

## Environmental engineering Aplinkos inžinerija

### ŠILUMNEŠIO DEBITO ĮTAKOS FAZINIO VIRSMO MEDŽIAGOS VEIKIMUI TYRIMAS

Saulius PAKALKA<sup>1</sup>, Kęstutis VALANČIUS<sup>1\*</sup>, Matas DAMONSKIS<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva*

<sup>2</sup>*VšĮ Perspektyvinių technologijų taikomųjų tyrimų institutas, Vilnius, Lietuva*

Gauta 2019 m. birželio 27 d.; priimta 2019 m. liepos 4 d.

**Santrauka.** Straipsnyje pateikiamas šilumnešio masės debito įtakos šilumai kaupiti naudojamų fazinio virsmo medžiagų (FVM) veikimui eksperimentinis tyrimas. Tyrimas buvo atliekamas specialiai pagamintame testavimo stende. Tiriamasis objektas – FVM šilumos kaupimo įrenginys, sudarytas iš nerūdijančio plieno talpyklos ir dviejų kontūrų varinio šilumokaičio (vamzdelių) su varinėmis plokštelėmis. Talpykla užpildyta fazinio virsmo medžiaga RT82. Tyrimas atliekamas keičiant šilumnešio masinį debitą. Pasirinktos trys vertės: didžiausia – 0,25 kg/s, vidutinė – 0,125 kg/s ir mažiausia – 0,05 kg/s. Nustatyta, kad, esant didžiausiam ir vidutiniam debitams, FVM lydymosi / kietėjimo proceso trukmei didžiausią įtaką turi tiekiamojo šilumnešio temperatūra, esant mažiausiam debitui vyksta didesnė debito įtaka proceso trukmei.

**Reikšminiai žodžiai:** šilumos kaupimas, fazinio virsmo medžiaga (FVM), fazinio virsmo šiluma, šilumokaitis, šilumnešio srautas, testavimo stendas.

## Įvadas

Šilumos akumuliacija randa vis didesnę pritaikymo nišą siekiant energijos vartojimo efektyvumo ir patikimumo. Šalia tradicinių šilumos akumuliacijos technologijų praktiniam taikymui vis dažniau siūlomos fazinio virsmo medžiagų pagrindu veikiančios šilumos kaupimo sistemos. Tokio tipo sistemų, naudojančių fazinio virsmo medžiagas (FVM), tyrimų skaičius (patentai ir publikacijos) pastaruoju metu auga eksponentiškai (Nazir et al., 2019). Siekiant projektuoti efektyvias ir ekonomiškai pagrįstas FVM pagrindu veikiančias šilumos kaupimo sistemas, svarbu eksperimentiškai ištirti jų veikimą ir nustatyti parametrų priklausomybes pritaikyti įrenginių projektavimo etape. Pastaraisiais metais atliekama daug eksperimentinių tyrimų, keliant jiems įvairius reikalavimus ir tikslus. Tiriamos skirtingų tipų ir skirtingų lydymosi temperatūrų FVM, atliekamas imitacinių modelių validavimas (Zondag, de Boer, Smeding ir van der Kamp, 2017, 2018; Zauer, Hengstberger, Mörzinger, Hofmann ir Walter, 2017), nagrinėjama šilumos kaupimo įrenginių techninių sprendinių, naudojamų konstrukcinių medžiagų, šilumnešio debito įtaka jų efektyvumui (Mahdi et al., 2019; Kabbara, Groulx ir Joseph, 2018; Moldgy ir Parameshwaran, 2018; Huang et al., 2019; Z. Khan ir Z. A. Khan, 2017; Merlin,

Soto, Delaunay ir Traonvouez, 2016). Gaunami rezultatai yra pagrindas gerinti šilumos perdavimo procesą ir leidžia optimizuoti šilumos kaupimo įrenginio įkrovimo / iškrovimo laiką.

