrime analizuojamą proceso trukmę FVM visiškai išsilydytų.

Lyginant fazės virsmo procesą skirtinguose šilumos kaupimo įrenginio taškuose, nustatyta, kad mažo šilumos mainų paviršiaus ploto srityje (tarp šilumokaičio vamzdelių) pasiekama fazės virsmo intervalo temperatūra. Todėl tikslinga atlikti temperatūros pasiskirstymo plokštumoje analizę.

FVM temperatūros pasiskirstymas nagrinėjamoje plokštumoje po 200, 500 ir 1000 sekundžių pavaizduotas 3.6 paveiksle.

3.6 pav. Temperatūros pasiskirstymas po 200 s, 500 s ir 1000 s

Fig. 3.6. Temperature distribution after 200 s, 500 s and 1000 s

Iš 3.6 pav. matyti, kad proceso pradžia pasižymi dideliu temperatūros skirtumu tarp vidinių ir išorinių FVM sluoksnių. Proceso pabaigoje (po 1000 s) stebima aukštesnė ir tolygesnė temperatūra visame plote. Pažymėtina, kad tiek proceso pradžioje (po 200 s), tiek proceso pabaigoje (po 1000 s) FVM temperatūra tarp šilumokaičio plokštelių tampa lygi arba yra artima šilumos šaltinio (šilumokaičio) temperatūrai, tačiau proceso pradžioje stebimas žymus temperatūros skirtumas nuo šilumokaičio nutolusiuose kraštinuose sluoksniuose. Tai reiškia, kad didžiojoje dalyje tūrio jau ir proceso pradžioje FVM temperatūra yra aukštesnė už jos lydymosi temperatūrą, bet dėl mažo šilumos laidumo koeficiento šilumos perdavimas į kraštinius sluoksnius vyksta lėtai. Atkreiptinas dėmesys, kad proceso pabaigoje (po 1000 s) kraštinuose sluoksniuose FVM įkaista iki fazės virsmo intervalo pradžios temperatūros (75 °C). Tai reiškia, kad kraštinuose sluoksniuose taip pat prasideda FVM lydymasis. Pažymėtina, kad FVM įrenginiui veikiant fazės virsmo temperatūrų intervale, t. y. procesą pradedant nuo 75 °C, bendra proceso trukmė būtų mažesnė ir tenkintų projektuojamam įrenginiui keliamus reikalavimus (vieno įkrovimo ciklo trukmė 540 s).

Atlikus FVM pagrindu veikiančio šilumos kaupimo įrenginio pradinės geometrijos modeliavimą, nustatyta, kad žemas FVM šilumos laidumo koeficientas turi neigiamą įtaką šilumos mainų intensyvumui. Iš rezultatų matyti, kad tarp plokštelių esanti FVM išsilydo jau proceso pradžioje ir pasiekia temperatūr-

ra, artimą šilumokaičio temperatūrai, o kraštiniuose sluoksniuose FVM yra kieta. Projektuojant tokius įrenginius svarbus kriterijus yra tolygus temperatūros pasiskirstymas tūryje. Tokiu atveju galima išvengti medžiagos perkaitimo ir maksimaliai panaudoti FVM šiluminę talpą. Todėl nagrinėjamu atveju tikslinga keisti šilumokaičio geometriją, padidinant atstumą tarp varinių plokštelių. Taip pat tikslinga padidinti varinių plokštelių storį, nes storesnės plokštelės užtikrina tolygią temperatūrą per visą plokštelės aukštį / plotį ir padidina šilumos srautą (Al-Abidi et al., 2013). Tačiau storesnės plokštelės užima didesnį tūrį, dėl to sumažėja FVM įrenginio šiluminė talpa (Khan, Khan & Tabeshf, 2016). Siekiant nustatyti optimalų plokštelių storį ir atstumą tarp jų, turi būti sprendžiamas optimizavimo uždavinys, keičiant kraštines šilumos mainų proceso sąlygas ir šilumokaičio geometriją. Pažymėtina, kad sudarant skaitinį modelį buvo nevertinama natūralios konvekcijos ir tankio pokyčio įtaka šilumos mainų procesui, o, siekiant optimizuoti geometriją, šie parametrai turi būti įvertinami.

Šiame tyrime skaitinis geometrijos optimizavimas neatliekamas, tačiau, atsižvelgiant į pradinės geometrijos modeliavimo rezultatus ir šilumokaičių gamybos technologines galimybes, pasirenkami du kraštutiniai geometrijos variantai (FVM1 ir FVM2), su kuriais toliau atliekami eksperimentiniai tyrimai testavimo stende. Šiuo atveju FVM2 versija atitinka atliekant skaitinį modeliavimą nagrinėtą geometriją. Atliekant eksperimentus, lyginamos abiejų geometrijų veikimo charakteristikos bei nustatomi empiriniai koeficientai, kurie gali būti naudojami skaitinio optimizavimo procese.

3.2. Šilumos atidavimo koeficientas

Šio tyrimo metu nustatomos natūralios konvekcijos šilumos atidavimo koeficiento eksperimentinės vertės ir palyginamos su teorinėmis, apskaičiuotomis taikant analitines išraiškas. Tyrimo metu gaunami rezultatai yra svarbūs šilumos perdavimo proceso gerinimui, nes parodo šilumokaičio sritis, kuriose pasireiškia didžiausias natūralios konvekcijos efektas, vykstant lydymosi procesui. Remiantis vietinio ir vidutinio šilumos atidavimo koeficiento analize, galima parinkti efektyvią šilumokaičio geometriją ir apskaičiuoti bendrą šilumos perdavimo koeficientą. Eksperimento metu nustatytos šilumos atidavimo koeficiento vertės bei jų apskaičiavimo analitinės išraiškos gali būti naudojamos, vystant skaitinius modelius, kuriuose įvertinami šilumos mainai dėl natūralios konvekcijos.

3.2.1. Šilumos atidavimo koeficiento eksperimentinis nustatymas

Atliekant eksperimentus, svarbu išlaikyti atsikartojančią ir stabilią šilumnešio temperatūrą visame FVM įkrovimo procese, nes temperatūros svyravimai turi didelę įtaką šilumos mainų procesui. Karšto šilumnešio tiekiamos ir grįžamos temperatūros standartinis nuokrypis FVM1 šilumos kaupimo įrenginio įkrovimo procese pavaizduotas 3.7 paveiksle.

3.7 pav. Šilumnešio temperatūros standartinis nuokrypis

Fig. 3.7. Standard deviation of HTF temperature

Iš 3.7 pav. matyti, kad didžiausias tiekiamo karšto šilumnešio $T_{KV, T}$ standartinis nuokrypis eksperimento pradžioje yra 2,0 °C. Nuo eksperimento pradžios praėjus 7,5 minutėms ir vidutinei FVM temperatūrai pasiekus lydymosi temperatūrą (>77 °C), standartinis nuokrypis sumažėja iki 1,0 °C ir iki 20 minutės kinta ribose 0,2–1,0 °C. Nuo 20 min standartinis nuokrypis didėja iki 1,5 °C ir iki eksperimento pabaigos svyruoja ribose nuo 0,5 °C iki 1,5 °C. Grįžtamo karšto šilumnešio $T_{KV, G}$ temperatūra priklauso nuo tiekiamo karšto šilumnešio $T_{KV, T}$ temperatūros ir tik proceso pradžioje matomas žymus temperatūrų skirtumas, kuris yra dėl didelio šilumos srauto nuo šilumnešio į FVM.

Eksperimentiškai nustatytų šilumos atidavimo koeficiento (α) ir FVM temperatūros (T) kitimas skirtinguose matavimo taškuose, vykstant FVM įkrovimo procesui, pavaizduotas 3.8 paveiksle.

Kai temperatūra atitinkamame matavimo taške pasiekia 77 °C, laikoma, kad FVM pradeda lydytis, todėl šilumos atidavimo koeficiento vertės vaizduojamos

tik esant skystajai fazei. Tokiu atveju, kaip matyti iš grafiko (3.8 pav.), viename iš matavimo taškų (T_{FVM8}) lydymosi temperatūra pasiekama po 7,5 min nuo įkrovimo proceso pradžios. Taške, nutolusiame nuo šilumos šaltinio (T_{FVM1}), fazės virsmo temperatūra pasiekama tik po 40 minučių nuo proceso pradžios.

3.8 pav. Temperatūros ir vietinio šilumos atidavimo koeficiento kitimas skirtinguose matavimo taškuose

Fig. 3.8. Variation of temperature and local heat transfer coefficient in different measurement points

Iš grafiko matyti (3.8 pav.), kad α vertės skirtinguose matavimo vietose lydymosi proceso pradžioje mažėja ir nuo tam tikro laiko momento (priklausomai nuo matavimo vietos) pradeda didėti. Atkreiptinas dėmesys, kad α didėjimas vyksta temperatūrai viršijus 82 °C. Tai reiškia, kad nuo atskaitos taško 77 °C teoriškai vyksta fazės virsmas, bet yra ankstyvoje stadijoje (plonas sluoksnis skystosios FVM), todėl natūrali konvekcija turi labai mažą įtaką šilumos mainų procesui. Temperatūrai viršijus 82 °C, natūrali konvekcija labiau veikia šilumos mainų procesą, nes matavimo vietoje FVM būna visiškai išsilydžiusi ir susiformavę / besiformuojantys konvekciniai srautai.

Matavimo taškuose α_{FVM2} , α_{FVM3} , α_{FVM7} , α_{FVM8} temperatūrai pakilus iki 88–90 °C vyksta α vertės mažėjimas, kuris gali būti paaiškinamas nežymiu šilumokaičio temperatūros (T_{PAV}) sumažėjimu intervale nuo 25 iki 35 min (žr. 3.10 pav.). Dėl inercijos anksčiau paminėtuose matavimo taškuose, kurie yra arčiau šilumos šaltinio, nežymus šilumokaičio temperatūros (T_{PAV}) sumažėjimas turi didesnę įtaką vietinio šilumos atidavimo koeficiento vertei, lyginant su taškais, nutolusiais nuo šilumos šaltinio α_{FVM1} , α_{FVM4} , α_{FVM5} , α_{FVM6} , α_{FVM9} , α_{FVM10} .

Iš 3.8 pav. taip pat akivaizdu, kad α_{FVM8} vertė, temperatūrai viršijus 91 °C, pradeda didėti žymiai labiau, lyginant su kitais matavimo taškais. Viena iš galimų priežasčių yra mažesnė FVM dinaminė klampa šioje šilumokaičio zonoje, atitinkamai ir šiame matavimo taške, nes T_{FVM8} temperatūra yra didžiausia, lyginant su kitais matavimo taškais. Didžiausia pasiekta temperatūra šiame taške (T_{FVM8}) lydymosi procese yra 92,2 °C, artimiausia didžiausia temperatūra kituose matavimo taškuose yra: $T_{FVM2} - 90,3$ °C, $T_{FVM3} - 90,4$ °C, $T_{FVM7} - 90,3$ °C. Dar viena žymiai didesnio šilumos atidavimo koeficiento α_{FVM8} priežastis yra ta, kad šiame matavimo taške konvekciniai šilumos mainai žymiai aktyvesni dėl padėties, kurią užima temperatūros jutiklis, kuris yra atvirame kanale vertikalia kryptimi bei yra apsuptas horizontalių vamzdelių iš visų pusių (žr. 2.11 ir 2.12 pav.). Tai reiškia, kad šioje zonoje režimas yra nenusistovėjęs ir tam įtakos turi konvekcijos srovės nuo horizontalių vamzdelių, kurios intensyvina šilumos atidavimą vertikalia kryptimi. Pavyzdžiui, esant šilumos atidavimo koeficientui α_{FVM3} , kurio matavimo taškas yra toje pačioje plokštumoje ir tokiu pačiu atstumu nutolęs nuo talpos sienelės kaip α_{FVM8} , taip pat stebimos aukštesnės vertės, lyginant su kitais matavimo taškais, tačiau α_{FVM3} išlieka žymiai mažesnis už α_{FVM8} . Šiuo atveju T_{FVM3} jutiklis, lyginant su T_{FVM8} , nėra apsuptas horizontalių vamzdelių ir yra viršutiniame FVM sluoksnyje, todėl šiame taške yra nusistovėjęs režimas.

Atsižvelgiant į tai, kad eksperimentinių α verčių kitimo intervalas yra gana platus ir priklauso nuo FVM temperatūros bei matavimo taško padėties, tikslinga nustatyti vidutinės α vertės tam tikrais temperatūros intervalais. Šiuo atveju pasirinkti trys temperatūros intervalai (3.9 pav.): 77–82 °C – teorinis FVM fazės virsmo iš kietosios į skystąją intervalas, 82–86 °C – skystoji FVM fazė, >86 °C – skystoji FVM fazė ir iš 3.8 pav. matomas α vertės didėjimas.

Iš 3.9 pav. matyti, kad temperatūros intervaluose 77–82 °C ir 82–86 °C vidutinių α verčių skirtumas svyruoja nuo 1 % (α_{FVM2}) iki 22 % (α_{FVM10}). Punktyrinė linija grafike pažymėti matavimo taškai, kuriuose įvyksta visiškas fazės virsmas, t. y. FVM temperatūra viršija 82 °C. Šiuo atveju dviejuose matavimo taškuose pasiekta didžiausia temperatūra FVM įkrovimo proceso pabaigoje yra: $T_{FVM1} - 78,7$ °C ir $T_{FVM6} - 81,5$ °C. Temperatūros intervale virš 86 °C stebimas didesnis šilumos atidavimo koeficientas visuose matavimo taškuose, išskyrus tuos, kuriuose temperatūra nepasiekia šio intervalo pradinės reikšmės (α_{FVM1} ,

α_{FVM6} , α_{FVM10}). Taigi, nagrinėjant vidutines α vertes pasirinktais temperatūros intervalais, stebima tokia pati tendencija kaip ir vietinio α atveju (3.8 pav.), t. y. FVM lydymosi temperatūrą viršijus 4,0 °C, stebimas α vertės didėjimas, kuris siejamas su mažėjančia medžiagos dinamine klampa.

3.9 pav. Eksperimentiškai nustatyto šilumos atidavimo koeficiento kitimas (su standartiniu nuokrypiu)

Fig. 3.9. Variation of experimentally estimated heat transfer coefficients (incl. standard deviation)

Atkreiptinas dėmesys, kad temperatūros jutiklio pozicija taip pat turi įtakos α vertei. Temperatūros intervale virš 86 °C visuose matavimo taškuose, išskyrus α_{FVM4} , stebimas didesnis standartinis nuokrypis, lyginant su žemesnės temperatūros intervalais (žr. 3.9 pav.). Šiame intervale didžiausioji α vertė ir didžiausias standartinis nuokrypis stebimas α_{FVM8} atveju $131,4 \pm 32,2$ W/m²K.

3.2.2. Šilumos atidavimo koeficiento eksperimentinių ir teorinių verčių palyginimas

Remiantis atlikta literatūros analize, nustatyta, kad natūralios konvekcijos skaičiavimo rezultatų tikslumas priklauso nuo tinkamo būdingojo matmens pasirinkimo. Būdingojo matmens pasirinkimą lemia šilumokaičio geometrija, todėl šiame tyrime panaudoti du skaičiavimo variantai, pasirenkant skirtingus būdinguosius matmenis. Taip siekiama nustatyti, kurio skaičiavimo varianto rezultatai yra artimesni eksperimento rezultatams tyrime nagrinėjamo šilumokaičio konfigūracijos atveju. Vienu atveju laikoma, kad šilumos mainai vyksta nuo atskirų

šilumokaičio vertikalių plokštelių ir būdingasis matmuo yra plokštelės aukštis ($L = 0,139$ m). Antruoju atveju laikoma, kad šilumos mainai vyksta tarp dviejų vertikalių plokštelių, kurios suformuoja kanalą, ir tuomet būdingasis matmuo yra atstumas tarp dviejų plokštelių, t. y. kanalo plotis ($S = 0,01$ m).

Siekiant palyginti, kaip eksperimentiniai duomenys koreliuoja su teoriniais α vertės skaičiavimais, 3.10 pav. pavaizduotos vidutinės α reikšmės kitimo kreivės. T_{PAV} yra vidutinė šilumokaičio paviršiaus temperatūra FVM lydymosi procese. $T_{FVM, VID}$ vaizduoja vidutinę skystosios fazės FVM temperatūrą, kuri apskaičiuojama pagal visų temperatūros jutiklių, esančių skystojoje fazėje, rodmenis.

3.10 pav. Vidutinis šilumos atidavimo koeficientas: α (eksp.) – eksperimentinis, α ($L = 0,139$ m) – teorinis (būdingasis matmuo yra plokštelės aukštis), α ($S = 0,01$ m) – teorinis (būdingasis matmuo yra atstumas tarp plokštelių)

Fig. 3.10. Average heat transfer coefficient: α (eksp.) – experimental, α ($L = 0,139$ m) – theoretical (characteristic length fin height), α ($S = 0,01$ m) – theoretical (characteristic length fin spacing)

Iš 3.10 pav. matyti, kad būdingojo matmens pasirinkimas turi žymią įtaką teorinei α vertei. Būdinguoju matmeniu pasirinkus atstumą tarp dviejų plokštelių, teorinė kreivė gaunama artima eksperimentinei. Tuo atveju, kai būdingasis matmuo yra plokštelės aukštis, stebimos aukštesnės α (L) vertės, lyginant su α (S) ir α (eksp.). Abiejų teorinių kreivių kitimo profilis yra panašus ir stebima tokia pati tendencija, vidutinei FVM temperatūrai pasiekus 82 °C, t. y. vyksta

kreivių plokštėjimas. Kitaip tariant, eksperimentinės ir teorinės α vertės, įvykus fazės virsmui, mažėja lėčiau negu fazės virsmo intervale. Eksperimentinės vertės kitimas svyruoja visame procese ir, vidutinei FVM temperatūrai pasiekus $86\text{ }^{\circ}\text{C}$, stebimas α vertės kilimas. Skaičiuojant teorines α reikšmes laikoma, kad skystosios fazės FVM dinaminė klampa nepriklauso nuo temperatūros ir yra pastovi visame procese, tačiau, atsižvelgiant į medžiagos savybes, kylant temperatūrai, FVM dinaminė klampa mažėja. Mažesnė dinaminė klampa lemia efektyvesnę konvekciją.

Atkreiptinas dėmesys, kad 3.10 pav. pavaizduotos vidutinės šilumos atidavimo koeficiento vertės, kurios, apskaičiuotos remiantis vidutine FVM temperatūra, neparodo α vertės kitimo skirtingose FVM įrenginio vietose (tūryje). Siekiant detaliau išnagrinėti teorines α vertes ir palyginti su eksperimentinėmis, 3.11 pav. pateikiamos vidutinės α vertės, atsižvelgiant į temperatūros intervalą. Analizė atliekama pagal tuos pačius temperatūros intervalus, kurie buvo naudojami nagrinėjant α verčių kitimą atskiruose matavimo taškuose (žr. 3.9 pav.).