Šiame tyrime nagrinėjamas organinių (parafino) FVM pagrindu veikiančių šilumos kaupimo įrenginys, skirtas naudoti šilumos kaupimo sistemoje, veikiančioje 80–100 °C temperatūroje. Tokios temperatūros šilumos šaltiniai dažniausiai pasitaiko pramonės procesuose kaip perteklinė ar atliekinė šiluma. Eksperimentinis tyrimas papildė ankstesnius tyrimus, susijusius su FVM naudojimo šilumai kaupiti galimybėmis ir šių medžiagų charakteristikų skaitiniu modeliavimu (Pakalka, Valančius, Čiuprinskas, Pum ir Hinteregger, 2017; Pakalka, Valančius, Streckienė ir Ulbikaitė, 2018). Ypatingas dėmesys skiriamas šilumnešio masinio debito įtakai FVM veikimui.

## 1. Tyrimo objektas ir darbo metodika

Eksperimentinis tyrimas buvo atliekamas specialiai pagamintame testavimo stende (1 pav.). Šiame stende galima imituoti skirtingus FVM šilumos kaupimo įrenginio veikimo režimus, keičiant šilumnešio (vandens) temperatūrą ir debitą. Duomenys nuskaitomi realiuoju laiku,

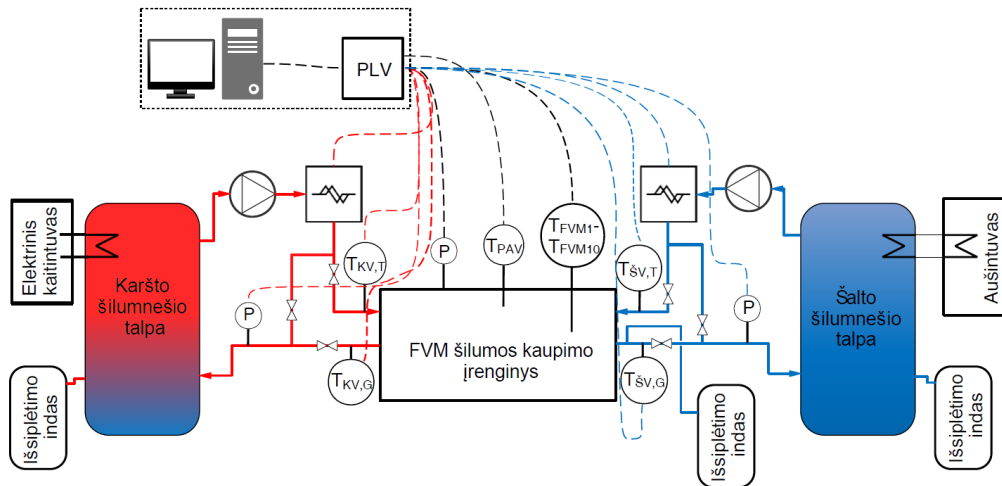
\*Autorius susirašinėti. El. paštas [kestutis.valancius@vgtu.lt](mailto:kestutis.valancius@vgtu.lt)

atvaizduojami proceso valdymo ir stebėsenos programinėje įrangoje bei įrašomi į atmintį duomenims apdoroti.

Tiriamasis objektas – FVM šilumos kaupimo įrenginys su variniu šilumokaičiu (2 pav.). Šį įrenginį sudaro nerūdijančio plieno talpykla, kurioje įmontuotas dviejų kontūrų varinis šilumokaitis (vamzdeliai) su varinėmis plokštelėmis. Talpykla užpildyta fazinio virsmo medžiaga RT82. Tiriamojo FVM šilumos kaupimo įrenginio ir fazinio virsmo medžiagos parametrai pateikti 1 lentelėje. FVM šilumos kaupimo įrenginys izoliuotas akmens vatos termoizoliacija, o įrenginio viduje (uždarojoje sistemoje) vykstančių fazės virsmo procesų vizualiniai apžiūrai įrengtas skaidrus (polikarbonato) aklidangtis. FVM šilumos kaupimo įrenginyje yra sumontuota 10 temperatūros jutiklių:  $T_{FVM1}-T_{FVM10}$ , kurie išdėstyti taip, kad būtų galima stebėti FVM temperatūrą skirtingais atstumais nuo šilumokaičio nutolusiuose taškuose. Šilumnešio temperatūrai matuoti naudojami keturi temperatūros jutikliai:  $T_{KV,T}$  – tiekiamasis karštasis šilumnešis,  $T_{KV,G}$  – grįžtamasis karštasis šilumnešis,  $T_{ŠV,T}$  – tiekiamasis šaltasis šilumnešis,

$T_{ŠV,G}$  – grįžtamasis šaltasis šilumnešis. Šilumokaičio paviršiaus (varinės plokštelės) temperatūrai matuoti įrengtas vienas jutiklis  $T_{PAV}$ . Temperatūros jutiklių pozicijos pavaizduotos 2 paveiksle (b). Temperatūros jutikliai  $T_{FVM1}, FVM4, FVM6, FVM9$ ,  $T_{FVM2}, FVM5, FVM7, FVM10}$  ir  $T_{FVM3}, FVM9}$  įgilinti nuo talpyklos sienelės atitinkamai 14, 24 ir 30 mm. Sistemoje taip pat integruoti slėgio jutikliai šilumnešio ir FVM šilumos kaupimo įrenginyje esančio oro slėgio matavimams. Šiame tyrime slėgio pokytis nenagrinėjamas.

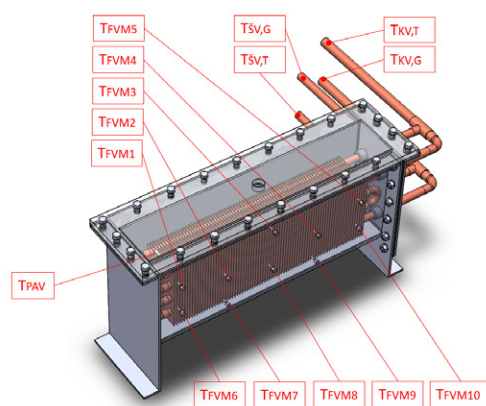
Testavimo stende atliekamas FVM įkrovimo (lydymosi procesas) ir iškrovimo (kietėjimo procesas) eksperimentas. Šiame stende yra du atskiri šilumnešio kontūrai – karštas ir šaltas. Prie šilumnešio paskirstymo kolektoriaus prijungiamas FVM šilumos kaupimo įrenginys su variniu šilumokaičiu, per kurį cirkuliuoja karštas ir šaltas šilumnešis (vandeniu). Eksperimento pradžioje, FVM esant kietosios fazės (30 °C temperatūra), atidaromi karšto šilumnešio įleidimo / išleidimo vožtuvai ir per varinį šilumokaitį cirkuliuoja karštas šilumnešis, kurio temperatūra yra  $95 \pm 2$  °C. Vyksta šilumos mainai su FVM (lydymasis).



1 paveikslas. Eksperimentinio stendo principinė schema  
Figure 1. Experimental setup – principle scheme



a)



b)

2 paveikslas. Tyrimo objektas: a) eksperimentui paruoštas FVM šilumos kaupimo įrenginys; b) FVM šilumos kaupimo įrenginio modelis su temperatūros jutiklių pozicijomis

Figure 2. Research object: a) PCM heat storage unit ready for the experiment; b) model of PCM heat storage unit with temperature sensor positions

1 lentelė. Tiriamo FVM šilumos kaupimo įrenginio parametrai  
Table 1. Parameters of analysed PCM based heat storage unit