3.11 pav. Vidutinių šilumos atidavimo koeficientų palyginimas (su standartiniu nuokrypiu)

Fig. 3.11. Comparison of average heat transfer coefficients (incl. standard deviation)

Iš 3.11 pav. matyti, kad mažiausias vidutinių α verčių skirtumas yra tarp $\alpha (S) - 63,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ ir $\alpha (\text{eksp.}) - 60,8 \text{ W/m}^2\text{K}$, kai vidutinė FVM temperatūra yra virš $86\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vidutinės α vertės per visą įkrovimo procesą yra: $\alpha (\text{eksp.}) - 61 \text{ W/m}^2\text{K}$; $\alpha (L = 0,139 \text{ m}) - 92 \text{ W/m}^2\text{K}$; $\alpha (S = 0,01 \text{ m}) - 68 \text{ W/m}^2\text{K}$. Taigi, taikant tarp dviejų plokštelių (kanale) vykstančių šilumos mainų skaičiavimo analitinę išraišką, vidutinė α vertė gaunama vidutiniškai $7,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ (arba $11,5\%$) didesnė už eksperimentinę. Taikant šilumos mainų skaičiavimo nuo vertikalios plokštelės analitinę išraišką – vidutinė α vertė gaunama $31 \text{ W/m}^2\text{K}$ (arba $50,8\%$) didesnė už eksperimentinę. Šio tyrimo rezultatai panašūs į kitų tyrėjų

gaunamus rezultatus, pavyzdžiui, Medrano et al. (Medrano et al., 2009) tyrė panašios konstrukcijos (geometrijos) šilumokaičius ir eksperimentiškai nustatė, kad šilumos atidavimo koeficientas kito ribose 40–70 W/m²K.

Tai rodo, kad nagrinėjamo tipo šilumokaičiams skaičiuoti (šilumos mainams dėl natūralios konvekcijos įvertinti) gali būti taikoma kanale vykstančios konvekcijos skaičiavimo metodika. Tačiau svarbu atkreipti dėmesį į šilumokaičio proporcijas, nes plokštelės aukščio ir kanalo pločio santykis taip pat lemia konvekcijos įtaką šilumos mainų procesui. Be to, šiame tyrime, skaičiuojant teorinį α , neįvertinti horizontalūs šilumokaičio vamzdeliai, kurie suskirsto šilumokaitį į mažesnes sritis. Šiose srityse įvertinti konvekcinius srautus sudėtinga, nes vienu atveju vamzdeliai blokuoja vertikalų konvekcinių srautą, vykstantį nuo vertikalų paviršių (plokštelių), kitu atveju intensyvina. Pavyzdžiui, šilumokaičio srityse, kuriose nėra ribojimo vertikalios kryptimi (žr. 2.12 pav.), bus nusistovėjęs konvekcinis srautas kanale, o srityse arčiau vamzdelių srautas bus nenusistovėjęs (besivystantis). Eksperimentinio tyrimo metu pastebėta, kad nuo vamzdelių paviršių taip pat vyksta konvekciniai šilumos mainai (skystosios fazės judėjimas), todėl tam tikruose taškuose konvekcijos srovės nuo vertikalų ir horizontalių paviršių intensyvina viena kitą, o tam tikruose taškuose riboja konvekcinių srovių formavimąsi vertikalios kryptimi. Šių eksperimentinių tyrimų rezultatai identifikuoja vietinio šilumos atidavimo koeficiento vertes skirtingose šilumokaičio vietose, o vidutinių teorinių ir eksperimentinių α verčių palyginimas per visą lydymosi procesą ir / arba atskirais intervalais duoda praktinę naudą projektuojant tokio tipo įrenginius.

3.3. Šilumokaičio geometrija

Atlikus FVM įkrovimo ir iškrovimo eksperimentą, naudojant skirtingos geometrijos varinius šilumokaičius FVM1 ir FVM2, nustatyta ir palyginta FVM įkrovimo ir iškrovimo proceso trukmė, FVM fazės virsmo trukmė, temperatūra ir šilumos srautas. FVM lydymosi ir kietėjimo procesas šilumos kaupimo įrenginyje stebimas vizualiai per skaidrų akli dangtį (3.12 pav.). Šiuo atveju pavaizduotas skystosios ir kietosios fazės pasiskirstymas talpos tūryje. FVM lydymosi atveju skystoji fazė aiškiai matoma po 10 min nuo proceso pradžios, FVM kietėjimo atveju kietosios fazės formavimasis stebimas pradėjus tiekti šaltą šilumnešį.

Iš 3.12 pav. matyti, kad abejais atvejais (FVM1 ir FVM2) lydymosi proceso pabaigoje išlieka dalis neišsilydžiusios FVM tose vietose, kur yra mažesnis šilumos mainų paviršiaus plotas (nėra varinių plokštelių). Vykstant FVM kietėjimui, dėl mažėjančio medžiagos tūrio šilumos kaupimo įrenginyje susiformuoja tuščios ertmės. Dėl skirtingų varinių šilumokaičių konstrukcijų stebimas skirtingas tuštumų formavimasis – FVM1 atveju susiformuoja tuštumos tarp varinių

plokštelių ir vamzdelių, FVM2 atveju FVM kietosios fazės pasiskirstymas tolygesnis, tuštumos susiformuoja tik šilumokaičio kraštuose (išilgai vamzdelių).

3.12 pav. Fazės virsmo procesas FVM šilumos kaupimo įrenginyje: 0 min – įkrovimo / iškrovimo proceso pradžia; 10 min – lydymosi procesas; 1 min – kietėjimo procesas; 50 min – įkrovimo / iškrovimo proceso pabaiga

Fig. 3.12. Phase change process inside of the PCM thermal energy storage unit: 0 min – beginning of the charging / discharging process; 10 min – melting process; 1 min – solidification process; 50 min – end of the charging / discharging process

Atliekant bandymus, FVM įkrovimo proceso parametrų matavimo trukmė priklauso nuo FVM temperatūros ir matavimo pabaiga pasirinkta tuomet, kai visuose matavimo taškuose temperatūra yra ne žemesnė kaip 80 °C, t. y. FVM temperatūra aukštesnė už lydymosi temperatūrą. Temperatūrai pasiekus 82 °C, stebimas visiškas FVM išsilydymas. Lydymosi proceso rezultatai – temperatūrų pasiskirstymas skirtinguose matavimo taškuose FVM1 ir FVM2 atvejais – pa-vaizduoti 3.13 ir 3.14 paveiksluose.

Iš 3.13 pav. matyti, kad FVM1 atveju fazės virsmo procesas, kurio lydymosi temperatūros ribos yra 77–82 °C, vyksta laiko intervale nuo 9 iki 50 min. Atkreiptinas dėmesys, kad nuo šilumokaičio nutolusiuose matavimo taškuose T_{FVM1} ir T_{FVM6} pasiekama maksimali 80 °C temperatūra. FVM2 atveju (3.14 pav.) fazės virsmo procesas yra greitesnis ir vyksta ribose nuo 8 iki 40 min, t. y. nuo šilumokaičio nutolusiuose matavimo taškuose T_{FVM9} ir T_{FVM10} 80 °C temperatūra pasiekama 10 min greičiau, lyginant su FVM1. Po 50 min nuo FVM įkrovimo proceso pradžios šiuose matavimo taškuose temperatūra pasiekia 82 °C, tai reiškia, kad visiškai įvyksta fazės virsmas.

3.13 pav. Temperatūros pasiskirstymas – FVM1 įkrovimo procesas

Fig. 3.13. Temperature distribution – the PCM1 charging process

3.14 pav. Temperatūros pasiskirstymas – FVM2 įkrovimo procesas

Fig. 3.14. Temperature distribution – the PCM2 charging process

FVM1 atveju arčiausiai šilumokaicio karštojo kontūro esančiuose taškuose T_{FVM2} , T_{FVM3} , T_{FVM8} FVM lydymosi temperatūra pasiekama po 9–10 min nuo

proceso pradžios. Toliau stebimas temperatūros kreivių plokštėjimas ir nuo 17 min temperatūra vėl pradeda sparčiau kilti. FVM2 atveju arčiausiai šilumokaičio karštojo kontūro esančiuose taškuose T_{FVM2} ir T_{FVM8} lydymosi temperatūra pasiekama taip pat po 9 min nuo proceso pradžios, stebimas temperatūros kilimo sumažėjimas ir nuo 14 min temperatūra vėl pradeda sparčiau kilti. Tai reiškia, kad fazės virsmas minėtuose taškuose FVM2 atveju įvyksta greičiau. Abiem atvejais šiame intervale (77–82 °C) vyksta fazės virsmas, kurio metu sukaupiama fazinio virsmo šiluma. Teoriškai, vykstant fazės virsmui, FVM temperatūra nekinta ir sukauptos energijos kiekis priklauso nuo FVM kiekio bei šiluminės talpos. Tačiau iš eksperimento duomenų matyti, kad fazės virsmo metu temperatūra kinta ir stebimas tik nežymus temperatūros kreivių plokštėjimas. Taip yra todėl, kad fazės virsmas vyksta palaipsniui, kintant skystosios ir kietosios fazių tūrio dalių santykiui FVM įrenginio talpos tūryje, ir vyksta šilumos mainai su besiribojančiais kietosios fazės sluoksniais. Pažymėtina, kad FVM1 atveju nuo šilumokaičio paviršiaus nutolusiuose taškuose nestebimas temperatūros kitimas, kuris dėl fazės virsmo vyksta taškuose T_{FVM2} , T_{FVM3} , T_{FVM5} , T_{FVM7} , T_{FVM8} , T_{FVM9} . Vizualiai matyti, kad pasienio sluoksniuose ir po 50 min matomi kietosios fazės sluoksniai (3.12 pav. FVM1 įkrovimo procesas, 50 min), kai artimesniuose sluoksniuose arba tarp šilumokaičio plokštelių FVM temperatūra yra 90 °C. FVM2 atveju taip pat nestebimas fazės virsmo veikiamas temperatūros kitimas nutolusiuose taškuose T_{FVM1} , T_{FVM4} , T_{FVM6} , T_{FVM9} , T_{FVM10} .

Šilumokaičio paviršiaus temperatūros T_{PAV} kitimas įkrovimo (lydymosi) procese, vidutinė fazinio virsmo medžiagos temperatūra $T_{FVM, VID}$ ir šilumokaičio šilumos srautas pavaizduoti 3.15 paveiksle.

Iš 3.15 pav. matyti vidutinės FVM temperatūros kitimas priklausomai nuo šilumokaičio paviršiaus temperatūros. Lydymosi proceso pradžioje FVM1 atveju stebimas staigus šilumokaičio paviršiaus temperatūros $T_{PAV (FVM1)}$ kilimas ir po 3 min nuo FVM įkrovimo proceso pradžios pasiekama FVM lydymosi temperatūra 77 °C, o po 20 min šilumokaičio paviršiaus temperatūra stabilizuojasi ir pasiekia 90 °C. Šiuo atveju vidutinė šilumokaičio paviršiaus temperatūra vidutiniškai 5,0 °C mažesnė už tiekiamo karšto šilumnešio temperatūrą. Pagal vidutinę FVM temperatūrą $T_{FVM, VID (FVM1)}$ fazės virsmas vyksta intervale nuo 18 iki 28 min. Taip pat proceso pradžioje stebimas staigus šilumokaičio galios mažėjimas, nes mažėja temperatūrų skirtumas tarp tiekiamo ir grįžtamo šilumnešio bei mažėja temperatūrų skirtumas tarp šilumokaičio ir FVM.

3.15 pav. FVM1 ir FVM2 įkrovimo procesas
Fig. 3.15. Charging process of PCM1 and PCM2

FVM2 atveju stebimas staigus šilumokaicio paviršiaus temperatūros $T_{PAV(FVM2)}$ kilimas ir po 7 min pasiekama FVM lydymosi temperatūra 77 °C. Pagal vidutinę FVM temperatūrą $T_{FVM, VID(FVM2)}$ fazės virsmas vyksta intervale nuo 20 iki 28 min. Taip pat proceso pradžioje stebimas staigus šilumokaicio galios mažėjimas, kuriam įtaką daro mažėjantis temperatūrų skirtumas tarp šilumnešio ir FVM. Atkreiptinas dėmesys, kad FVM1 atveju stebimas greitesnis šilumokaicio paviršiaus ir vidutinės FVM temperatūrų didėjimas, tačiau vidutinė fazės virsmo trukmė yra mažesnė FVM2 atveju (FVM1 – 10 min, FVM2 – 8 min). Taip pat FVM2 atveju stebimas vidutiniškai 2,5 % didesnis šilumos srautas.

Nepaisant to, kad FVM1 atveju lydymosi procesas trunka ilgiau, lydymosi temperatūra pasiekama 2 min greičiau. Tačiau, vertinant pagal temperatūrą atskiruose matavimo taškuose, abiem atvejais arčiausiai šilumokaicio esančiuose matavimo taškuose FVM lydymosi temperatūra (77 °C) pasiekama po 8–9 min nuo proceso pradžios.

FVM iškrovimo proceso rezultatai FVM1 ir FVM2 atveju pavaizduoti 3.16 ir 3.17 paveiksluose. Iškrovimo proceso eksperimentas pradedamas FVM temperatūrai pasiekus 90 °C. Kitaip tariant, FVM temperatūrai esant apie 8 °C aukštesnei už medžiagos lydymosi temperatūrą. Eksperimentą pradėti nuo aukštesnės temperatūros pasirinkta todėl, kad būtų užtikrinta FVM skystoji fazė didžiojoje dalyje FVM įrenginio talpos tūrio. Iškrovimo procesas atliekamas esant šaltojo šilumnešio masiniam debitui 0,36 kg/s.

3.16 pav. Temperatūros pasiskirstymas – FVM1 iškrovimo procesas

Fig. 3.16. Temperature distribution – the PCM1 discharging process

3.17 pav. Temperatūros pasiskirstymas – FVM2 iškrovimo procesas

Fig. 3.17. Temperature distribution – the PCM2 discharging process

Iš 3.16 ir 3.17 pav. grafikų matyti, kad proceso pradžioje vyksta staigus temperatūros mažėjimas visuose matavimo taškuose. FVM temperatūra FVM1

atveju sumažėja iki žemutinės FVM kietėjimo temperatūros ribos 77 °C per 2,25 min nuo iškrovimo proceso pradžios, FVM2 atveju – per 1,32 min. Tai reiškia, kad visuose matavimo taškuose FVM yra kietojo būvio, tačiau vizualiai stebimas FVM kieto sluoksnio augimas ant šilumokaičio paviršiaus (3.12 pav. FVM iškrovimo procesas – 1 min.), kuris suformuoja barjerą (mažo šilumos laidumo sluoksnį), mažinantį šilumos perdavimą į tolesnius FVM sluoksnius. Temperatūros jutikliai fiksuoja kieto sluoksnio temperatūrą, o per šį sluoksnį toliau vyksta šilumos mainai tarp skystosios FVM fazės ir šaltojo šilumnešio (šilumokaičio). FVM1 atveju (3.16 pav.) stebimas siauresnis temperatūros mažėjimo intervalas, lyginant su FVM2 (3.17 pav.). Kitaip tariant, FVM1 atveju stebimas mažesnis temperatūrų skirtumas tarp skirtingų matavimo taškų. FVM2 atveju šilumokaičio šilumos mainų paviršiaus plotas yra didesnis, t. y. didesnis šilumai laidžių plokštelių skaičius ir mažesni atstumai tarp jų. Dėl to kietas sluoksnis formuojasi ant didesnio paviršiaus ploto ir tam tikruose matavimo taškuose greičiau pasiekama žemesnė temperatūra.

Šilumokaičio paviršiaus temperatūros kitimas iškrovimo procese, vidutinė FVM temperatūra ir šilumokaičio šilumos srautas pavaizduoti 3.18 paveiksle.

3.18 pav. FVM1 ir FVM2 iškrovimo procesas
Fig. 3.18. Discharging process of PCM1 and PCM2

3.18 pav. matyti vidutinės FVM temperatūros kitimas, vykstant iškrovimo procesui, priklausomai nuo šilumokaičio paviršiaus temperatūros. Proceso pradžioje stebimas staigus šilumokaičio paviršiaus temperatūros $T_{PAV (FVM1)}$ mažėjimas.

mas ir po 8 min šilumokaičio temperatūra pasiekia tiekiamo šilumnešio $T_{SV,T}$ temperatūrą. Vidutinė FVM temperatūra $T_{FVM, VID (FVM1)}$ per 1,25 min sumažėja iki 77 °C, t. y. įvyksta fazės virsmas iš skystosios į kietąją. Pažymėtina, kad vidutinė fazinio virsmo trukmė, remiantis temperatūros jutiklių rodmenimis, neparo visiško fazės virsmo. Vizualiai stebima žymiai ilgesnė fazinio virsmo proceso trukmė. Iš grafiko taip pat matyti, kad FVM1 šilumokaičio perduodamas šilumos srautas į FVM mažėja ir stabilizuojasi po 10 min nuo proceso pradžios.

FVM2 atveju proceso pradžioje taip pat stebimas staigus šilumokaičio paviršiaus temperatūros $T_{PAV (FVM2)}$ mažėjimas ir po 12 min šilumokaičio temperatūra stabilizuojasi. Vidutinė FVM temperatūra $T_{FVM, VID (FVM2)}$ per 0,25 min sumažėja iki 77 °C. Mažėjant tiekiamo ir grįžtamo šilumnešio temperatūrų skirtumui FVM2 šilumokaičio galia mažėja ir stabilizuojasi po 5 min nuo proceso pradžios. Taip pat iš 3.18 pav. grafiko matyti, kad FVM1 atveju šilumokaičio galia proceso pradžioje (iki antros minutės) yra mažesnė už FVM2, o, įvykus fazės virsmui, FVM1 šilumokaičio galia yra didesnė už FVM2. Šiuo atveju kintantį šilumos srautą lemia skirtingai besiformuojantis kietosios FVM sluoksnis ant šilumokaičių. Tačiau vidutinis šilumos srautas per visą FVM iškrovimo proceso trukmę yra 2,7 % didesnis FVM1 atveju (FVM1 – 2,23 kW ir FVM2 – 2,17 kW).

Atlikus FVM įrenginio skirtingų šilumokaičio geometrijų eksperimentinį palyginimą, nustatyta, kad abiejų šilumokaičių veikimo charakteristikos yra panašios ir atitinka jiems keliamus projektinius reikalavimus. Tačiau atkreiptinas dėmesys, kad FVM1 šilumokaičio paviršiaus plotas (1,0 m²) yra mažesnis už FVM2 (1,75 m²). Tai reiškia, kad FVM1 gamybos technologija (plokštelių litavimas) užtikrina geresnį šiluminį kontaktą tarp plokštelių ir vamzdelių, taip pat šilumos perdavimas vyksta intensyviau dėl didesnio storio (1,5 mm) šilumokaičio plokštelių. Tačiau FVM1 šilumokaičio svoris (6,9 kg) žymiai padidina gamybos sąnaudas, lyginant su FVM2 šilumokaičiu, kurio svoris yra 2,1 kg. Didesnis svoris taip pat reiškia, kad FVM1 šilumokaitis užima didesnę tūrį, todėl reikalinga didesnio tūrio talpa tam pačiam FVM kiekiui.

3.4. Šilumnešio debitas

Lyginant FVM1 ir FVM2 šilumokaičių geometrijos tyrimo rezultatus, veikimo charakteristikas, šilumokaičio medžiagos (vario) užimamą tūrį ir gamybos galimybes (technologiją), šilumos kaupimo įrenginys FVM2 pasižymi labiau išplėtotą ir prieinamą gamybos technologiją bei užtikrina žymiai mažesnes medžiagų sąnaudas šilumokaičio gamybai. Taigi, siekiant detaliau ištirti FVM2 įrenginio veikimą ir nustatyti šilumnešio debito įtaką jo veikimo charakteristikoms, atliekami bandymai. FVM įkrovimo proceso rezultatai pavaizduoti 3.19 paveiksle.