FVM šilumos kaupimo įrenginys		Fazinio virsmo medžiaga „Rubitherm RT82“	
Varinės plokštelės, vnt.	79	Lydimosi temperatūros intervalas, °C	77–82
Atstumas tarp plokštelių, mm	5	Kietėjimo temperatūros intervalas, °C	82–77
Varinės plokštelės storis, mm	0,15	Šiluminė talpykla ( $\pm 7,5$ %), kJ/kg	170
Vamzdelio skersmuo (išorinis), mm	12,7	Savitoji šiluma, kJ/kgK	2
Vamzdelio storis, mm	0,5	Tankis esant °C, kg/l	0,88
Varinio šilumokaičio masė, kg	2,1	Tankis esant 90 °C, kg/l	0,77
Šilumos mainų paviršiaus plotas, m <sup>2</sup>	1,75	Šilumos laidumas (skystosios ir kietosios fazių), W/mK	0,2
FVM svoris, kg	4,34	Tūrinis plėtimasis, %	12,5
FVM tūris skystoji/kietoji fazės, l	4,93/5,64	Maksimali darbinė temperatūra, °C	100

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 (vožtuvai uždaromi) ir pradedamas tiekti šaltas šilumnešis (šalto šilumnešio vožtuvai atidaromi). Šaltas šilumnešis cirkuliuoja per varinį šilumokaitį ir vyksta FVM kietėjimas. Procesas trunka tol, kol FVM temperatūra tampa artima tiekiamo šalto šilumnešio temperatūrai, kuri lygi  $30 \pm 2$  °C. Šio eksperimento metu keičiamas karštojo ir šaltojo šilumnešio masinis debitas, kuris yra didžiausias – 0,25 kg/s, vidutinis – 0,125 kg/s ir mažiausias – 0,05 kg/s. Proceso valdymui ir stebėsenai (kontrollei) naudojamas industrinis valdiklis bei vizualizacijos programinė įranga. Pagrindinės kontrolės sistemos funkcijos yra šios: testavimo stendo komponentų valdymas, proceso vizualizacija, parametrų stebėseną realioju laiku, parametrų kaupimas. Stebima / fiksuojama trisdešimties parametrų vertės realioju laiku, duomenų įrašymo laiko žingsnis – 1 s.