3.19 pav. FVM lydymosi (ikrovimo) procesas. Tiekiamo karšto šilumnešio masinis debitas: 0,25 kg/s, 0,125 kg/s ir 0,05 kg/s

Fig. 3.19. PCM melting (charging) process. Mass flow rate of hot heat transfer fluid 0.25 kg/s, 0.125 kg/s and 0.05 kg/s

Keičiant karšto šilumnešio masinius debitus stebima, kaip kinta tiekiamo ir grįžtamo šilumnešių temperatūros $T_{KV, T}$, $T_{KV, G}$, šilumokaičio paviršiaus temperatūra T_{PAV} , FVM temperatūra skirtinguose matavimo taškuose $T_{FVM1}-T_{FVM10}$, vidutinė FVM temperatūra $T_{FVM, VID}$, tiekiamo ir grįžtamo šilumnešių temperatūrų skirtumas ΔT .

Iš 3.19 pav. matyti, kad arčiausiai šilumokaičio paviršiaus esančiame matavimo taške T_{FVM8} fazinio virsmo temperatūra (77°C) pasiekiamia greičiausiai – 1,5 min nuo proceso pradžios, šilumnešio debitui esant 0,25 kg/s, 2,5 min, debitui esant 0,125 kg/s, ir 5,5 min, debitui esant 0,05 kg/s. Toliausiai esančiame matavimo taške T_{FVM9} fazės virsmo temperatūra pasiekiamia po 21, 22 ir 30 min nuo proceso pradžios, šilumnešio debitui atitinkamai esant 0,25, 0,125 ir 0,05 kg/s. Esant skirtingiems šilumnešio debitams, stebimos skirtingos FVM įkrovimo proceso trukmės ir žymus temperatūrų skirtumas tarp kai kurių matavimo taškų. Tai reiškia, kad dalis FVM tam tikru laiko momentu būna išsilydžiusi ir jos temperatūra artėja prie tiekiamo šilumnešio temperatūros, o kita dalis FVM dar būna nepasiekusi lydymosi temperatūros. Todėl toliau FVM įkrovimo procesas analizuojamas pagal vidutinę FVM temperatūrą $T_{FVM, VID}$ (3.20 pav.).

3.20 pav. FVM lydymosi (įkrovimo) procesas: FVM vidutinė temperatūra, šilumokaičio paviršiaus temperatūra ir šilumnešio temperatūrų skirtumas

Fig. 3.20. PCM melting (charging) process: average temperature of PCM, heat exchanger surface temperature and heat transfer fluid temperature difference

Iš 3.20 pav. matyti, kad vidutinė FVM temperatūra $T_{FVM, VID}$ kinta lėčiausiai mažiausio šilumnešio debito atveju (0,05 kg/s). Pastebima, kad skirtumas tarp tiekiamo ir grįžtamo šilumnešių temperatūrų yra didžiausias, kai masinis debitas yra 0,05 kg/s, o mažiausias – kai masinis debitas yra 0,25 kg/s. 3.20 pav. parodoma, kad šilumokaičio paviršiaus temperatūra, esant didžiausiam ir vidutiniam šilumnešio debitams (0,25 kg/s ir 0,125 kg/s), skiriasi labai nežymiai, o mažiausio debito (0,05 kg/s) atveju skirtumas yra didžiausias. Taigi, šilumnešio masiniams debitams esant 0,25 kg/s ir 0,125 kg/s, šilumokaičio paviršiaus temperatūrą, kartu ir vidutinę FVM temperatūrą, labiausiai veikia tiekiamo šilumnešio temperatūra, kuri, debitui esant 0,125 kg/s, yra vidutiniškai 2 °C aukštesnė negu debito 0,25 kg/s atveju. Debitui esant 0,05 kg/s, stebima didesnė šilumnešio debito įtaka šilumokaičio paviršiaus ir FVM vidutinei temperatūrai (temperatūra kyla lėčiau). Šiuo atveju (debitas 0,05 kg/s) tiekiamo šilumnešio temperatūra yra vidutiniškai 1,0 °C žemesnė, lyginant su debitu 0,25 kg/s. Atkreiptinas dėmesys, kad sumažinus srauto debitą nuo 0,25 kg/s iki 0,125 kg/s, fazės virsmas vyksta 0,4 min ilgiau, o sumažinus srautą iki 0,05 kg/s – 4,1 min ilgiau (vertinant pagal vidutinę FVM temperatūrą).

Keičiant šalto šilumnešio masinius debitus stebima, kaip kinta tiekiamo ir grįžtamo šilumnešių temperatūros $T_{SV, T}$, $T_{SV, G}$, šilumokaičio paviršiaus temperatūra T_{PAV} , FVM temperatūra skirtinguose matavimo taškuose $T_{FVM1} - T_{FVM10}$, vidutinė FVM temperatūra $T_{FVM, VID}$, tiekiamo ir grįžtamo šilumnešių temperatūrų skirtumas ΔT .

FVM iškrovimo (kietėjimo) rezultatai pavaizduoti 3.21 pav., iš kurio matyti, kad arčiausiai šilumokaičio esančiame matavimo taške T_{FVM8} FVM temperatūros mažėjimas vyksta greičiausiai. Fazinio virsmo temperatūra (kietėjimo pradžia 82 °C) šiuo atveju nėra pasiekama greičiausiai, nes kituose matavimo taškuose temperatūra buvo žemesnė proceso pradžioje. Tačiau kietėjimo procese beveik visuose matavimo taškuose kietėjimo pradžios temperatūra pasiekama per 0,5–1,0 min. Pažymėtina, kad didesnis laiko skirtumas stebimas tarp fazės virsmo iš skystosios į kietąją pabaigos (77 °C). Taigi, intervale nuo 82 °C iki 77 °C vyksta fazės virsmas, kurio metu atiduodama sukaupta šiluma, todėl žymiai lėčiau kinta temperatūra, lyginant su kitais temperatūros intervalais.

Esant skirtingiems šilumnešio srauto debitams, stebimos skirtingos FVM iškrovimo proceso trukmės, tačiau skirtumas tarp skirtingų šilumnešio debitų yra žymiai mažesnis, lyginant su FVM įkrovimo procesu. Temperatūrų skirtumas tarp skirtingų matavimo taškų taip pat yra mažesnis, lyginant su įkrovimo procesu. Tai reiškia, kad FVM iškrovimo procesas yra tolygesnis, o pagrindinė to priežastis yra didesnis temperatūrų skirtumas tarp FVM ir tiekiamo šalto šilumnešio. Toliau FVM iškrovimo procesas analizuojamas pagal vidutinę FVM temperatūrą $T_{FVM, VID}$ (3.22 pav.).

3.21 pav. FVM kietėjimo (iškrovimo) procesas. Tiekiamo šalto šilumnešio masinis debitas: 0,25 kg/s, 0,125 kg/s ir 0,05 kg/s

Fig. 3.21. PCM solidification (discharging) process. Mass flow rate of cold heat transfer fluid 0.25 kg/s, 0.125 kg/s and 0.05 kg/s

3.22 pav. FVM kietėjimo (iškrovimo) procesas: FVM vidutinė temperatūra, šilumokaičio paviršiaus temperatūra ir šilumnešio temperatūrų skirtumas

Fig. 3.22. PCM solidification (discharging) process: average temperature of the PCM, the surface temperature of the heat exchanger and difference of heat transfer fluid temperature

Iš 3.22 pav. matyti, kad vidutinė FVM temperatūra $T_{FVM, VID}$ kinta lėčiausiai mažiausio šilumnešio debito atveju (0,05 kg/s). Pastebima, kad skirtumas tarp tiekiamo ir grįžtamo šilumnešių temperatūrų yra didžiausias, kai debitas yra 0,05 kg/s. Mažiausias, kai debitas yra 0,25 kg/s. Šilumokaičio paviršiaus temperatūra, esant šilumnešio debitams 0,25 kg/s ir 0,125 kg/s, skiriasi labai nežymiai, o debito atveju 0,05 kg/s yra didžiausia. Taigi, šilumnešio srauto debitams esant 0,25 kg/s ir 0,125 kg/s, šilumokaičio paviršiaus temperatūrą, kartu ir vidutinę FVM temperatūrą, labiausiai veikia tiekiamo šilumnešio temperatūra, kuri, debitui esant 0,125 kg/s, yra vidutiniškai 1,5 °C aukštesnė, lyginant su debitu 0,25 kg/s. Debitui esant 0,05 kg/s, stebima didesnė šilumnešio debito įtaka šilumokaičio paviršiaus ir FVM vidutinei temperatūrai (temperatūra mažėja lėčiau). Šiuo atveju tiekiamo šilumnešio temperatūra yra vidutiniškai 1,2 °C aukštesnė, lyginant su debitu 0,125 kg/s.

Atkreiptinas dėmesys, kad sumažinus šilumnešio debitą nuo 0,25 kg/s iki 0,125 kg/s, fazės virsmas vyksta 0,3 min ilgiau, o sumažinus iki 0,05 kg/s – 0,9 min ilgiau (vertinant pagal vidutinę FVM temperatūrą). Taigi, esant didesniems šilumnešio debitams, tiriamojo FVM šilumos kaupimo įrenginio atveju stebima didesnė tiekiamo šilumnešio temperatūros įtaka lydymosi / kietėjimo

proceso trukmei. Kitaip tariant, skirtumas tarp didžiausio ir vidutinio šilumnešio masinių debitų (0,25 kg/s ir 0,125 kg/s) nežymiai veikia fazės virsmo trukmę ir, sumažinus srauto debitą iki vidutinio (0,125 kg/s), trukmė padidėja: lydymosi metu 6,5 %, kietėjimo – 17,2 %. Šilumnešio masinių debitą sumažinus iki mažiausio (0,05 kg/s), stebima didesnė debito įtaka fazės virsmo trukmei ir, lyginant su didžiausiu debitu (0,25 kg/s), padidėja: lydymosi metu 60,7 %, kietėjimo – 48,3 %.

3.5. Fazinio virsmo medžiagos tankio pokytis

Šis tyrimas atliekamas su FVM2 šilumos kaupimo įrenginio versija. Atliekant eksperimentą matuojamas uždaram inde, t. y. fazinio virsmo medžiagos nepripildytame tūryje, esančio oro slėgio (manometrinio) pokytis (žr. 2.13 pav.).

Slėgio ir šilumokaičio šilumos srauto tankio kitimas, esant skirtingiems veikimo režimams, pavaizduotas 3.23 paveiksle.

3.23 pav. Slėgio ir šilumos srauto tankio kitimas vykstant FVM įkrovimo / iškrovimo procesui

Fig. 3.23. The variation of pressure and heat flux during the PCM charging / discharging process

Pažymėtina, kad FVM įkrovimo procese slėgio didėjimas matuojamas nuo pradinės FVM temperatūros 30 °C iki galutinės temperatūros 90 °C. FVM iškrovimo metu slėgio mažėjimas matuojamas nuo 90 °C iki 30 °C. Tai reiškia, kad

slėgis kinta ne tik dėl medžiagos fazės virsmo, bet ir dėl FVM tūrinio plėtimosi, esant kietajai ir skystajai fazei, kitaip tariant, temperatūrai esant žemiau ir aukščiau FVM lydymosi intervalo 77–82 °C. Slėgio kitimą taip pat veikia ir oro šiluminis plėtimasis. Atviro veikimo režimo atveju slėgio reguliavimo vožtuvas V7 (žr. 2.13 pav.) yra atidarytas, todėl uždaroje kameroje esančio oro slėgis nesusidaro.

3.23 pav. pavaizduotos eksperimentinės slėgio kitimo kreivės esant uždaram veikimo režimui. Manometrinis slėgis uždaroje kameroje kinta dėl FVM ir oro šiluminio plėtimosi. Pirmiausia FVM plečiasi, kai yra kaitinama nuo pradinės temperatūros iki fazės virsmo temperatūros. Šiuo atveju didėja kietosios fazės tūris. Temperatūrai pasiekus fazės virsmo temperatūrą, FVM lydosi, mažėja medžiagos tankis, didėja užimamas tūris. FVM išsilydžius ir vykstant tolesniam kaitinimui nuo lydymosi temperatūros iki galutinės įkrovimo proceso temperatūros, dėl šiluminio plėtimosi didėja skystosios fazės užimamas tūris. Šiuo atveju tūrio plėtimasis kompensuojamas slegiant uždaroje kameroje esantį orą. Suspaustas oras taip pat plečiasi dėl temperatūros poveikio, todėl stebimas slėgio didėjimas. FVM iškrovimo metu vyksta atvirkštinis procesas ir slėgis uždaroje kameroje mažėja.

Kaip matyti iš grafiko (3.23 pav.), vykstant FVM įkrovimo procesui slėgis pakyla nuo 30 kPa iki 400 kPa. Vykstant FVM iškrovimo procesui slėgis sumažėja nuo 400 kPa iki 30 kPa. Abiem atvejais stebimas vienodas slėgio skirtumas, kuris yra 370 kPa. Atkreiptinas dėmesys, kad prieš pradedant matavimą uždaroje kameroje slėgis yra 30 kPa. Šiuo atveju slėgis susidarė dėl FVM temperatūros pakėlimo iki 30 °C, siekiant suvienodinti pradines sąlygas, lyginant uždaro ir atviro veikimo režimų temperatūros kreives.

Vykstant FVM įkrovimo ir iškrovimo procesams, šilumokaičio šilumos srauto tankis, esant atviram ir uždaram veikimo režimams, skiriasi labai nežymiai. Iš grafiko (3.23 pav.) matyti, kad tam tikrais laiko intervalais šilumos srauto tankis yra didesnis atviro veikimo režimo atveju, ir atvirkščiai – didesnis, esant uždaram veikimo režimui. Vertinant šilumos srauto tankio svyravimą per visą įkrovimo proceso trukmę (30 min), didžiausias skirtumas yra 2,7 % ir šis skirtumas stebimas proceso pradžioje. Vertinant vidutinį šilumos srauto tankį, vykstant įkrovimui, atviro veikimo režimo atveju jis yra 1,0 % didesnis, lyginant su uždaru režimu. Per visą iškrovimo proceso trukmę didžiausias skirtumas taip pat stebimas proceso pradžioje ir yra 1,3 %. Vertinant vidutinį šilumos srauto tankį, vykstant iškrovimui, atviro veikimo režimo atveju jis yra 0,4 % didesnis, lyginat su uždaru režimu. Tačiau abiejų veikimo režimų atveju didesnis šilumos srauto tankis stebimas, vykstant FVM iškrovimo procesui. Pagrindinė to priežastis yra didesnis temperatūrų skirtumas tarp tiekiamo šalto šilumnešio ir FVM, lyginant su temperatūrų skirtumu įkrovimo procese.

Iš gautų rezultatų matyti, kad šilumos srauto tankio skirtumas tarp dviejų veikimo režimų kinta matavimo paklaidų ribose, todėl toliau skirtingi veikimo režimai lyginami pagal FVM temperatūrą ir įkrovimo / iškrovimo trukmę. Šilumokaičio paviršiaus temperatūros kitimas (T_{PAV}) FVM įkrovimo ir iškrovimo procesuose, vidutinė FVM temperatūra ($T_{FVM, VID}$), tiekiamo ir grįžtamo šilumnešio temperatūros ($T_{KV, T}$, $T_{KV, G}$, $T_{ŠV, T}$, $T_{ŠV, G}$) ir temperatūrų skirtumas (ΔT) tarp tiekiamo ir grįžtamo šilumnešių pavaizduotas 3.24 ir 3.25 paveiksluose. Šiuose paveiksluose pilka zona žymi fazės virsmo intervalą.

3.24 pav. FVM įkrovimo procesas esant atviram ir uždaram veikimo režimui
Fig. 3.24. PCM charging process in Open and Closed operation mode

Iš 3.24 pav. matyti, kad FVM įkrovimo proceso pradžioje uždaro veikimo režimo atveju tiekiamo ir grįžtamo šilumnešių temperatūros yra vidutiniškai 0,5 °C žemesnės, lyginant su atviru veikimo režimu. Nuo proceso pradžios praėjus 6,5 min, temperatūrų skirtumas sumažėja iki 0,2 °C. Temperatūros skirtumas (ΔT) tarp tiekiamo ir grįžtamo šilumnešių mažėja, kylant FVM temperatūrai, o tarp abiejų veikimo režimų skirtumas svyruoja daugiausiai iki 0,3 °C. FVM įkrovimo proceso pradžioje stebimas staigus šilumokaičio paviršiaus temperatūros (T_{PAV}) kilimas abiejų režimų atveju.

Atsižvelgiant į vidutinę FVM temperatūrą, matoma, kad vidutinė fazės virsmo trukmė intervale nuo 77 °C iki 82 °C yra 4,4 min uždaro režimo atveju ir 4,8 min atviro režimo atveju. Nepaisant to, kad uždaro režimo atveju vidutinė tiekiamo šilumnešio temperatūra fazės virsmo intervale yra 0,2 °C žemesnė, ly-

ginant su atviru režimu, fazės virsmo trukmė yra 0,4 min trumpesnė. Taigi, uždaro veikimo režimo atveju stebimas greitesnis FVM įkrovimo procesas.

FVM iškrovimo procese (3.25 pav.) abiem veikimo režimo atvejais tiekiamo ir grįžtamo šilumnešio temperatūros yra vienodos. Temperatūros skirtumas (ΔT) tarp tiekiamo ir grįžtamo šilumnešių mažėja, mažėjant FVM temperatūrai, ir išlieka vienodas tarp abiejų veikimo režimų viso eksperimento metu.

3.25 pav. FVM iškrovimo procesas esant atviram ir uždaram veikimo režimui

Fig. 3.25. PCM discharging process in Open and Closed operation mode

Atsižvelgiant į vidutinę FVM temperatūrą, matoma, kad vidutinė fazės virsmo trukmė intervale nuo 82 °C iki 77 °C yra 1,5 min uždaro režimo atveju ir 1,6 min atviro režimo atveju.

Atkreiptinas dėmesys, kad vidutinė FVM temperatūra ($T_{FVM, VID}$) apskaičiuota pagal dešimties temperatūros jutiklių, esančių skirtingose FVM įrenginio vietose, rodmenis. Taigi, $T_{FVM, VID}$ parodo tik vidutinę įkrovimo / iškrovimo trukmę, kuri skiriasi nuo proceso trukmės atskiruose matavimo taškuose. Siekiant fazės virsmo trukmę išnagrinėti kiekviename matavimo taške ir palyginti skirtingus veikimo režimus, analizuojami eksperimento metu gauti temperatūros kitimo ir fazės virsmo trukmės grafikai (3.26 ir 3.27 pav.). Šioje analizėje fazės virsmo trukmė reiškia laiko intervalą, kuriame FVM temperatūra padidėja nuo 77 °C iki 82 °C įkrovimo procese ir sumažėja nuo 82 °C iki 77 °C iškrovimo procese. Grafikuose fazės virsmo intervalą žymi pilka zona.

3.26 pav. FVM temperatūros kitimas ir fazės virsmo trukmė atskiruose matavimo taškuose įkrovimo procese

Fig. 3.26. PCM temperature distribution and phase change duration during the charging process in different measuring points

3.27 pav. FVM temperatūros kitimas ir fazės virsmo trukmė atskiruose matavimo taškuose iškrovimo procese

Fig. 3.27. PCM temperature distribution and phase change duration during the discharging process in different measuring points

Iš 3.26 pav. matyti, kad FVM temperatūra skirtinguose matavimo taškuose pasiekia lydomosi intervalą skirtingais laiko momentais, o temperatūros kitimo kreivių profiliai yra labai panašūs, esant atviram ir uždaram veikimo režimams. Iš fazės virsmo trukmės grafiko matyti, kad FVM įkrovimo metu fazės virsmas, esant uždaram režimui, yra ilgesnis matavimo taškuose T_{FVM2} , T_{FVM3} , T_{FVM4} ir T_{FVM5} (pažymėta punktyrine linija). Nepaisant ilgesnės fazės virsmo trukmės minėtuose taškuose, esant uždaram režimui, vidutinė fazės virsmo trukmė atviro režimo atveju yra 0,15 min arba 3,2 % ilgesnė.

Iš 3.27 pav. matyti, kad FVM temperatūra skirtinguose matavimo taškuose pasiekia kietėjimo intervalą skirtingais laiko momentais, tačiau temperatūros skirtumas tarp skirtingų taškų yra žymiai mažesnis, lyginant su įkrovimo procesu. Temperatūros kitimo kreivių profiliai FVM iškrovimo metu yra labai panašūs, esant abiem veikimo režimams. Iš fazės virsmo trukmės grafiko matyti, kad FVM iškrovimo metu fazės virsmas, esant uždaram režimui, yra ilgesnis matavimo taškuose T_{FVM2} ir T_{FVM4} (pažymėta punktyrine linija). Nepaisant ilgesnio fazės virsmo minėtuose taškuose, esant uždaram režimui, vidutinė fazės virsmo trukmė atviro režimo atveju yra 0,03 min, arba 1,7 % ilgesnė.

Iš 3.26 ir 3.27 pav. fazės virsmo trukmės grafikų matyti, kad fazės virsmo trukmė tam tikruose matavimo taškuose yra ilgesnė atviro veikimo režimo metu, ir atvirkščiai, ilgesnė uždaro veikimo metu. Tai reiškia, kad fazės virsmo procesas FVM tūryje yra netolygus ir priklauso ne tik nuo šilumnešio temperatūros, bet ir nuo susiformavusios FVM struktūros, pavyzdžiui, tuštumų susiformavimo skirtingose vietose, vykstant FVM iškrovimo (kietėjimo) procesui. Nors fazės virsmo trukmė skirtinguose matavimo taškuose skiriasi nežymiai tarp atviro ir uždaro veikimo režimų, vidutinė fazės virsmo trukmė rodo, kad procesas greičiau vyksta esant uždaram režimui. Taigi, fazinio virsmo medžiagos veikimas tam tikru slėgiu gali sumažinti FVM įkrovimo ir iškrovimo proceso trukmę.

3.6. Šilumos kaupimo įrenginio įkrovimo ir iškrovimo trukmė

Atsižvelgiant į FVM termofizikines savybes ir FVM2 įrenginio tūrį (FVM masę), apskaičiuojama, kokį šilumos kiekį gali sukaupti FVM įrenginys. Gauti rezultatai palyginami su eksperimento metu sukauptu šilumos kiekiu, esant skirtingiems veikimo režimams. Atsižvelgiant į gautus rezultatus ir taikant regresinės analizės metodą, sudaromas trimatis atsako paviršius ir gaunamas regresijos modelis, leidžiantis prognozuoti FVM įkrovimo ir iškrovimo trukmę.

Eksperimentai atliekami naudojant skirtingus tiekiamo šilumnešio masinius debitus ir temperatūrą. Atsižvelgiant į 3.28 pav. pateiktus temperatūros intervalus, apskaičiuojama vidutinė tiekiamo šilumnešio temperatūra, vidutinei FVM

temperatūrai pakitus $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Atkreiptinas dėmesys, kad skirtinguose matavimo taškuose FVM temperatūra kinta nevienodai, todėl laikoma, kad vidutinė FVM temperatūra ($T_{FVM, vid}$) yra lygi dešimties temperatūros jutiklių, esančių skirtingose FVM įrenginio vietose (žr. 2.10 ir 2.11 pav.), rodmenų vidurkiui. Šilumnešio masinis debitas per visą proceso trukmę išlaikomas pastovus. Integruojant laiką pagal temperatūros intervalą, gaunama FVM įkrovimo / iškrovimo proceso trukmė, esant skirtingiems testavimo režimams. Rezultatai pateikti 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. Veikimo (testavimo) režimai

Table 3.2. Operating (testing) modes

FVM įkrovimas (lydymasis)				FVM iškrovimas (kietėjimas)			
Veikimo režimo numeris	$T_{KV, T},\text{ }^{\circ}\text{C}$ (vidutinė)	$\dot{m},\text{ kg/s}$	$\tau,\text{ min}$	Veikimo režimo numeris	$T_{ŠV, T},\text{ }^{\circ}\text{C}$ (vidutinė)	$\dot{m},\text{ kg/s}$	$\tau,\text{ min}$
MEL1	96,5	0,10	17,0	SOL1	20,8	0,10	5,02
MEL2	95,3	0,10	17,7	SOL2	19,6	0,10	4,85
MEL3	95,6	0,125	17,1	SOL3	28,9	0,125	5,35
MEL4	94,2	0,125	18,2	SOL4	30,1	0,125	5,48
MEL5	95,3	0,20	13,8	SOL5	23,5	0,20	4,50
MEL6	94,8	0,20	14,6	SOL6	22,5	0,20	4,48
MEL7	94,0	0,25	17,1	SOL7	26,9	0,25	4,55
MEL8	95,2	0,25	14,3	SOL8	28,3	0,25	4,82

Fazinio virsmo medžiagos RT82 suminis savitosios ir fazinio virsmo šilumos kiekis temperatūrų intervale nuo $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ yra $170\text{ kJ/kg} \pm 7,5\%$ (žr. 2.3 lentelę). FVM gamintojo deklaruojamas (pateiktas duomenų lape) dalinės entalpijos pasiskirstymas, išmatuotas naudojant kalorimetrą, pavaizduotas 3.28 paveiksle.

Remiantis grafike (3.28 pav.) pateiktu temperatūros intervalu ir daline entalpija bei tyrime naudojamu FVM kiekiu ($4,34\text{ kg}$), apskaičiuojamas teorinis FVM sukauptos šilumos kiekis kiekviename temperatūros intervale kas $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Šiuo metodu apskaičiuotas šilumos kiekis vadinamas deklaruojamu. Eksperimentinis šilumos kiekis kiekviename temperatūros intervale apskaičiuojamas pagal nagrinėjamo intervalo vidutinį šilumos srautą ir trukmę (2.12 formulė).

FVM įkrovimo ir iškrovimo metu sukaupti ir atiduoti šilumos kiekiai pavaizduoti 3.29 ir 3.30 paveiksluose.

3.28 pav. FVM RT82 dalinės entalpijos pasiskirstymas (Rubitherm, 2016)

Fig. 3.28. PCM RT82 partial enthalpy distribution (Rubitherm, 2016)

3.29 pav. pavaizduotas vidutinio FVM sukaupto šilumos kiekio pasiskirstymas atskirais temperatūros intervalais nuo 70 °C iki 85 °C. Temperatūra, kuriai esant sukaupiamas didžiausias šilumos kiekis, atitinka FVM lydymosi temperatūrą.

3.29 pav. FVM įkrovimo metu sukauptas šilumos kiekis (su standartiniu nuokrypiu)

Fig. 3.29. Energy absorbed during the PCM charging process (incl. standard deviation)

Tiriamos FVM atveju lydymosi intervalas yra 77–82 °C ir deklaruojamų verčių atveju šiame intervale stebimi didžiausi šilumos kiekiai. Eksperimentinės vertės, pavaizduotos histogramoje, parodo aštuonių įkrovimo proceso režimų vidurkį (MEL1–MEL8). Standartinis nuokrypis eksperimentinių verčių atveju parodo sukaupto šilumos kiekio kitimą priklausomai nuo veikimo režimo.

Iš 3.29 pav. matyti, kad sukauptas šilumos kiekis, gautas atlikus eksperimentą, kinta tolygiau nei deklaruojamas per visą nagrinėjamą temperatūros intervalą. Taip pat fazės virsmo intervale (77–82 °C) nestebimas su fazės virsmu susijęs šilumos kiekio padidėjimas. Šie skirtumai atsiranda dėl FVM temperatūros matavimo taškų skaičiaus ir skaičiavimuose naudojamos vidutinės temperatūros. Kitaip tariant, FVM įrenginio tūryje temperatūra kinta netolygiai, o matavimai atliekami tik tam tikruose būdinguosiuose taškuose, be to, realiomis sąlygomis veikianti sistema yra inertiška. Dėl šių priežasčių, analizuojant tiek eksperimentines FVM temperatūros kreives, tiek sukauptą šilumos kiekį, nestebimas aiškus, būdingas teoriniam fazės virsmo intervalas.

3.30 pav. pavaizduotas vidutinio FVM atiduoto šilumos kiekio pasiskirstymas atskirais temperatūros intervalais nuo 70 °C iki 85 °C. Temperatūra, kuriai esant atiduodamas didžiausias šilumos kiekis, atitinka FVM kietėjimo temperatūrą. Tiriamos FVM atveju kietėjimo intervalas yra 82–77 °C ir deklaruojamų verčių atveju šiame intervale stebimi didžiausi šilumos kiekiai. Eksperimentinės vertės, pavaizduotos histogramoje, parodo aštuonių iškrovimo proceso režimų vidurkį (SOL1–SOL8).

3.30 pav. FVM iškrovimo metu atiduotas šilumos kiekis (su standartiniu nuokrypiu)
Fig. 3.30. Energy released during the PCM discharging process (incl. standard deviation)

Iš 3.30 pav. matyti, kad atiduotas šilumos kiekis, apskaičiuotas atlikus eksperimentą, iškrovimo proceso pabaigoje sutampa (standartinio nuokrypio ribose) su deklaruojamu, išskyrus temperatūros intervalus 75 °C, 77 °C ir 78 °C. Proceso pradžioje, nuo 85 °C iki 80 °C, stebimos žymiai didesnės eksperimentinės vertės, t. y. su fazės virsmu siejamas šilumos kiekio padidėjimas fazės virsmo intervale (82–77 °C) stebimas anksčiau nei deklaruojamų verčių atveju. Taip pat atiduotas šilumos kiekis kinta priklausomai nuo veikimo režimo ir pagal standartinį nuokrypį matyti, kad svyravimas yra didesnis, esant aukštesnei FVM temperatūrai (iškrovimo proceso pradžioje).

Lyginant su FVM įkrovimo procesu (žr. 3.29 pav.), iškrovimo procese sukauptos šilumos kiekio kitimo profilis yra artimesnis deklaruojamam. Pagrindinė to priežastis yra didesnis temperatūrų skirtumas tarp šilumokaičio ir FVM, nes įkrovimo atveju tiekiamo šilumnešio temperatūra kinta intervale 20–30 °C, o iškrovimo atveju – 94–96,5 °C. Taip pat skirtumų atsiranda dėl FVM temperatūros matavimo tik tam tikruose būdinguosiuose taškuose bei prototipo testavimo, imituojant realias sąlygas, kai pasireiškia šiluminė inercija dėl FVM įrenginio komponentų.

Atsižvelgiant į šilumos kiekio pasiskirstymo analizę ir esamus skirtumus atskirais temperatūros intervalais, tikslinga palyginti suminius sukauptos ir atiduotos šilumos kiekius tarp skirtingų veikimo režimų ir deklaruojamų verčių. Tokiu atveju galima palyginti šilumos kiekius, neatsižvelgiant į jų kitimo profilį. Tam sudaroma per visą temperatūros intervalą nuo 70 °C iki 85 °C sukaupto / atiduoto šilumos kiekio histograma. FVM įkrovimo ir iškrovimo procese gauti rezultatai pavaizduoti 3.31 ir 3.32 paveiksluose.

3.31 pav. FVM sukauptas suminis šilumos kiekis skirtingų veikimo režimų metu

Fig. 3.31. PCM total absorbed heat during different operating modes

Iš 3.31 pav. matyti, kad suminis sukauptos šilumos kiekis yra mažiausias MEL1 ir MEL2 atvejais, kurių metu šilumnešio masinis debitas buvo mažiausias 0,1 kg/s (žr. 3.2 lentelę). Didžiausio šilumnešio masinio debito atveju (0,25 kg/s) stebimas didžiausias sukauptos šilumos kiekis.

3.32 pav. FVM atiduotas suminis šilumos kiekis skirtingų veikimo režimų metu

Fig. 3.32. PCM total released heat during different operating modes

3.32 pav. matyti, kad suminis atiduotos šilumos kiekis yra mažiausias SOL1 ir SOL5 atvejais, kurių metu šilumnešio masinis debitas atitinkamai buvo 0,1 kg/s ir 0,2 kg/s. (žr. 3.2 lentelę). Kaip ir FVM įkrovimo metu, didžiausio šilumnešio masinio debito atveju (0,25 kg/s) stebimas didžiausias atiduotos šilumos kiekis.

Skirtingų veikimo režimų ir deklaruojamų verčių palyginimas rodo, kad eksperimento metu gautas suminis šilumos kiekis priklauso nuo veikimo režimo ir FVM įkrovimo atveju yra artimesnis deklaruojamai vertei, lyginant su FVM iškrovimu. Skirtumus lemia skirtingos kraštinės sąlygos eksperimento metu ir atliekant DSK tyrimą, t. y. dalis šilumos sukaupiama FVM įrenginio konstrukcinėse medžiagose, šilumnešyje bei vyksta šilumos mainai su aplinka (šilumos nuostoliai). Atliekant DSK tyrimus, kuriais remdamasis gamintojas deklaruoja FVM šilumos kiekį, naudojamų FVM bandinių masė būna apie 10 mg bei užtikrinamos specialios aplinkos sąlygos, t. y. matavimas atliekamas inertinių dujų atmosferoje, užtikrinami minimalūs šilumos nuostoliai ir maža šiluminė inercija. Eksperimentiškai nustatant šilumos kiekį, rezultatų tikslumą taip pat veikia matavimo prietaisų paklaidos. Šiuo atveju didžiausią įtaką rezultatams turi temperatūros jutiklių tikslumas.

Atsižvelgiant į suminio šilumos kiekio skirtumus kiekvieno režimo atveju, tikslinga deklaruojamą šilumos kiekį palyginti su visų veikimo režimų šilumos kiekio vidurkiu (žr. 3.33 pav.).

3.33 pav. Vidutinis sukauptos ir atiduotos šilumos kiekis, vykstant FVM įkrovimo ir iškrovimo procesams (su standartiniu nuokrypiu)

Fig. 3.33. Average heat absorbed and released during PCM charging and discharging processes (incl. standard deviation)

Lyginant vidutines šilumos kiekio vertes matyti, kad eksperimentiškai nustatytas šilumos kiekis FVM įkrovimo procese yra 4,2 % didesnis už apskaičiuotą pagal deklaruojamą dalinę entalpiją (deklaruojamas 755 ± 57 kJ, eksperimentinis 787 ± 62 kJ). FVM iškrovimo atveju eksperimentiškai nustatytas šilumos kiekis yra 22,2 % didesnis už deklaruojamą (deklaruojamas 746 ± 56 kJ, eksperimentinis 913 ± 69 kJ). Taigi, FVM iškrovimo atveju stebimas didesnis skirtumas tarp deklaruojamos ir eksperimentinės reikšmės nei FVM įkrovimo metu. Pažymėtina, kad didesnis FVM įrenginio komponentuose sukaupiamo šilumos kiekio poveikis pasireiškia FVM iškrovimo procese. Kitaip tariant, FVM iškrovimo eksperimentas pradedamas FVM esant skystosios fazės, atitinkamai varinio šilumokaicio ir nerūdijančiojo plieno talpos temperatūra būna lygi FVM temperatūrai. Pradėjus tiekti šaltą šilumnešį, pirmiausia aušinamas šilumokaitis, tuomet FVM ir FVM įrenginio talpa. Eksperimentinio tyrimo metu tiksliai nustatyti įrenginio komponentuose sukaupimą šilumos kiekį sudėtinga, nes reikia išmatuoti šių dalių temperatūrą daugelyje taškų. Todėl įvertinama teoriškai (pagal 1.1 formulę), koks šilumos kiekis sukaupiamas, atsižvelgiant į FVM įrenginio komponentų medžiagas, medžiagų savitąją šilumą ir masę bei analizuojamą temperatūros intervalą. Šilumos kiekio skaičiavimo rezultatai pateikti 3.3 lentelėje.

3.3 lentelė. FVM įrenginio komponentuose sukauptas šilumos kiekis

Table 3.3. The amount of heat absorbed in the components of the PCM unit

FVM įrenginio komponentas	Medžiaga	Masė, kg	Medžiagos savitoji šiluma, kJ/kgK	Pradinė temperatūra, °C	Galutinė temperatūra, °C	Šilumos kiekis, kJ
Šilumokaitis	Varis	2,7	0,385	84	56	29,1
Korpusas (talpa)	Nerūdijantis plienas	13,2	0,502	85	70	99,4

Iš 3.3 lentelės ir 3.33 pav. matyti, kad iškrovimo metu FVM sukauptas šilumos kiekis sudaro 85,9 % (784 kJ) bendro eksperimento metu nustatyto šilumos kiekio. Atitinkamai šilumokaičio medžiagoje sukauptas šilumos kiekis sudaro 3,2 % (29,1 kJ), o korpuso medžiagoje – 10,9 % (99,4 kJ) bendro šilumos kiekio. Tokiu atveju FVM iškrovimo metu eksperimentiškai nustatytas šilumos kiekis yra 5,0 % didesnis už deklaruojamą.

Įvertinus sukaupto šilumos kiekio struktūrą ir standartinį nuokrypį, matyti, kad pagal FVM gamintojo pateiktą dalinės entalpijos pasiskirstymą ir pagal eksperimento duomenis apskaičiuotos vidutinio šilumos kiekio vertės yra artimos ir kinta paklaidų ribose, o gauti duomenys gali būti naudojami tolesniuose skaičiavimuose. Kitaip tariant, rezultatai patvirtina, kad proceso trukmė, pagal kurią apskaičiuotas šilumos kiekis, gali būti naudojama regresinėje analizėje. Gauti rezultatai taip pat rodo, kad skirtingose šilumokaičio vietose integruotų temperatūros jutiklių rodmenų vidurkis, pagal kurį skaičiuojama proceso trukmė, yra tinkamas parametras (kriterijus) sukauptos / atiduotos energijos kiekiui vertinti.

Remiantis gautais rezultatais, toliau atliekama eksperimentinių duomenų regresinė analizė, kurios tikslas yra parinkti FVM įkrovimo ir iškrovimo procesą atitinkantį modelį ir rasti procesą aprašančią lygtį. Remiantis gauta lygtimi, galima prognozuoti atsako reikšmę, t. y. įkrovimo ir iškrovimo proceso trukmę, pasirinkus kintamųjų (masinio debito ir temperatūros) vertes. Atlikus eksperimentinių duomenų analizę ir pritaikius *Matlab* duomenų apdorojimo paketą, buvo nustatytas regresijos modelis ir modelio lygties koeficientai. Atsakui prognozuoti taikoma antrojo laipsnio polinominė funkcija.

FVM įkrovimo atveju ryšys tarp nepriklausomųjų kintamųjų (šilumnešio masinio debito ir temperatūros) ir atsako (FVM įkrovimo trukmės) atvaizduojamas proceso atsako paviršiaus trimačiame modelyje (3.34 pav.).