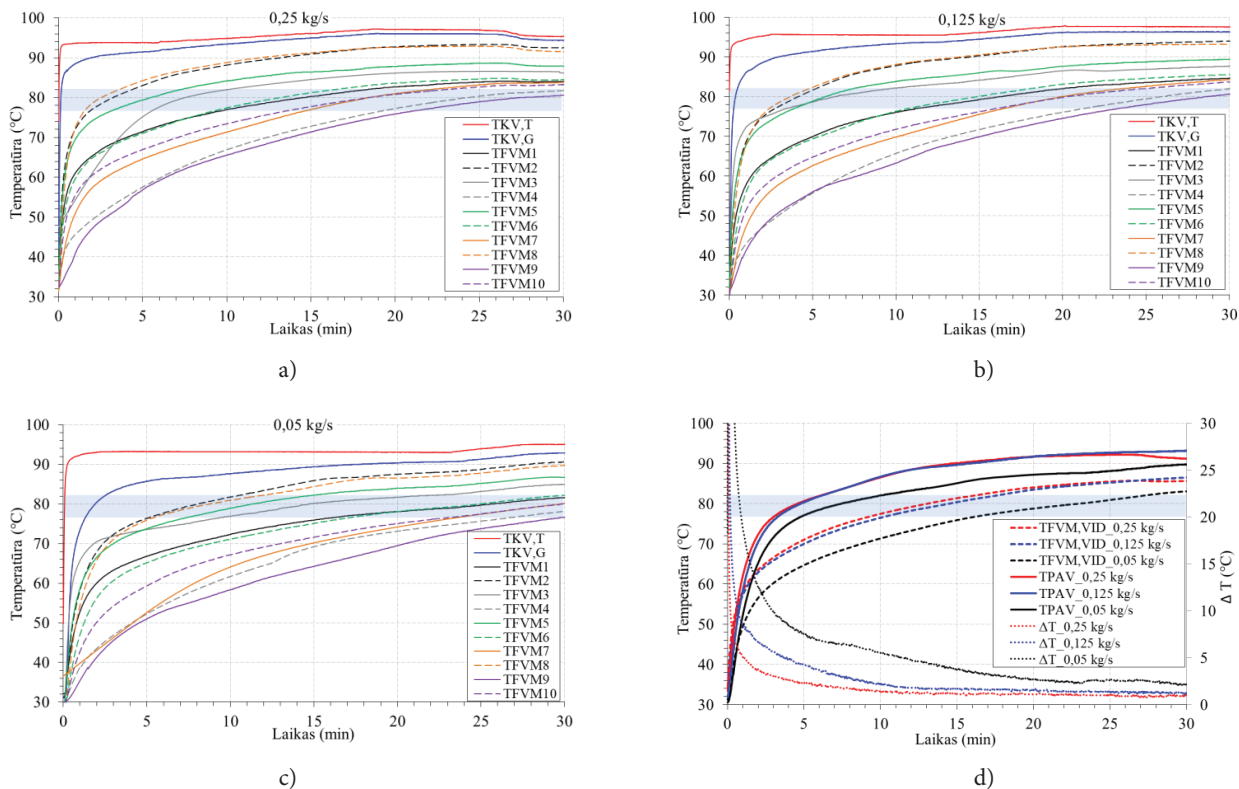
## 2. Rezultatai

Keičiant karštojo ir šaltojo šilumnešio masinius debitus, stebima, kaip kinta tiekiamajam ir grįžtamajam šilumnešio temperatūros  $T_{KV,T}$ ,  $T_{KV,G}$ ,  $T_{ŠV,T}$ ,  $T_{ŠV,G}$ , šilumokaičio paviršiaus temperatūra  $T_{PAV}$ , FVM temperatūra skirtinguose matavimo taškuose  $T_{FVM1}$  –  $T_{FVM10}$ , vidutinė FVM temperatūra  $T_{FVM,VID}$ , tiekiamojo ir grįžtamajam šilumnešio temperatūrų skirtumas  $\Delta T$ . Lydimosi proceso (įkrovimo) rezultatai paivaizduoti 3 paveiksle, kietėjimo (iškrovimo) – 4 paveiksle.