3.34 pav. Tiekiamo šilumnešio temperatūros ir masinio debito įtaka FVM įkrovimo trukmei (3D atsako paviršius)

Fig. 3.34. Effect of HTF inlet temperature and mass flow rate on PCM charging time (3D response surface)

Iš 3.34 pav. matyti, kad FVM įkrovimo trukmė didėja, esant žemesnei tiekiamo šilumnešio temperatūrai ir mažesniai šilumnešio masiniam debitui. Tačiau, netgi esant didžiausiam masiniam debitui ir žemiausiai temperatūrai, įkrovimo trukmė skiriasi nežymiai, lyginant su mažesniais masiniais debitais. Pavyzdžiui, iš 3.34 pav. ir 3.2 lentelės matyti, kad šilumnešio debitui esant 0,1 kg/s ir temperatūrai 96,5 °C (MEL1), FVM įkrovimo procesas truko 17 min. Šilumnešio masinį debitą padidinus iki 0,25 kg/s, o temperatūrą sumažinus iki 94 °C (MEL7), įkrovimo proceso trukmė išliko beveik tokia pati 17,1 min. Tai reiškia, kad tiekiamo šilumnešio temperatūra turi žymiai didesnę poveikį proceso trukmei, lyginant su debitu. Tai paaiškinama didesniu temperatūrų skirtumu tarp šilumokaičio ir FVM, kuris lemia didesnę šilumos srautą.

Skirtingi veikimo režimai dvimačiame atsako paviršiuje (plokštumoje) pavaizduoti 3.35 paveiksle. Šiame grafike punktyrinė linija žymi FVM įkrovimo proceso trukmę (minutėmis), kuri yra gauta remiantis nustatytu regresijos modeliu. Kitaip tariant, šios kreivės vaizduoja prognozuojamą FVM įkrovimo proceso trukmę. Tai reiškia, kad eksperimentiškai nustatytos veikimo režimų MEL1–MEL8 proceso trukmės (žr. 3.2 lentelę) nežymiai skiriasi nuo 3.35 pav. kreivėmis pavaizduotų proceso trukmių. Šie skirtumai (liekanos) detalčiau pavaizduoti 3.36 paveiksle.

3.35 pav. Tiekiamo šilumnešio temperatūros ir masinio debito įtaka FVM įkrovimo trukmei (2D atsako paviršius)

Fig. 3.35. Effect of HTF inlet temperature and mass flow rate on PCM charging time (2D response surface)

FVM įkrovimo proceso empirinė lygtis, kuria aprašomi eksperimentiniai taškai (lygties koeficientai, esant 95 % pasiklioavimo tikimybei):

$$\tau_{\text{įkrovimas}} = 29,74 + 779,5 \cdot \dot{m} - 0,02023 \cdot T_{KV,T} + 265,1 \cdot \dot{m}^2 - 9,46 \cdot \dot{m} \cdot T_{KV,T}, \quad (3.1)$$

čia $\tau_{\text{įkrovimas}}$ – FVM įkrovimo proceso trukmė, min; $\dot{m}$ – tiekiamo šilumnešio masinis debitas, kg/s; $T_{KV,T}$ – vidutinė tiekiamo karšto šilumnešio temperatūra, °C.

Pateikta empirinė lygtis galioja tiekiamo šilumnešio temperatūros intervale 94–96,5 °C ir šilumnešio masinio debito intervale 0,1–0,25 kg/s. Remiantis šiuo regresijos modeliu galima prognozuoti, kad, pvz., esant maksimaliam šilumnešio debitui 0,25 kg/s ir didžiausiai temperatūrai 96,5 °C, įkrovimo proceso trukmė būtų 11 min. Priešingu atveju, esant mažiausiai temperatūrai ir debitui, prognozuojama įkrovimo trukmė 19,5 min.

Modelio tinkamumui įvertinti analizuojamos liekanos ir determinacijos koeficientas R^2 . Liekanos (liekamosios paklaidos) parodo atstumą tarp sudaryto paviršiaus ir eksperimentinių taškų. FVM įkrovimo atveju determinacijos koeficientas yra 0,9468, koreguotas determinacijos koeficientas yra 0,8758. Taigi, sudarytas modelis yra reikšmingas, nes gali paaiškinti 87,58 % atsako svyravimų.

FVM įkrovimo trukmės skirtumai (liekanos) tarp eksperimentinių duomenų (taškų) ir sudaryto proceso atsako paviršiaus pateikti 3.36 paveiksle. Didžiausias skirtumas tarp sudaryto paviršiaus ir eksperimentinio taško stebimas MEL3 atveju. Tai reiškia, kad prognozuojama proceso trukmė yra 0,76 min mažesnė už eksperimentinę. Mažiausias skirtumas stebimas MEL1 atveju, atitinkamai prog-

nozuojama reikšmė yra 0,1 min ilgesnė už eksperimentinę. Žemiau plokštumos (paviršiaus) esantys taškai (neigiamos vertės) reiškia, kad prognozuojamos reikšmės yra didesnės už eksperimentines.

3.36 pav. Liekanų pasiskirstymas, atsižvelgiant į paviršių (FVM iškrovimas)

Fig. 3.36. Residuals distribution relative to the surface (PCM charging)

FVM iškrovimo atveju, remiantis nustatytu regresijos modeliu, ryšys tarp nepriklausomųjų kintamųjų (šilumnešio masinio debito ir temperatūros) ir atsako (FVM iškrovimo trukmės) atvaizduojamas proceso atsako paviršiaus trimačiame modelyje (3.37 pav.).

Iš 3.37 pav. matyti, kad esant mažiausiam tiekiamo šalto šilumnešio masiniam debitui ir aukščiausiai temperatūrai, FVM iškrovimo proceso trukmė yra didžiausia, ir atvirkščiai, didžiausias masinis debitas ir mažiausia temperatūra užtikrina mažiausią proceso trukmę. Tai patvirtina šilumos mainų fiziką ir iš energijos balanso lygties 2.9 matyti, kad didesnis temperatūrų skirtumas tarp šilumnešio ir FVM bei didesnis šilumnešio debitas lemia didesnį šilumos srautą, kitaip tariant, greitesnį FVM iškrovimo procesą. Tačiau atkreiptinas dėmesys, kad tiekiamo šilumnešio temperatūra turi žymiai didesnį poveikį iškrovimo proceso trukmei nei debitas. Lyginat skirtingus testavimo režimus matyti, kad, pvz., SOL1 atveju procesas truko 5,02 min, o SOL8 – 4,82 min. Nors debitas buvo padidintas 2,5 karto (nuo 0,1 kg/s iki 0,25 kg/s), dėl aukštesnės šilumnešio temperatūros SOL8 atveju proceso trukmė sumažėjo tik 4 %.

3.37 pav. Tiekiamo šilumnešio temperatūros ir masinio debito įtaka FVM iškrovimo trukmei (3D atsako paviršius)

Fig. 3.37. Effect of HTF inlet temperature and mass flow rate on PCM discharging time (3D response surface)

Skirtingi FVM iškrovimo proceso veikimo režimai dvimačiame atsako paviršiuje (plokštumoje) pavaizduoti 3.38 paveiksle. Šiame grafike punktyrinė linija žymi FVM iškrovimo proceso trukmę (minutėmis), kuri yra gauta, remiantis nustatytu regresijos modeliu.

3.38 pav. Tiekiamo šilumnešio temperatūros ir masinio debito įtaka FVM iškrovimo trukmei (2D atsako paviršius)

Fig. 3.38. Effect of HTF inlet temperature and mass flow rate on PCM discharging time (2D response surface)

FVM iškrovimo proceso empirinė lygtis, kuria aprašomi eksperimentiniai taškai (lygties koeficientai, esant 95 % pasiklioavimo tikimybei):

$$\tau_{\text{iškrovimas}} = 5,366 - 12,95 \cdot \dot{m} - 0,006467 \cdot T_{\text{šV}, T} - 22,66 \cdot \dot{m}^2 + 0,6018 \cdot \dot{m} \cdot T_{\text{šV}, T}, \quad (3.2)$$

čia $\tau_{\text{iškrovimas}}$ – FVM iškrovimo proceso trukmė, min; $\dot{m}$ – tiekiamo šilumnešio masinis debitas, kg/s; $T_{\text{šV}, T}$ – vidutinė tiekiamo šalto šilumnešio temperatūra, °C.

Pateikta empirinė lygtis galioja tiekiamo šalto šilumnešio temperatūros intervale 20–30 °C ir šilumnešio masinio debito intervale 0,1–0,25 kg/s. Remiantis šiuo regresijos modeliu, galima prognozuoti, kad, pvz., esant didžiausiam šilumnešio debitui 0,25 kg/s ir mažiausiai temperatūrai 20 °C, FVM iškrovimo procesas truktų 3,6 min. Priešingu atveju, esant didžiausiai temperatūrai ir mažiausiam debitui, prognozuojama iškrovimo trukmė 5,5 min. Atkreiptinas dėmesys, kad lyginant su įkrovimo procesu, FVM iškrovimo atveju stebimas tiek trumpesnis procesas, tiek mažesnis skirtumas tarp skirtingų veikimo režimų. Pagrindinė to priežastis yra didesnis temperatūrų skirtumas tarp tiekiamo šalto šilumnešio ir FVM.

FVM iškrovimo atveju determinacijos koeficientas yra 0,9862, koreguotas determinacijos koeficientas – 0,9679. Taigi, sudarytas modelis yra reikšmingas, nes gali paaiškinti 96,79 % atsako svyravimų. FVM iškrovimo trukmės skirtumai (liekanos) tarp eksperimentinių duomenų (taškų) ir sudaryto proceso atsako paviršiaus pateikti 3.39 paveiksle.

3.39 pav. Liekanų pasiskirstymas, atsižvelgiant į paviršių (FVM iškrovimas)
Fig. 3.39. Residuals distribution relative to the surface (PCM discharging)

Iš 3.39 pav. matyti, kad FVM iškrovimo atveju skirtumai tarp liekanų ir atsako paviršiaus yra žymiai mažesni, lyginant su įkrovimu (3.36 pav.). Didžiausias skirtumas stebimas SOL1 atveju ir tai reiškia, kad prognozuojama proceso trukmė yra 0,06 min mažesnė už eksperimentinę. Mažiausias skirtumas stebimas SOL4 atveju, atitinkamai prognozuojama reikšmė yra 0,02 min trumpesnė už eksperimentinę. Žemiau plokštumos (paviršiaus) esantys taškai reiškia, kad prognozuojamos reikšmės yra didesnės už eksperimentines.

3.7. Trečiojo skyriaus išvados

1. Atlikus skaitinį modeliavimą nustatyta, kad per nagrinėjamąjį laikotarpį (1000 s) tiriamojo FVM tūrio išoriniuose sluoksniuose fazės virsmas neįvyksta, tačiau temperatūra pasiekia FVM lydymosi temperatūros intervalo pradinę ribą (75 °C). Atsižvelgiant į skystosios fazės tūrio dalies kitimą, nustatytas didelis skirtumas tarp atskirų matavimo taškų: tarp šilumokaicio plokštelių esančiame matavimo taške po 130 s nuo proceso pradžios sukaupiama 100 % fazinio virsmo šilumos, taške, nutolusiame nuo šilumokaicio, proceso pabaigoje (po 1000 s) sukaupiama 70 % fazinio virsmo šilumos.

2. Atlikus natūralios konvekcijos tyrimą nustatyta, kad, taikant skirtingas analitines išraiškas, gauti rezultatai yra artimesni eksperimentiniams, kai pasirinktas būdingasis matmuo yra atstumas tarp šilumokaicio plokštelių (kanalo plotis S). Šiuo atveju šilumos atidavimo koeficientas yra α ($S = 0,01$ m) – 68 W/m²K, o eksperimentinė vertė yra α (eksp.) – 61 W/m²K. Būdinguoju matmeniu pasirinkus plokštelės aukštį, stebima didesnė α vertė, kurios vidurkis per visą įkrovimo procesą yra α ($L = 0,139$ m) – 92 W/m²K. Nustatyta, kad vidutinė α vertė eksperimento metu, temperatūrai viršijus 86 °C, didėja, o tai yra priešinga teoriniams skaičiavimams. Šiam skirtumui įtaką daro FVM dinaminė klampa, kuri kylant temperatūrai mažėja ir intensyvina natūralią konvekciją. Siekiant tiksliau įvertinti dinaminės klamos įtaką šilumos mainų procesui, vykstant natūraliai konvekcijai, turi būti nustatoma FVM dinaminės klamos priklausomybė nuo temperatūros.

3. Atlikus FVM įrenginio dviejų skirtingų šilumokaicio geometrijų eksperimentinį palyginimą, nustatyta, kad, vertinant pagal vidutinę FVM temperatūrą, lydymosi procesas FVM2 įrenginyje yra 20 % trumpesnis nei FVM1. FVM2 atveju stebimas didesnis vidutinis šilumos srautas: FVM1 – 1,98 kW, FVM2 – 2,03 kW. Vertinant pagal vidutinę FVM temperatūrą nustatyta, kad FVM1 atveju kietėjimo procesas vyksta lėčiau nei FVM2, proceso trukmė yra atitinkamai 1,25 min ir 0,25 min. Tačiau vidutinis šilumos srautas per visą iškrovimo procesą FVM1 atveju yra didesnis: FVM1 – 2,23 kW, FVM2 – 2,17 kW.

4. Vertinant pagal vidutinę FVM temperatūrą, nustatyta, kad, FVM įkrovimo atveju sumažinus šilumnešio masinį debitą nuo didžiausio (0,25 kg/s) iki vidutinio (0,125 kg/s), fazės virsmas vyksta 0,4 min ilgiau, o, sumažinus debitą iki mažiausio (0,05 kg/s), – 4,1 min ilgiau. Iškrovimo procese sumažinus šilumnešio debitą nuo 0,25 kg/s iki 0,125 kg/s, fazės virsmas vyksta 0,3 min ilgiau, o, sumažinus iki 0,05 kg/s, – 0,9 min ilgiau.

5. FVM tankio pokyčio analizė parodė, kad šilumokaičio šilumos srauto tankis, esant atviram ir uždaram veikimo režimui, skiriasi labai nežymiai tiek FVM įkrovimo, tiek iškrovimo procese. Vertinant įkrovimo procesą pagal vidutinę FVM temperatūrą, nustatyta, kad fazės virsmas uždaro veikimo režimo metu įvyko 0,4 min greičiau, lyginant su atviru veikimo režimu. Iškrovimo procesas uždaro veikimo režimo metu įvyko 0,1 min greičiau, lyginant su atviru veikimo režimu. Analizuojant fazės virsmo trukmę atskiruose matavimo taškuose, stebima tokia pati tendencija: FVM įkrovimo ir iškrovimo trukmė yra mažesnė uždaro režimo atveju.

6. Atliekant FVM šilumos kaupimo įrenginio įkrovimo ir iškrovimo trukmės prognozavimą pagal eksperimentų duomenis, nustatyta, kad nurodytame temperatūros intervale vidutinis sukauptos šilumos kiekis eksperimento metu gaunamas 4,2 % didesnis, o atiduotos 5,0 % didesnis už deklaruojamą. Taip pat nustatyta, kad FVM įkrovimo atveju proceso trukmė yra vidutiniškai 3,3 karto ilgesnė, lyginant su iškrovimo procesu. Iškrovimo atveju didžiausias proceso trukmės skirtumas tarp skirtingų veikimo režimų yra 1,0 min, įkrovimo atveju – 4,4 min.

Bendrosios išvados

1. Mokslinių tyrimų analizės pagrindu parengta FVM šilumos kaupimo įrenginio tyrimų metodika, kuri, atliekant analitinius skaičiavimus, skaitinį modeliavimą, eksperimentinius tyrimus ir rezultatų lyginamąją analizę, leidžia kompleksiskai analizuoti bei įvertinti FVM termofizikinių savybių, šilumokaičio geometrijos ir šilumnešio parametrų įtaką įrenginio veikimo charakteristikoms.

2. Taikant FVM šilumos kaupimo įrenginio skaitinį modelį, patikrinta kuriamo įrenginio pradinės geometrijos atitiktis projektiniams reikalavimams, analizuojant temperatūros pasiskirstymą ir fazės virsmo procesą skirtingose šilumokaičio srityse. Tariamąsios savitosios šilumos metodo taikymas įgalina modeliuoti fazės virsmą be FVM skirtingų fazių sandūros sluoksnio padėties nustatymo. Atsižvelgiant į modeliavimo rezultatus, parengtos dvi FVM įrenginio šilumokaičio versijos eksperimentiniams tyrimams.

3. Parengtame eksperimentinių tyrimų stende atliktas skirtingų FVM šilumos kaupimo įrenginio prototipų veikimo režimų imitavimas:

3.1. Atlikus šilumos atidavimo koeficiento tyrimą, nustatyta, kad, būdingu ju matmeniu pasirinkus atstumą tarp šilumokaičio plokštelių, teoriniai rezultatai gaunami artimesni eksperimentiniams ir teorinė vertė yra vidutiniškai 11,5 % didesnė už eksperimentinę. Tai rodo, kad tiriamojo šilumokaičio šilumos atidavimo koeficiento nustatymui gali būti taikoma kanale (tarp dviejų vertikalių

šilumokaičio plokštelių) vykstančios natūralios konvekcijos skaičiavimo metodika.

3.2. Atsižvelgiant į FVM įrenginio šilumokaičio geometriją, vykstant įkrovimo procesui, FVM2 atveju stebimas vidutiniškai 2,5 % didesnis šilumos srautas, lyginant su FVM1. Vykstant iškrovimui, vidutinis šilumos srautas per visą iškrovimo procesą FVM1 atveju yra 2,7 % didesnis nei FVM2.

3.3. Ištyrus šilumnešio masinio debito įtaką FVM įrenginio veikimo charakteristikoms, nustatyta, kad, lyginant su didžiausiu nagrinėjamu debitu (0,25 kg/s), esant vidutiniam debitui (0,125 kg/s), fazės virsmo trukmė padidėja 6,5 % įkrovimo atveju ir 17,2 % iškrovimo atveju. Esant mažiausiam debitui (0,05 kg/s) – 60,7 % įkrovimo atveju ir 48,3 % iškrovimo atveju. Tai reiškia, kad skirtumas tarp didžiausio ir vidutinio šilumnešio masinių debitų nežymiai veikia fazės virsmo trukmę, o debitą sumažinus iki mažiausio, stebima didesnė debito įtaka fazės virsmo trukmei.

3.4. Atlikus FVM tankio pokyčio tyrimą, nustatyta, kad fazės virsmui vykstant uždaramame tūryje, kuriame didėja oro slėgis, fazės virsmo trukmė yra 3,2 % mažesnė įkrovimo atveju ir 1,7 % mažesnė iškrovimo atveju. Tai rodo, kad, fazinio virsmo medžiagos laisvąjį paviršių veikiant slėgiu, pagreitėja FVM įkrovimo ir iškrovimo procesas.

4. Eksperimentinių tyrimų pagrindu sudarytas regresijos modelis, kuris leidžia prognozuoti FVM šilumos kaupimo įrenginio įkrovimo ir iškrovimo trukmę priklausomai nuo tiekiamo šilumnešio temperatūros ir masinio debito. Remiantis vidutine FVM temperatūra, nustatyta, kad nurodytame temperatūros intervale vidutinis sukauptos šilumos kiekis eksperimento metu yra 4,2 % didesnis, o atiduotos 5,0 % didesnis už deklaruojamą. Šie rezultatai rodo, kad vidutinė FVM temperatūra yra tinkamas kriterijus įrenginio įkrovimo ir iškrovimo trukmei bei lygiui nustatyti. Gautas regresijos modelis gali būti taikomas FVM įrenginių projektavimo metu ir veikimo optimizavimo uždaviniams spręsti.

Literatūra ir šaltiniai

- Abdulateef, A. M., Abdulateef, J., Mat, S., Sopian, K., Elhub, B., & Mussa, M. A. (2018). Experimental and numerical study of solidifying phase-change material in a triplex-tube heat exchanger with longitudinal/triangular fins. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 90, 73–84. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2017.10.003>
- Agarwal, A., & Sarviya, R. M. (2017). Characterization of Commercial Grade Paraffin wax as Latent Heat Storage material for Solar dryers. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 779–789. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.01.086>
- Agyenim, F., Hewitt, N., Eames, P., & Smyth, M. (2010). A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 615–628. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.015>
- Akgün, M., Aydın, O., & Kaygusuz, K. (2007). Experimental study on melting/solidification characteristics of a paraffin as PCM. *Energy Conversion and Management*, 48(2), 669–678. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.05.014>
- Al-Abidi, A. A., Mat, S., Sopian, K., Sulaiman, M. Y., & Mohammad, A. T. (2013). Internal and external fin heat transfer enhancement technique for latent heat thermal energy storage in triplex tube heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 53(1), 147–156. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.01.011>

Ali, S., & Deshmukh, S. P. (2020). An overview: Applications of thermal energy storage using phase change materials. *Materials Today: Proceedings*, 26, 1231–1237. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.247>

Amagour, M. E. H., Rachek, A., Bennajah, M., & Ebn Touhami, M. (2018). Experimental investigation and comparative performance analysis of a compact finned-tube heat exchanger uniformly filled with a phase change material for thermal energy storage. *Energy Conversion and Management*, 165(March), 137–151. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.041>

Avci, M., & Yazici, M. Y. (2013). Experimental study of thermal energy storage characteristics of a paraffin in a horizontal tube-in-shell storage unit. *Energy Conversion and Management*, 73, 271–277. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.04.030>

Bar-Cohen, A., & Rohsenow, W. M. (1984). Thermally optimum spacing of vertical, natural convection cooled, parallel plates. *Journal of Heat Transfer*, 106, 116–123.

Bechiri, M., & Mansouri, K. (2015). Analytical solution of heat transfer in a shell-and-tube latent thermal energy storage system. *Renewable Energy*, 74, 825–838. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.09.010>

Besagni, G., & Croci, L. (2019). Experimental study of a pilot-scale fin-and-tube phase change material storage. *Applied Thermal Engineering*, 160(July), 114089. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114089>

Cabeza, L. F., Zsembinszki, G., & Martín, M. (2020). Evaluation of volume change in phase change materials during their phase transition. *Journal of Energy Storage*, 28 (January), 101206. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101206>

Calderón, A., Barreneche, C., Hernández-Valle, K., Galindo, E., Segarra, M., & Fernández, A. I. (2020). Where is Thermal Energy Storage (TES) research going? – A bibliometric analysis. *Solar Energy*, 200(January 2019), 37–50. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.050>

Castell, A., Solé, C., Medrano, M., Roca, J., Cabeza, L. F., & García, D. (2008). Natural convection heat transfer coefficients in phase change material (PCM) modules with external vertical fins. *Applied Thermal Engineering*, 28(13), 1676–1686. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.11.004>

Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2015). *Heat and mass transfer: Fundamentals and applications* (5th ed.). McGraw-Hill Education.

Chalkia, V., Tachos, N., Pandis, P. K., Giannakas, A., Koukou, M. K., Vrachopoulos, M. G., Coelho, L., Ladavos, A., & Stathopoulos, V. N. (2018). Influence of organic phase change materials on the physical and mechanical properties of HDPE and PP polymers. *RSC Advances*, 8(48), 27438–27447. <https://doi.org/10.1039/c8ra03839b>

Chiew, J., Chin, C. S., Jia, J., Toh, W. D., & Gao, Z. (2017). Effects of void spaces in a phase change material based thermal energy storage system. *Energy Procedia*, 143, 559–565. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.727>

Chiew, J., Chin, C. S., Toh, W. D., Gao, Z., & Jia, J. (2019). Thermal state-of-expansion or melting of phase change material based heat sink for underwater battery power system. *Journal of Energy Storage*, 26(July). <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100956>

- Churchill, S. W., & Chu, H. H. S. (1975). Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 18(11), 1323–1329. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(75\)90243-4](https://doi.org/10.1016/0017-9310(75)90243-4)
- Dallaire, J., & Gosselin, L. (2016). Various ways to take into account density change in solid–liquid phase change models: Formulation and consequences. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 103, 672–683. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.07.045>
- Deng, S., Nie, C., Wei, G., & Ye, W.-B. (2019). Improving the melting performance of a horizontal shell-tube latent-heat thermal energy storage unit using local enhanced finned tube. *Energy and Buildings*, 183, 161–173. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.11.018>
- Doerte, L., Tamme, S. W., Wörner, R., & Zunft, A. (2012). Advances in thermal energy storage development at the German Aerospace Center (DLR). *Energy Storage Science and Technology*, 1, 13–25. <http://www.energystorage-journal.com/EN/Y2012/V1/I1/13>
- Elarem, R., Alqahtani, T., Mellouli, S., Askri, F., Edacherian, A., Vineet, T., Badruddin, I. A., & Abdelmajid, J. (2020). A comprehensive review of heat transfer intensification methods for latent heat storage units. *Energy Storage*, October, 1–30. <https://doi.org/10.1002/est2.127>
- Eslamnezhad, H., & Rahimi, A. B. (2017). Enhance heat transfer for phase-change materials in triplex tube heat exchanger with selected arrangements of fins. *Applied Thermal Engineering*, 113, 813–821. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.067>
- EU strategy. (2016). *An EU strategy on heating and cooling*. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/1_EN_ACT_part1_v14.pdf
- Fadl, M., & Eames, P. C. (2019). An experimental investigation of the heat transfer and energy storage characteristics of a compact latent heat thermal energy storage system for domestic hot water applications. *Energy*, 188, 116083. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116083>
- Fang, Y., Niu, J., & Deng, S. (2018). Numerical analysis for maximizing effective energy storage capacity of thermal energy storage systems by enhancing heat transfer in PCM. *Energy and Buildings*, 160, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.12.006>
- Fornarelli, F., Camporeale, S. M., & Fortunato, B. (2019). Simplified theoretical model to predict the melting time of a shell-and-tube LHTES. *Applied Thermal Engineering*, 153(January), 51–57. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.02.130>
- Gadgil, A., & Gobin, D. (1984). Analysis of Two-Dimensional Melting in Rectangular Enclosures in Presence of Convection. *Journal of Heat Transfer*, 106(1), 20–26. <https://doi.org/10.1115/1.3246636>
- Gasia, J., Diriken, J., Bourke, M., Van Bael, J., & Cabeza, L. F. (2017). Comparative study of the thermal performance of four different shell-and-tube heat exchangers used as latent heat thermal energy storage systems. *Renewable Energy*, 114, 934–944. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.07.114>
- Gil, A., Medrano, M., Martorell, I., Lázaro, A., Dolado, P., Zalba, B., & Cabeza, L. F. (2010). State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation.

Part 1-Concepts, materials and modellization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 31–55. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.035>

Guelpa, E., & Verda, V. (2019). Thermal energy storage in district heating and cooling systems: A review. *Applied Energy*, 252(June), 113474. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113474>

Hale, N. W., & Viskanta, R. (1978). Photographic observation of the solid-liquid interface motion during melting of a solid heated from an isothermal vertical wall. *Letters in Heat and Mass Transfer*, 5(6), 329–337.

Han, G.-S., Ding, H.-S., Huang, Y., Tong, L.-G., & Ding, Y.-L. (2017). A comparative study on the performances of different shell-and-tube type latent heat thermal energy storage units including the effects of natural convection. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 88, 228–235. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2017.09.009>

Hernández-Cooper, E. M., & Otero, J. A. (2019). Effects of pressure-induced density changes in the thermal energy absorbed by a micro-encapsulated phase-change material. *Molecules*, 24(7). <https://doi.org/10.3390/molecules24071254>

Himran, S., Suwono, A., & Mansoori, G. A. (1994). Characterization of alkanes and paraffin waxes for application as phase change energy storage medium. *Energy Sources*, 16(1), 117–128. <https://doi.org/10.1080/00908319408909065>

Hofmann, R., Dusek, S., Gruber, S., & Drexler-Schmid, G. (2019). Design Optimization of a Hybrid Steam-PCM Thermal Energy Storage for Industrial Applications. *Energies*, 12(5), 898. <https://doi.org/10.3390/en12050898>

Hosseini, M. J., Rahimi, M., & Bahrampoury, R. (2014). Experimental and computational evolution of a shell and tube heat exchanger as a PCM thermal storage system. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 50, 128–136. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.11.008>

Hosseini, M. J., Ranjbar, A. A., Sedighi, K., & Rahimi, M. (2012). A combined experimental and computational study on the melting behavior of a medium temperature phase change storage material inside shell and tube heat exchanger. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39(9), 1416–1424. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.07.028>

Hu, Y., Li, D., Shu, S., & Niu, X. (2017). Lattice Boltzmann simulation for three-dimensional natural convection with solid-liquid phase change. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 113, 1168–1178. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.05.116>

Ibrahim, N. I., Al-Sulaiman, F. A., Rahman, S., Yilbas, B. S., & Sahin, A. Z. (2017). Heat transfer enhancement of phase change materials for thermal energy storage applications: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74(January), 26–50. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.169>

IEA-ETSAP and IRENA. (2013). *Thermal energy storage: Technology brief*. <https://www.irena.org/publications/2013/Jan/Thermal-energy-storage>

IRENA. (2020). *Innovation Outlook: Thermal Energy Storage*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. <https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Innovation-outlook-Thermal-energy-storage>

Janghel, D., Saha, S. K., & Karagadde, S. (2020). Effect of shrinkage void on thermal performance of pure and binary phase change materials based thermal energy storage system: A semi-analytical approach. *Applied Thermal Engineering*, 167(November), 114706. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114706>

Joybari, M. M., Haghighat, F., & Seddegh, S. (2017). Natural convection characterization during melting of phase change materials: Development of a simplified front tracking method. *Solar Energy*, 158, 711–720. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.10.031>

Kabbara, M., Groulx, D., & Joseph, A. (2016). Experimental investigations of a latent heat energy storage unit using finned tubes. *Applied Thermal Engineering*, 101, 601–611. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.12.080>

Kalapala, L., & Devanuri, J. K. (2018). Influence of operational and design parameters on the performance of a PCM based heat exchanger for thermal energy storage – A review. *Journal of Energy Storage*, 20(July), 497–519. <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.10.024>

Kamkari, B., & Groulx, D. (2018). Experimental investigation of melting behaviour of phase change material in finned rectangular enclosures under different inclination angles. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 97(March), 94–108. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.04.007>

Kamkari, B., & Shokouhmand, H. (2014). Experimental investigation of phase change material melting in rectangular enclosures with horizontal partial fins. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 78, 839–851. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.07.056>

Kandasamy, R., Wang, X. Q., & Mujumdar, A. S. (2008). Transient cooling of electronics using phase change material (PCM)-based heat sinks. *Applied Thermal Engineering*, 28(8–9), 1047–1057. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.06.010>

Khan, Z., & Khan, Z. A. (2017). An experimental investigation of discharge/solidification cycle of paraffin in novel shell and tube with longitudinal fins based latent heat storage system. *Energy Conversion and Management*, 154, 157–167. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.10.051>

Khan, Z., Khan, Z., & Ghaffoor, A. (2016). A review of performance enhancement of PCM based latent heat storage system within the context of materials, thermal stability and compatibility. *Energy Conversion and Management*, 115, 132–158. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.045>

Khan, Z., Khan, Z., & Tabeshf, K. (2016). Parametric investigations to enhance thermal performance of paraffin through a novel geometrical configuration of shell and tube latent thermal storage system. *Energy Conversion and Management*, 127, 355–365. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.09.030>

- Koukou, M. K., Dogkas, G., Vrachopoulos, M. G., Konstantaras, J., Pagkalos, C., Stathopoulos, V. N., Pandis, P. K., Lymperis, K., Coelho, L., & Rebola, A. (2020). Experimental assessment of a full scale prototype thermal energy storage tank using paraffin for space heating application. *International Journal of Thermofluids*, 1–2, 100003. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2019.100003>
- Kunkel, S., Teumer, T., Dörnhöfer, P., Schlachter, K., Weldeslasie, Y., Kühr, M., Rädle, M., & Repke, J. (2018). Determination of heat transfer coefficients in direct contact latent heat storage systems. *Applied Thermal Engineering*, 145, 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.09.015>
- Lacroix, M., & Benmadda, M. (1997). Numerical simulation of natural convection-dominated melting and solidification from a finned vertical wall. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 31(1), 71–86. <https://doi.org/10.1080/10407789708914026>
- Lamberg, P. (2004). Approximate analytical model for two-phase solidification problem in a finned phase-change material storage. *Applied Energy*, 77(2), 131–152. [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(03\)00106-5](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(03)00106-5)
- Lázaro, A., Zalba, B., Bobi, M., Castellón, C., & Cabeza, L. F. (2006). Experimental study on phase change materials and plastics compatibility. *AIChE Journal*, 52(2), 804–808. <https://doi.org/10.1002/aic.10643>
- Li, T. X., Wu, D. L., He, F., & Wang, R. Z. (2017). Experimental investigation on copper foam/hydrated salt composite phase change material for thermal energy storage. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 115, 148–157. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.07.056>
- Liang, H., Niu, J., & Gan, Y. (2020). Performance optimization for shell-and-tube PCM thermal energy storage. *Journal of Energy Storage*, 30(December 2019), 101421. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101421>
- Lin, W., Wang, Q., Fang, X., Gao, X., & Zhang, Z. (2018). Experimental and numerical investigation on the novel latent heat exchanger with paraffin/expanded graphite composite. *Applied Thermal Engineering*, 144, 836–844. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.08.103>
- Liu, L., Su, D., Tang, Y., & Fang, G. (2016). Thermal conductivity enhancement of phase change materials for thermal energy storage: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 305–317. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.057>
- Mahdi, J. M., Lohrasbi, S., Ganji, D. D., & Nsofor, E. C. (2019). Simultaneous energy storage and recovery in the triplex-tube heat exchanger with PCM, copper fins and Al₂O₃ nanoparticles. *Energy Conversion and Management*, 180(November 2018), 949–961. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.11.038>
- Mahdi, M. S., Hasan, A. F., Mahood, H. B., Campbell, A. N., Khadom, A. A., Karim, A. M. A., & Sharif, A. O. (2019). Numerical study and experimental validation of the effects of orientation and configuration on melting in a latent heat thermal storage unit. *Journal of Energy Storage*, 23(April), 456–468. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.04.013>

- Mat, S., Al-Abidi, A. A., Sopian, K., Sulaiman, M. Y., & Mohammad, A. T. (2013). Enhance heat transfer for PCM melting in triplex tube with internal-external fins. *Energy Conversion and Management*, 74, 223–236. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.05.003>
- Mazhar, A. R., Shukla, A., & Liu, S. (2020). Numerical analysis of rectangular fins in a PCM for low-grade heat harnessing. *International Journal of Thermal Sciences*, 152, 106306. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106306>
- Mazzeo, D., Oliveti, G., de Gracia, A., Coma, J., Solé, A., & Cabeza, L. F. (2017). Experimental validation of the exact analytical solution to the steady periodic heat transfer problem in a PCM layer. *Energy*, 140, 1131–1147. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.08.045>
- Medrano, M., Yilmaz, M. O., Nogués, M., Martorell, I., Roca, J., & Cabeza, L. F. (2009). Experimental evaluation of commercial heat exchangers for use as PCM thermal storage systems. *Applied Energy*, 86(10), 2047–2055. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.01.014>
- Mehling, H., & Cabeza, L. F. (2008). *Heat and Cold Storage with PCM: An Up to Date Introduction Into Basics and Applications*. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-68557-9>
- Mehta, D. S., Solanki, K., Rathod, M. K., & Banerjee, J. (2019). Thermal performance of shell and tube latent heat storage unit: Comparative assessment of horizontal and vertical orientation. *Journal of Energy Storage*, 23(January), 344–362. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.03.007>
- Merlin, K., Soto, J., Delaunay, D., & Traonvouez, L. (2016). Industrial waste heat recovery using an enhanced conductivity latent heat thermal energy storage. *Applied Energy*, 183, 491–503. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.007>
- Mosaffa, A. H., Talati, F., Basirat Tabrizi, H., & Rosen, M. A. (2012). Analytical modeling of PCM solidification in a shell and tube finned thermal storage for air conditioning systems. *Energy and Buildings*, 49, 356–361. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.053>
- Mostafavi, A., Parhizi, M., & Jain, A. (2020). Semi-analytical thermal modeling of transverse and longitudinal fins in a cylindrical phase change energy storage system. *International Journal of Thermal Sciences*, 153(February), 106352. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106352>
- Nazir, H., Batool, M., Bolivar Osorio, F. J., Isaza-Ruiz, M., Xu, X., Vignarooban, K., Phelan, P., Inamuddin, & Kannan, A. M. (2019). Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 129, 491–523. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.126>
- Nóbrega, C. R. E. S., Ismail, K. A. R., & Lino, F. A. M. (2019). Correlations for predicting the performance of axial finned tubes submersed in PCM. *Journal of Energy Storage*, 26(September), 100973. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100973>
- Peng, B., Huang, G., Wang, P., Li, W., Chang, W., Ma, J., & Li, C. (2019). Effects of thermal conductivity and density on phase change materials-based thermal energy storage systems. *Energy*, 172, 580–591. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.147>

- Pereira da Cunha, J., & Eames, P. (2016). Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials – A review. *Applied Energy*, 177(September), 227–238. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.097>
- Proell, S. D., Wall, W. A., & Meier, C. (2020). On phase change and latent heat models in metal additive manufacturing process simulation. *Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences*, 7(1), 24. <https://doi.org/10.1186/s40323-020-00158-1>
- Rathod, M. K., & Banerjee, J. (2013). Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 246–258. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.022>
- Raul, A., Jain, M., Gaikwad, S., & Saha, S. K. (2018). Modelling and experimental study of latent heat thermal energy storage with encapsulated PCMs for solar thermal applications. *Applied Thermal Engineering*, 143, 415–428. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.123>
- Raul, A. K., Bhavsar, P., & Saha, S. K. (2018). Experimental study on discharging performance of vertical multitube shell and tube latent heat thermal energy storage. *Journal of Energy Storage*, 20(June), 279–288. <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.09.022>
- Riahi, S., Saman, W. Y., Bruno, F., Belusko, M., & Tay, N. H. S. (2018). Performance comparison of latent heat storage systems comprising plate fins with different shell and tube configurations. *Applied Energy*, 212(August 2017), 1095–1106. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.109>
- Righetti, G., Lazzarin, R., Noro, M., & Mancin, S. (2019). Phase change materials embedded in porous matrices for hybrid thermal energy storages: Experimental results and modeling. *International Journal of Refrigeration*, 106, 266–277. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.06.018>
- Rubitherm. (2016). *Rubitherm Technologies GmbH. Data Sheet RT82*. https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_-_RT82_EN_09102020.PDF
- Saeed, R. M., Schlegel, J. P., Sawafta, R., & Kalra, V. (2019). Plate type heat exchanger for thermal energy storage and load shifting using phase change material. *Energy Conversion and Management*, 181, 120–132. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.013>
- Sarwar, J., & Mansoor, B. (2016). Characterization of thermophysical properties of phase change materials for non-membrane based indirect solar desalination application. *Energy Conversion and Management*, 120, 247–256. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.05.002>
- Sciacovelli, A., Gagliardi, F., & Verda, V. (2015). Maximization of performance of a PCM latent heat storage system with innovative fins. *Applied Energy*, 137, 707–715. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.015>
- Seddegh, S., Joybari, M. M., Wang, X., & Haghighat, F. (2017). Experimental and numerical characterization of natural convection in a vertical shell-and-tube latent thermal energy storage system. *Sustainable Cities and Society*, 35(August), 13–24. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.07.024>