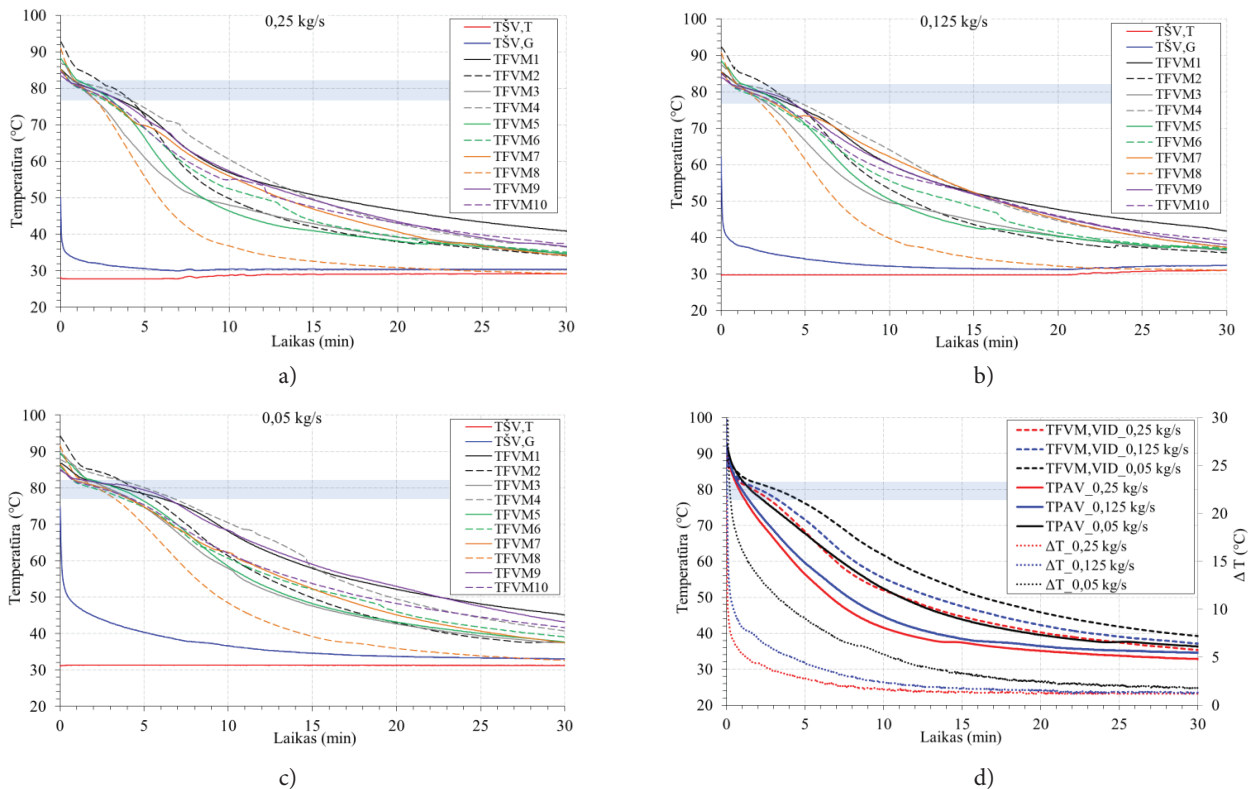
Iš 3 paveikslo a), b) ir c) matyti, kad arčiausiai šilumokaičio paviršiaus esančiame matavimo taške  $T_{FVM8}$  fazinio virsmo temperatūra (77 °C) pasiekama greičiausiai – 1,5 min nuo proceso pradžios, šilumnešio debitui esant 0,25 kg/s; 2,5 min, debitui esant 0,125 kg/s; 5,5 min, debitui esant 0,05 kg/s. Toliausiai nutolusiame taške  $T_{FVM9}$  fazės virsmo temperatūra pasiekama po 21, 22 ir 30 min nuo proceso pradžios esant šilumnešio debitui atitinkamai 0,25, 0,125 ir 0,05 kg/s. Taigi intervale nuo 77 °C iki 82 °C vyksta fazės virsmas, kurio metu sukaupiama šiluma. Taip pat matyti (3 pav., d), kad vidutinė FVM temperatūra  $T_{FVM,VID}$  kinta lėčiausiai esant mažiausiam

šilumnešio debitui (0,05 kg/s). Pastebima, kad skirtumas tarp tiekiamojo ir grįžtamajam šilumnešio yra didžiausias, kai srauto debitas yra 0,05 kg/s, o mažiausias – kai srauto debitas yra 0,25 kg/s. 3 paveikslo (d) atskleidžia, kad šilumokaičio paviršiaus temperatūrai esant didžiausiam ir vidutiniam srautų debitams (0,25 kg/s ir 0,125 kg/s) skiriasi labai nedaug, o esant mažiausiam debitui (0,05 kg/s) skirtumas yra didžiausias. Taigi, 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 kai debitas yra 0,25 kg/s. Debitui esant 0,05 kg/s, matoma didesnė šilumnešio debito įtaka šilumokaičio paviršiaus ir FVM vidutinei temperatūrai (temperatūra kyla lėčiau). Šiuo atveju (debitas 0,05 kg/s) tiekiamojo šilumnešio temperatūra yra vidutiniškai 1 °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).