- Seddegh, S., Wang, X., & Henderson, A. D. (2016). A comparative study of thermal behaviour of a horizontal and vertical shell-and-tube energy storage using phase change materials. *Applied Thermal Engineering*, 93, 348–358. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.107>
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318–345. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>
- Shon, J., Kim, H., & Lee, K. (2014). Improved heat storage rate for an automobile coolant waste heat recovery system using phase-change material in a fin-tube heat exchanger. *Applied Energy*, 113, 680–689. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.049>
- Singh, R. P., Xu, H., Kaushik, S. C., Rakshit, D., & Romagnoli, A. (2019). Effective utilization of natural convection via novel fin design & influence of enhanced viscosity due to carbon nano-particles in a solar cooling thermal storage system. *Solar Energy*, 183, 105–119. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.005>
- Singh, R., Sadeghi, S., & Shabani, B. (2018). Thermal Conductivity Enhancement of Phase Change Materials for Low-Temperature Thermal Energy Storage Applications. *Energies*, 12(1), 75. <https://doi.org/10.3390/en12010075>
- Solé, A., Miró, L., Barreneche, C., Martorell, I., & Cabeza, L. F. (2013). Review of the T-history method to determine thermophysical properties of phase change materials (PCM). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 425–436. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.066>
- Soni, V., Kumar, A., & Jain, V. K. (2018). Modeling of PCM melting: Analysis of discrepancy between numerical and experimental results and energy storage performance. *Energy*, 150, 190–204. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.097>
- Souayfane, F., Biwole, P. H., & Fardoun, F. (2018). Melting of a phase change material in presence of natural convection and radiation: A simplified model. *Applied Thermal Engineering*, 130, 660–671. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.026>
- Sun, X., Chu, Y., Mo, Y., Fan, S., & Liao, S. (2018). Experimental investigations on the heat transfer of melting phase change material (PCM). *Energy Procedia*, 152, 186–191. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.09.079>
- Sun, X., Zhang, Q., Medina, M. A., & Lee, K. O. (2016). Experimental observations on the heat transfer enhancement caused by natural convection during melting of solid-liquid phase change materials (PCMs). *Applied Energy*, 162, 1453–1461. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.078>
- SusPIRE. (2019). *Sustainable Production of Industrial Recovered Energy using energy dissipative and storage technologies*. <https://cordis.europa.eu/project/id/680169>
- Szekely, J., & Chhabra, P. S. (1970). The effect of natural convection on the shape and movement of the melt-solid interface in the controlled solidification of lead. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1(5), 1195–1203. <https://doi.org/10.1007/BF02900231>

Tay, N. H. S., Bruno, F., & Belusko, M. (2012). Experimental validation of a CFD model for tubes in a phase change thermal energy storage system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(4), 574–585. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.10.054>

Tay, N. H. S., Bruno, F., & Belusko, M. (2013). Comparison of pinned and finned tubes in a phase change thermal energy storage system using CFD. *Applied Energy*, 104, 79–86. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.040>

Vogel, J., Felbinger, J., & Johnson, M. (2016). Natural convection in high temperature flat plate latent heat thermal energy storage systems. *Applied Energy*, 184, 184–196. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.001>

Vogel, J., & Johnson, M. (2019). Natural convection during melting in vertical finned tube latent thermal energy storage systems. *Applied Energy*, 246(April), 38–52. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.011>

Wu, J., Feng, Y., Liu, C., & Li, H. (2018). Heat transfer characteristics of an expanded graphite/paraffin PCM-heat exchanger used in an instantaneous heat pump water heater. *Applied Thermal Engineering*, 142, 644–655. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.06.087>

Wu, S., Li, T. X., Yan, T., Dai, Y. J., & Wang, R. Z. (2016). High performance form-stable expanded graphite/stearic acid composite phase change material for modular thermal energy storage. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 102, 733–744. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.06.066>

Wu, Shaofei, Yan, T., Kuai, Z., & Pan, W. (2020). Thermal conductivity enhancement on phase change materials for thermal energy storage: A review. *Energy Storage Materials*, 25(April 2019), 251–295. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2019.10.010>

Xie, J., Choo, K. F., Xiang, J., & Lee, H. M. (2019). Characterization of natural convection in a PCM-based heat sink with novel conductive structures. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 108(August), 104306. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.104306>

Yousef, M. S., & Hassan, H. (2019). Energetic and exergetic performance assessment of the inclusion of phase change materials (PCM) in a solar distillation system. *Energy Conversion and Management*, 179, 349–361. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.10.078>

Yu, C., Wu, S., Huang, Y., Yao, F., & Liu, X. (2020). Charging performance optimization of a latent heat storage unit with fractal tree-like fins. *Journal of Energy Storage*, 30(March), 101498. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101498>

Yu, X., Chang, J., Huang, R., Huang, Y., Lu, Y., Li, Z., & Wang, L. (2021). Sensitivity analysis of thermophysical properties on PCM selection under steady and fluctuating heat sources: A comparative study. *Applied Thermal Engineering*, 186(September 2020), 116527. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116527>

Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F., & Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied*

Thermal Engineering, 23(3), 251–283. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00192-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00192-8)

Zayed, M. E., Zhao, J., Li, W., Elsheikh, A. H., Elbanna, A. M., Jing, L., & Geweda, A. E. (2020). Recent progress in phase change materials storage containers: Geometries, design considerations and heat transfer improvement methods. *Journal of Energy Storage*, 30(February), 101341. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101341>

Zhang, H., Baeyens, J., Cáceres, G., Degève, J., & Lv, Y. (2016). Thermal energy storage: Recent developments and practical aspects. *Progress in Energy and Combustion Science*, 53(February), 1–40. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2015.10.003>

Zhang, L., & Akiyama, T. (2009). How to recuperate industrial waste heat beyond time and space. *International Journal of Exergy*, 6(2), 214. <https://doi.org/10.1504/IJEX.2009.023999>

Zhang, S., Pu, L., Xu, L., Liu, R., & Li, Y. (2020). Melting performance analysis of phase change materials in different finned thermal energy storage. *Applied Thermal Engineering*, 176(March), 115425. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115425>

Zhao, Y., Zhao, C. Y., & Xu, Z. G. (2018). Numerical study of solid-liquid phase change by phase field method. *Computers and Fluids*, 164, 94–101. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2017.05.032>

Zondag, H. A., de Boer, R., Smeding, S. F., & van der Kamp, J. (2018). Performance analysis of industrial PCM heat storage lab prototype. *Journal of Energy Storage*, 18(March), 402–413. <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.05.007>

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Pakalka, S., & Valančius, K. (2021). Experimental investigation and prediction of charging/discharging performance of phase change material based thermal energy storage unit. *Environmental and Climate Technologies*, 25(1), 600–609. <https://doi.org/10.2478/rtuect-2021-0044>

Pakalka, S., Valančius, K., & Streckienė, G. (2021). Experimental and theoretical investigation of the natural convection heat transfer coefficient in Phase Change Material (PCM) based fin-and-tube heat exchanger. *Energies*, 14(3), 1–14. <https://doi.org/10.3390/en14030716>

Pakalka, S., Valančius, K., & Streckienė, G. (2020). Experimental comparison of the operation of PCM-based copper heat exchangers with different configurations. *Applied Thermal Engineering*, 172, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115138>

Pakalka, S., Valančius, K. ir Damonskis, M. (2019). Šilumnešio debito įtakos fazinio virsmo medžiagos veikimui tyrimas. *Mokslas – Lietuvos ateitis. Aplinkos inžinerija = Science – Future of Lithuania. Environmental Engineering*, 11, 1–5. <https://doi.org/10.3846/mla.2019.10578>

Pakalka, S., Valančius, K., Streckienė, G. ir Ulbikaitė, V. (2018). Fazinio virsmo medžiagos charakteristikų šilumos kaupiklyje skaitinis modeliavimas. *Mokslas – Lietuvos*

ateitis: Aplinkos inžinerija – 2018 = Science – Future of Lithuania. Environmental Engineering – 2018, 10, 1–7. <https://doi.org/10.3846/mla.2018.3225>

Straipsniai kituose leidiniuose

Pakalka, S., Valančius, K., & Damonskis, M. (2020). Effect of open and closed operation modes on the performance of phase change material based copper heat exchanger. In *11th International conference „Environmental Engineering“* (pp. 1–7). Vilnius Gediminas Technical University. <https://doi.org/10.3846/enviro.2020.611>

Summary in English

Introduction

Formulation of the problem

The consistent increase of the share of renewable energy sources (RES) in the overall energy balance provides an impetus for the quest for increasingly effective ways to store energy to balance the modes of energy generation and consumption because, as often as not, RES generate the highest amount of energy when the consumption is at its lowest. To achieve sustainable and efficient energy usage in industrial processes, it is equally important to recover heat exhausted into the environment and bring it back into the process. Using thermal energy storage equipment is one of the ways to ensure an efficient and stable usage of renewable, excess, or surplus energy when the modes of energy production and usage do not overlap.

The problem of high energy storage density is resolved by designing thermal energy storage equipment that works based on phase change materials (PCM), which are known for their tendency to accumulate large quantities of thermal energy as the aggregation state of the material changes. When used properly, these materials can significantly increase the thermal capacity of thermal energy storage systems and units by reducing the volume they take compared to the conventional, sensible heat thermal energy storage technologies. PCM also have application in areas that require a steady temperature to be maintained because the release of stored heat occurs at a constant temperature. However, due to the low thermal conductivity of many PCMs, an efficient transfer of heat has to be ensured. One of the most effective ways to address the problem of heat transfer is by

increasing the heat transfer area of the heat exchanger and/or integrating additional high thermal conductivity materials. Ergo, to design efficient and economically viable phase change material-based thermal energy storage units, the key is to select the right PCM and establish the optimal constructional solutions and operating modes of the thermal energy storage units. However, as the thermophysical properties of PCM vary during phase transition, the calculation methods of sensible heat thermal energy storage units cannot be fully adopted to design PCM units. Thanks to suboptimal operating conditions (modes of operation), the longevity of PCM cannot be assured, and some of the heat storage capacity of PCM remains untapped. Therefore, it is important to improve the calculation methods by factoring in the PCM's thermophysical properties and also, to establish empirical correlations that would accelerate technical and economic decisions at different stages of developing PCM equipment.

Relevance of the thesis

The European Union strategies and guidelines for renewable energy sources, heating and cooling, and thermal energy storage provide that thermal energy storage systems must be actively developed, looking for new efficient and economically viable technologies to improve the energy storage density, runtime, and lifetime of thermal energy storage systems (EU Strategy, 2016). Systems capable of efficiently accumulating large quantities of energy within small volumes make it possible to manage and balance the load on energy supply networks, boost the effectiveness of energy generation and usage, and reduce environmental pollution.

Using phase change materials for thermal energy storage purposes allows achieving a higher energy storage density than conventional technologies; however, the development of these technologies faces several challenges relating to the change of the material phase. Currently, the most common way to use phase change materials for thermal energy storage is through PCM integration into the structural elements of buildings (passive technologies). However, this PCM application does not guarantee a high level of efficiency and flexibility. As a result, active technologies are being developed that involve thermal energy storage units with PCM that can be used within the engineering systems of buildings, in industrial technological processes and the transportation sector.

The analysis of PCM thermal energy storage units included a large volume of research and experiments. The effects of various parameters on the operational characteristics of thermal energy storage units were addressed, different PCM were studied, and the results of numerical modelling and analytical research were verified through experimentation. However, there is a pronounced shortage of studies that would combine different research methods and allow approaching all aspects of the operation of PCM units and predicting the duration of the charging and discharge process.

The object of research

The object of this research is the organic phase change material based thermal energy storage unit.

The aim of the thesis

The thesis aims to study the effect of the thermophysical properties of phase change materials, the geometry of the heat exchanger, and the parameters of the heat transfer fluid on the operational characteristics of the PCM thermal energy storage unit.

The tasks of the thesis

To achieve its aim, the thesis has the tasks to:

1. Prepare a methodology for the research of the PCM thermal energy storage unit on the grounds of the research analysis performed.
2. Based on the design requirements, select the concept of the PCM heat storage unit and perform numerical modelling of the initial geometry. Based on the modelling results, prepare two versions of the heat exchanger of the PCM unit for experimental research.
3. Prepare an experimental setup, manufacture phase change material based thermal energy storage unit prototypes and conduct experimental research.
4. Based on the results of the experimental research, develop a regression model to predict the charging and discharging duration of the PCM thermal energy storage unit.

Research methodology

This thesis deals with specially designed and manufactured phase change material based thermal energy storage unit prototypes. The heat transfer process in the PCM heat storage unit is analysed by applying an analytical model, numerical modelling, and experimental research. The numerical modelling was done using the finite element method and the COMSOL Multiphysics software. The experimental research was done at the research and test laboratory for thermal energy systems of the Applied Research Institute for Prospective Technologies. Different charging and discharging conditions (operating modes) of thermal energy storage units were imitated to measure the mass flow rate and temperature of the heat transfer fluid (HTF), the PCM temperature, and the air pressure within the PCM thermal energy storage unit. Analytical expressions were employed to calculate the heat transfer coefficient, the PCM unit heat transfer rate (power), the amount of energy absorbed, and the duration of the PCM charging and discharging processes. The results of the experimental research were processed and compared using statistical methods and by performing a correlation and regression analysis. A comparative analysis of the results of analytical and experimental research was performed.

Scientific novelty of the thesis

The following results that are novel to the science of mechanical engineering were obtained in the process of writing the dissertation:

1. The PCM charging (melting) and discharging (solidification) process was found to become shorter during the phase transition in a closed volume where the air pressure increases.

2. The level of PCM charging and discharging can be determined based on the average PCM temperature.
3. The experimental research has provided a foundation on which a regression model was built to allow predicting the charging and discharging duration of the PCM thermal energy storage unit depending on the inlet temperature and mass flow rate of the heat transfer fluid.

Practical value of the research findings

The application of the thesis results for designing innovative high-density PCM thermal energy storage units allows a simplified calculation of the heat transfer rate, heat storage capacity, and charging/discharging duration of similar units. A detailed PCM temperature distribution analysis comes in handy when choosing the structural solutions for the heat exchanger to determine the optimal geometrical parameters.

Defended statements

1. The operational characteristics of the PCM thermal energy storage unit vary with open- and closed-type modes of operation. The effect of air pressure caused by the volumetric expansion of the PCM affects the duration of the PCM charging and discharging process.
2. The average PCM temperature is an appropriate criterion for calculating the amount of thermal energy absorbed and released by PCM, one that can be used as a reference point for calculating the level of charging and discharging.
3. The application of regression analysis to predict the dependent variables (response) allows determining the charging and discharging duration for PCM considering the inlet temperature and mass flow rate of the heat transfer fluid.

Approval of the research findings

A total of 6 articles have been published on this dissertation's subject: two of them in Clarivate Analytics Web of Science databases of refereed publications with a citation index (Pakalka et al., 2021; Pakalka et al., 2020); one in Clarivate Analytics Web of Science databases of refereed publications without a citation index (Pakalka et al., 2021); one in international conference publications which are assessed by Clarivate Analytics Web of Science database Conference Proceedings (Pakalka et al., 2020); two in publications of other international databases (Pakalka et al., 2019; Pakalka et al., 2018).

The results of research on the subject of the dissertation have been presented at two international conferences in Spain and Latvia:

- Innovation for an Energy-Efficient Industry (EU Sustainable Energy Week) in Durango, Spain in 2018;
- The Conference of Environmental and Climate Technologies (CONNECT) in Riga in 2021.

The structure of the dissertation

The dissertation consists of an introduction, three chapters, and general conclusions. It also has two appendices.

The entire thesis consists of 136 pages, not counting the appendices, containing 36 numbered formulas, 62 figures, and 7 tables in the text. A total of 118 literature sources were used in writing the dissertation.

1. Analysis of the application of phase change materials for thermal energy storage

This chapter presents an analysis of theoretical and experimental research of PCM thermal energy storage units, observing heat exchanger-type thermal energy storage units, organic PCMs, the low PCMs thermal conductivity, the impact of the natural convection on the phase change process, the change in the PCM density, the prediction of the operational characteristics of the unit based on a regression analysis. The chapter furthermore describes the problem of the investigated subject and formulates the tasks for the dissertation in reliance on the analysis made.

Using phase change materials for thermal energy storage allows reducing the volume of units (systems) up to several times, owing to the higher storage density of these materials compared to the conventional (sensible heat) technologies. However, for them to be used efficiently for thermal energy storage, PCM must conform to the requirements for the thermophysical, kinetic, and chemical properties. Furthermore, the economic viability, availability, and ecology of the materials need to be considered as well (Mehling & Cabeza, 2008; Shaofei Wu et al., 2020).

One of the critical parameters when it comes to designing and operating PCM thermal energy storage system is the low thermal conductivity of many materials (Gil et al., 2010; Hofmann et al., 2019; Khan, Khan, & Ghafoor, 2016; A. K. Raul et al., 2018). In light of the low PCM thermal conductivity, various measures are employed to enhance the process of heat transfer. Development efforts concern various innovative structural solutions and techniques to improve thermal conductivity, such as nanoparticle integration in PCM (R. P. Singh et al., 2019), utilisation of porous structures (like aluminium, copper, graphite) (Li et al., 2017; Liu et al., 2016; Merlin et al., 2016; Righetti et al., 2019), PCM encapsulation (A. Raul et al., 2018; Zayed et al., 2020), increase of heat transfer surface areas (Besagni & Croci, 2019; Kabbara et al., 2016). Another option is to use a combination of technical solutions consisting of different techniques, such as increasing the heat transfer surface areas and improving PCM conductivity by integrating additional thermal conductors (Elarem et al., 2020).

One of the key techniques to enhance heat transfer is the increasing of the heat transfer area (Ibrahim et al., 2017; Lacroix & Benmadda, 1997; Sciacovelli et al., 2015; Zayed et al., 2020; S. Zhang et al., 2020), and the most common types of heat exchanger used to that end are double-pipe and shell-and-tube heat exchangers (Han et al., 2017; Kalapala & Devanuri, 2018; Zayed et al., 2020). When used in combination with PCM, these heat exchangers allow achieving energy efficiency in excess of 70% (Zayed et al., 2020). Adding thermally conductive metal plates (fins) can accelerate the melting process by nearly 50% (M. S. Mahdi et al., 2019), which significantly reduces the PCM charging time. However, one important factor here is the choice of the geometry of the

thermal energy storage unit to ensure an optimal ratio between PCM and structural materials (Agyenim et al., 2010). Liang et al. (Liang et al., 2020) noted that conducting a detailed analysis of the effects that the geometry has on the characteristics of the PCM thermal energy storage system is a crucial step, especially when the system is running under varying conditions (for instance, with the flow rate of the HTF changing).

Another important parameter is the change of the PCM density during phase transition, which adversely affects both the process of heat transfer by causing a varied distribution of the PCM and occurrence of voids and a deterioration of heat transfer (Peng et al., 2019), and the components of the thermal energy storage unit due to the mechanical impact causing deformation of the tank and the heat exchanger (Dallaire & Gosselin, 2016). Due to variances in temperature, different PCM layers have different densities, resulting in free movement of the liquid PCM phase (natural convection). It has been established that natural convection makes heat transfer more intense during melting (Akgün et al., 2007; Avci & Yazici, 2013; Gadgil & Gobin, 1984; Kalapala & Devanuri, 2018; Souayfane et al., 2018). Therefore, understanding, describing, and evaluating natural convection is critical to analysing the process of heat transfer in the PCM thermal energy storage unit.

An overview of research has shown that it is advisable to design an integrated methodology for the assessment of the operational characteristics of the PCM unit that would cover numerical modelling, the application of analytical expressions, and experimental research. For experimental research, it is advisable to design a prototype of a PCM thermal energy storage unit and perform tests by simulating different modes of operation.

2. Methodology of research of the phase change material based thermal energy storage unit characteristics

This thesis involves research aimed at determining the effects of the PCM thermophysical properties, the geometry of the heat exchanger, and the mass flow rate and temperature of the HTF on the operation of the PCM thermal energy storage unit. Furthermore, it deals with the concept of the heat exchanger-type thermal energy storage unit and provides an analysis of the operational characteristics typical of the said concept. The general scheme of the research methodology applied for the thesis is presented in Fig. S2.1.

Step one of the research is to establish the design requirements for the PCM thermal energy storage unit to be used for designing an initial geometry of the PCM thermal energy storage unit in reliance on analytical calculations and for performing its numerical analysis. The research results provide a basis for adjusting the initial geometry and for manufacturing two versions of the prototype, on which experimental research will be conducted. In this case, the design requirements for the unit under development are established in reliance on the Sustainable Production of Industrial Recovered Energy Using Energy Dissipative and Storage Technologies (SusPIRE) project within the framework of the European Union research and innovation programme Horizon 2020 (SusPIRE, 2019). During the technological process of the SusPIRE project, water steam/condensate is released into the environment and recovered waste heat is used to preheat the cold water for steam production, which is supplied to this process. The process takes up to 540 seconds and has many cycles, with temperatures ranging from 97 °C

to 100 °C. This makes a quick PCM charging and discharging process a key criterion for designing the PCM thermal energy storage unit.

Fig. S2.1. General scheme of the research methodology

In light of the complexity of the heat transfer process during phase change, an apparent heat capacity method has been chosen and described for the purposes of numerical modelling. The main benefit of this method is that the calculations do not require the tracking of the solid-liquid interface of the PCM. The essence of this method is to artificially increase the specific heat of PCM during the interval when the material melts. The modelling of the heat transfer process taking place within the PCM thermal energy storage unit is done using the *COMSOL Multiphysics* software with an integrated phase change calculation module. With this software, equations are solved using the finite element method.

An experimental research setup was designed based on the literature review and established design requirements. The setup is used for testing the PCM thermal energy storage unit. The testing setup simulates different operating modes of the PCM unit and monitors the different parameters (such as temperature, pressure, and the HTF mass flow rate). The data are read in real-time, displayed in the process control and monitoring software, and logged in memory for further processing. The general scheme of the PCM thermal energy storage unit testing setup is shown in Fig. S2.2.

Fig. S2.2. Schematic representation of the experimental setup: 2) storage tank of hot HTF/electric heater; 3, 4) circulation pump; 5) storage tank of cold HTF; 6) cooler for cold HTF; 7) mass flow meter for HTF; 8) PCM thermal energy storage unit; 9) expansion vessels; T) temperature sensors, P) pressure transmitter; V) manual valves

The research subject is the PCM thermal energy storage unit with a fin-and-tube copper heat exchanger. The unit consists of a stainless-steel casing (tank) with a copper heat exchanger inside. The tank is filled with phase change material RT82. The research was done with two different versions of the heat exchanger: PCM1 (Fig. S2.3) and PCM2 (Fig. S2.4). The main differences in the configurations of the heat exchangers are the number and the thickness of the copper fins that increase the heat transfer area of the heat exchangers. With PCM1, the thickness of the copper fins (35 pcs.) is 1.5 mm, with PCM2 (79 pcs.), — 0.15 mm. The dimensions of the copper heat exchangers and the method by which they are made differ as well.

(a)

(b)

Fig. S2.3. PCM1 thermal energy storage unit: (a) heat exchanger, (b) unit ready for testing

a)

b)

Fig. S2.4. PCM2 thermal energy storage unit: (a) heat exchanger, (b) unit ready for testing

An experimental research plan was prepared based on the parameters to be tested. Different charging and discharging conditions (operating modes) of thermal energy storage units were simulated to measure the mass flow rate and the temperature of the HTF, the PCM temperature and the air pressure inside the PCM thermal energy storage unit, and to determine the charging and discharging duration for the PCM. The temperature of PCM ($T_{PCM1}-T_{PCM10}$), hot- and cold-water inlet ($T_{HW, IN}$, $T_{CW, IN}$), hot- and cold-water outlet ($T_{HW, OUT}$, $T_{CW, OUT}$) and the heat exchanger (T_{HX}) (see Fig S2.2) was measured with PT100 temperature sensors (class B, accuracy $\pm (0.3 + 0.005 \times t)$ °C). The water mass flow rate was measured with a calibrated Coriolis flow meter (accuracy $\pm 0.15\%$). Data logging interval 1 Hz.

3. Results of research of the phase change material based thermal energy storage unit characteristics

This chapter presents the results of numerical modelling, the application of analytical expressions for calculating the heat transfer coefficient, and the results of experimental research.

Aiming to simplify the modelling of the heat transfer process, it was assumed that the HTF heats the copper heat exchanger up to a certain constant temperature and that the heat transfer takes place between the copper heat exchanger and the PCM. To reduce the time of the analysis, the research deals with a fragment of the PCM thermal energy storage unit. Numerical modelling revealed that during the time of the test (1,000 s), no phase change occurred in the exterior layers of the subject PCM volume; however, the temperature reaches the melting temperature of the PCM (75 °C). Analysis of the change in the temperature and the fraction of the liquid phase showed a significant gap between individual points of measurement (Fig. S3.1).

Fig. S3.1. Temperature (T) and liquid phase fraction (f) evolution in different points of a thermal energy storage unit

Fig. S3.1 shows that the temperature at point AT1, which is located closer to the heat exchange surface (between the fins of the heat exchanger), reaches the melting area (75 °C) after 47 s already, and after 130 s, the PCM is in the liquid phase (temperature reaches 85 °C). It means that 100% of the PCM heat storage capacity is used. At the point located further away from the heat exchanger (AT2), the melting temperature of 75 °C is achieved in 344 s from the beginning of the process, and at the end of the process, the temperature stands at 81 °C. In this case, 70% of the PCM heat storage capacity is used.

A study of natural convection revealed that results obtained with different analytical expressions approximate the experimental findings more when the characteristic length of choice is the distance between the heat exchanger fins (channel width S). In this case, the heat transfer coefficient throughout the charging process is $\alpha (S = 0.01 \text{ m})$ — 68 W/m²K, and the experimental value is $\alpha (\text{eksp.})$ — 61 W/m²K. When the characteristic length is the height of the fin, the α value becomes higher; its average throughout the charging process amounts to $\alpha (L = 0.139 \text{ m})$ — 92 W/m²K. Therefore, when calculations are done based on the analytical expression of the heat transfer taking place between two fins (in the channel), the average α value is 7.0 W/m²K higher than the experimental value on average. With the analytical expression of calculating heat transfer from the vertical fin, the average α value is 31 W/m²K higher than the experimental. Fig. S3.2. shows average α values based on the temperature range.

Fig. S3.2. Comparison of average heat transfer coefficients (incl. standard deviation)

Fig. S3.2 shows the average $\alpha (S)$ and $\alpha (\text{eksp.})$ values to be quite similar once 86 °C is passed, standing at 63.6 W/m²K and 60.8 W/m²K, respectively. It was also established that the average α value increases when the temperature goes beyond 86 °C during the experiment, which runs counter to theoretical calculations. This difference is affected by the dynamic viscosity of the PCM, which decreases with the temperature, enhancing natural convection. More accurate measurement of the effect of dynamic viscosity on the heat transfer process calls for an assessment of the dependence of the PCM dynamic viscosity on the temperature.

The PCM charging and discharging experiment using the geometrically different copper heat exchangers PCM1 and PCM2 was followed by an assessment and comparison of the PCM charging and discharging process's duration, the duration of phase transition, temperature, and heat transfer rate (see Figs. S3.3 and S3.4).

Fig. S3.3. Charging process of PCM1 and PCM2

Fig. S3.4. Discharging process of PCM1 and PCM2

A comparison of the different geometries of the heat exchanger showed that in terms of average PCM temperature, the melting process within the PCM2 unit is 20% shorter than in PCM1. With PCM2, the average heat transfer rate is higher: 1.98 kW for PCM1, 2.03 kW for PCM2. Measurement by the average PCM temperature revealed that with PCM1, the solidification process is slower than with PCM2, measuring at 1.25 min and 0.25 min, respectively. However, the average heat transfer rate throughout the entire discharging process for PCM1 is larger, standing at 2.23 kW compared with 2.17 kW in the case of PCM2. Notably, the surface area of the PCM1 heat exchanger (1.0 m^2) is smaller than that of PCM2 (1.75 m^2). It means that the PCM1 manufacturing technology (soldered fins) ensures a better thermal contact between the fins and the tubes, and heat transfer is more intense owing to the larger thickness (1.5 mm) of the heat exchanger fins. However, the weight of the PCM1 heat exchanger (6.9 kg) brings about a significant increase in the manufacturing costs compared to the PCM2 heat exchanger, which

weighs 2.1 kg. The bigger weight also means that the PCM1 heat exchanger takes up more space and requires a larger tank to accommodate the same quantity of PCM. Comparing the results of the study of the geometry of the PCM1 and PCM2 heat exchangers, their operational characteristics, the volume that the heat exchanger material (copper) takes, and its manufacturing capabilities, the thermal energy storage unit PCM2 has a more developed and accessible manufacturing technology and ensures much lesser outlay of materials for the production of the heat exchanger. Therefore, to scrutinise the operation of the PCM2 unit and to determine the effect of the HTF mass flow rate on its operational characteristics, experimental research is carried out involving different mass flow rates of the hot and cold HTF.

The research determined that with the measurements done on the grounds of the average PCM temperature, when the mass flow rate of the HTF is reduced from the highest (0.25 kg/s) to the average (0.125 kg/s) during the PCM charging process, the phase change takes 0.4 min longer, and if the mass flow rate is reduced to the lowest (0.05 kg/s), the duration of the phase change increases by 4.1 min. When the mass flow rate of the HTF is reduced from 0.25 kg/s to 0.125 kg/s during the process of discharging, the duration of the phase change increases by 0.3 min, and if the flow rate is reduced to 0.05 kg/s, it increases by 0.9 min. Therefore, in the case of the PCM thermal energy storage unit under investigation, the impact of the inlet temperature of the HTF on the duration of the melting/solidification process increases at higher HTF flow rates. In other words, the difference between the highest and the average HTF flow rates has a slight impact on the duration of the phase change compared to the lowest flow rate.

The analysis of the change in the PCM density showed that the heat exchanger's heat flux in the open and the closed mode of operation varies ever so slightly both in the process of PCM charging and discharging. While measuring the charging process by the average PCM temperature, the phase change in the closed operating mode appeared to occur 0.4 min quicker compared to the open mode of operation. The discharging process in the closed mode of operation took 0.1 min shorter than in the open mode. The analysis of the duration of the phase change at separate points of measurement reveals the same trend: the PCM charging and discharging duration during the closed mode of operation is shorter (see Figs. S3.5 and S3.6).

Fig. S3.5. Phase change duration during the charging process at different measuring points

Fig. S3.6. Phase change duration during the discharging process at different measuring points

When predicting the duration of the charging and discharging of the PCM thermal energy storage unit on the basis of experimental data, it was determined that the total amount of heat obtained during the experiment depends on the operating mode and, in the case of PCM charging, is closer to the declared value than it is in the case of PCM discharging. The differences are caused by the different boundary conditions during the experiment and the PCM characterization (DSC analysis), meaning that some of the heat is stored in the construction materials of the PCM unit and in the HTF, and that heat exchange with the environment (heat loss) takes place. Considering the differences in the total amount of heat for every mode of operation, the declared amount of heat should be compared with the average amount of heat for all modes of operation (see Fig. 3.7).

Fig. S3.7. Average heat absorbed and released during PCM charging and discharging processes (incl. standard deviation)

A comparison of the average values of the heat amount shows that the amount of heat determined experimentally for the process of PCM charging is 4.2% larger than the one estimated based on the declared partial enthalpy (a declared value of 755 ± 57 kJ vs an experimental value of 787 ± 62 kJ). In the case of PCM discharging, the amount of heat determined experimentally is 22.2% above the declared value (a declared value of 746 ± 56 kJ vs an experimental value of 913 ± 69 kJ). However, an estimate of the amount of heat stored in the components of the PCM unit shows that the amount of heat stored in PCM during discharging stands at 85.9% (784 kJ) of the total amount of heat determined during the experiment. By the same margin, the amount of heat accumulated in the heat exchanger material is 3.2% (29.1 kJ), and in the casing (tank) material, 10.9% (99.4 kJ) of the total amount of heat. In that case, the amount of heat determined experimentally during PCM discharging is 5.0% above the declared value.

The obtained results confirmed that the duration of the process used in calculating the heat amount could be used for regression analysis. The results also showed that the average readings of temperature sensors installed in different locations of the heat exchanger, by which the duration of the process is calculated, are an appropriate parameter (criterion) to estimate the amount of energy absorbed/released. The *Matlab* data processing package was applied to determine the regression model and the regression coefficients (Eq. (S3.1) and Eq. (S3.2)). The second-order polynomial model was used to predict the response. The relationship between the independent variables (the mass flow rate and the temperature of the HTF) and the response (the PCM charging duration) is shown in the three-dimensional model of the process response surface (Fig S3.8 and S3.9).

Fig. S3.8. Effect of the HTF inlet temperature and mass flow rate on the PCM charging time (3D response surface)

$$\tau_{\text{charging}} = 29.74 + 779.5 \cdot \dot{m} - 0.02023 \cdot T_{HW, IN} + 265.1 \cdot \dot{m}^2 - 9.46 \cdot \dot{m} \cdot T_{HW, IN}, \quad (\text{S3.1})$$

where τ_{charging} is the PCM charging process duration, min; $\dot{m}$ is the mass flow rate of the HTF, kg/s; $T_{HW, IN}$ is the inlet average temperature of the hot HTF, °C.

The above empirical equation is valid when the inlet temperature of the HTF is within the range of 94 and 96.5 °C, and the mass flow rate of the HTF is within the range of 0.1 and 0.25 kg/s.

Fig. S3.9. Effect of the HTF inlet temperature and mass flow rate on the PCM discharging time (3D response surface)

$$\tau_{\text{discharging}} = 5.366 - 12.95 \cdot \dot{m} - 0.006467 \cdot T_{CW, IN} - 22.66 \cdot \dot{m}^2 + 0.6018 \cdot \dot{m} \cdot T_{CW, IN}, \quad (\text{S3.2})$$

where $\tau_{\text{discharging}}$ is the PCM discharging process duration, min; $\dot{m}$ is the mass flow rate of the HTF, kg/s; $T_{CW, IN}$ is the inlet average temperature of the cold HTF, °C.

The above empirical equation is valid when the inlet temperature of the cold HTF is within the range of 20 and 30 °C, and the mass flow rate is within the range of 0.1 and 0.25 kg/s.

The results of predicting the duration of the charging and the discharging of the PCM thermal energy storage unit on the grounds of experimental data show that, within the above temperature range, the average amount of heat stored during the experiment is 4.2% higher, and the amount of heat released is 5.0% higher than the declared value. Furthermore, it was established that in the case of PCM charging, the process, on average, takes 3.3 times longer compared to the process of discharging. With discharging, the biggest difference in the process duration between the different modes of operation is 1.0 min, while with charging, it is 4.4 min.

General conclusions

1. The research methodology for the PCM thermal energy storage unit prepared based on the research analysis allows thoroughly analysing and evaluating all aspects of the impact that the thermophysical properties of the PCM, the geometry of the heat ex-

changer, and the parameters of the heat transfer fluid have on the operational characteristics of the unit by performing an analytical calculations, numerical modelling, experimental research, and comparative analysis of the results.

2. The numerical model of the PCM thermal energy storage unit was applied to check whether the initial geometry of the unit under development conforms to the design requirements by analysing the temperature distribution and the phase change process in different areas of the heat exchanger. The application of the apparent heat capacity method allows modelling phase change without tracking of the solid-liquid interface of the PCM. Based on the modelling results, two versions of the heat exchanger of the PCM unit were prepared for experimental research.

3. A simulation of the different modes of operation of the PCM thermal energy storage unit prototypes was performed using an experimental setup:

3.1. An investigation of the heat transfer coefficient established that when the characteristic length is the distance between the heat exchanger fins, the theoretical results are closer to the experimental values, and the theoretical value is, on average, 11.5% higher than experimental. This shows that the method of calculating the natural convection occurring in the channel (distance between the heat exchanger vertical fins) can be used to determine the heat transfer coefficient of the heat exchanger under investigation.

3.2. Based on the geometry of the heat exchanger of the PCM unit, with PCM2, the heat transfer rate during the charging process is, on average, 2.5% higher than PCM1. During discharging, the average heat transfer rate throughout the process in the case of PCM1 is 2.7% higher than with PCM2.

3.3. The analysis of the effect of the mass flow rate of the HTF on the operational characteristics of the PCM unit revealed that, compared to the maximum flow rate used for the purposes of the research (0.25 kg/s), with the average mass flow rate of 0.125 kg/s, the phase change duration increases by 6.5% during the charging process, and by 17.2% during the discharging process. With the mass flow rate at its lowest (0.05 kg/s), these values are 60.7% for charging and 48.3% for discharging. This means that the difference between the maximum and average HTF mass flow rates has a slight impact on the duration of the phase change, and when the flow rate is reduced to the lowest, a greater influence of the flow rate on the phase change duration is observed.

3.4. A study of the change in the PCM density established that, when the PCM is under air pressure, the phase change duration is 3.2% shorter in the case of charging, and 1.7%, in the case of discharging. Therefore, exposing phase change material to pressure accelerates the process of PCM charging and discharging.

4. Experimental research was used to obtain a regression model that allows predicting the charging and discharging duration of the PCM thermal energy storage unit depending on the inlet temperature and mass flow rate of the HTF. With reference to the average PCM temperature, it was established that, within the given temperature range, the average amount of heat absorbed during the experiment is 4.2%, and the amount of heat released is 5.0% larger than the declared value. It signifies that the average PCM temperature is an appropriate criterion for determining the charge and discharge duration and level for the unit. The obtained regression model can be applied for designing PCM units and addressing issues relevant to optimising their operation.

Priedai³

A priedas. Autoriaus sąžiningumo deklaracija

B priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

³ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Saulius PAKALKA

FAZINIO VIRSMO MEDŽIAGOS PAGRINDU VEIKIANČIO
ŠILUMOS KAUPIMO ĮRENGINIO CHARAKTERISTIKŲ TYRIMAI

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
mechanikos inžinerija (T 009)

RESEARCH OF CHARACTERISTICS OF A PHASE CHANGE
MATERIAL BASED THERMAL ENERGY STORAGE UNIT

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Mechanical Engineering (T 009)

Lietuvių k. redaktorė Dalia Markevičiūtė

Anglų k. redaktorė Jūratė Griškėnaitė

2022 02 24. 13,0 sp. l. Tiražas 20 egz.
Leidinio el. versija <https://doi.org/10.20334/2022-001-M>
Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius
Spausdino BĮ UAB „Baltijos kopija“
Kareivių g. 13 B, 09109 Vilnius