Iš 4 paveikslo a), b) ir c) 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 proceso metu beveik visuose matavimo taškuose kietėjimo pradžios temperatūra pasiekama per 0,5–1 min. Pažymėtina, kad didesnis laiko skirtumas matomas 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 ir gerokai lėčiau kinta temperatūra. Iš 4 pav. d) matyti, kad vidutinė FVM temperatūra  $T_{FVM,VID}$  kinta lėčiausiai mažiausio šilumnešio debito atveju (0,05 kg/s). Pastebima, kad skirtumas tarp tiekiamojo ir grįžtamajam šilumnešio yra didžiausias, kai debitas yra 0,05 kg/s. Mažiausias, kai debitas yra 0,25 kg/s. Iš 4 paveikslo d) matyti, kad šilumokaičio paviršiaus temperatūra, esant šilumnešio debitams 0,25 kg/s ir 0,125 kg/s, skiriasi labai nedaug, o debito atveju 0,05 kg/s yra didžiausia. Taigi, srautų debitams esant 0,25 kg/s ir 0,125 kg/s,



3 paveikslas. FVM lydymosi (įkrovimo) procesas: a) tiekiamojo karštojo šilumnešio debitas 0,25 kg/s; b) 0,125 kg/s; c) 0,05 kg/s; d) FVM vidutinė temperatūra, šilumokaičio paviršiaus temperatūra ir šilumnešio temperatūrų skirtumas  
 Figure 3. PCM melting (charging) process: a) flow rate of hot fluid supplied 0.25 kg/s; b) 0.125 kg/s; c) 0.05 kg/s; d) average temperature of the PCM, heat exchanger surface temperature and heat transfer fluid temperature difference



4 paveikslas. FVM kietėjimo (iškrovimo) procesas: a) tiekiamojo šaltojo šilumnešio srautas 0,25 kg/s; b) 0,125 kg/s; c) 0,05 kg/s; d) FVM vidutinė temperatūra, šilumokaičio paviršiaus temperatūra ir šilumnešio temperatūrų skirtumas  
 Figure 4. PCM solidification (discharging) process: a) flow rate of the supplied coolant 0.25 kg/s; b) 0.125 kg/s; c) 0.05 kg/s; d) average temperature of the FVM, surface temperature of the heat exchanger and difference of heat transfer fluid temperature

šilumokaičio paviršiaus temperatūrą (kartu ir vidutinę FVM temperatūrą) labiausiai veikia tiekiamojo 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 kyla lėčiau). Šiuo atveju tiekiamojo šilumnešio temperatūra yra vidutiniškai 1 °C aukštesnė, 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 0,3 min ilgiau, o sumažinus iki 0,05 kg/s – 0,9 min ilgiau (vertinant pagal vidutinę FVM temperatūrą).

## Išvados

Atlikus tyrimus nustatyta, kad, esant didesniems šilumnešio debitams ir naudojant tiriamojo FVM šilumos kaupimo įrenginį, vyksta didesnė tiekiamojo šilumnešio temperatūros įtaka lydymosi proceso trukmei. Kitaip tariant, skirtumas tarp didžiausio ir vidutinio šilumnešio srautų debitų (0,25 kg/s ir 0,125 kg/s) nedaug veikia fazės virsmo trukmę ir, sumažinus srauto debitą iki vidutinio (0,125 kg/s), trukmė padidėja: lydymosi metu – 6,5 %, kietėjimo – 17,2 %. Šilumnešio srauto debitą sumažinus iki mažiausio (0,05 kg/s), matoma didesnė debito įtaka fazės virsmo trukmei ir, lyginant su didžiausiu debitu (0,25 kg/s), padidėja: lydymosi metu – 60,7 %, kietėjimo – 48,3 %.

## Literatūra

- Huang, H., Wang, Z., Zhang, H., Dou, B., Huang, X., Liang, H., & Goula, M. A. (2019). An experimental investigation on thermal stratification characteristics with PCMs in solar water tank. *Solar Energy*, 177, 8-21. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.11.004>
- Kabbara, M., Groulx, D., & Joseph, A. (2018). A parametric experimental investigation of the heat transfer in a coil-in-tank latent heat energy storage system. *International Journal of Thermal Sciences*, 130, 395-405. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.05.006>
- Khan, Z., & Khan, Z. A. (2017). Experimental investigations of charging/melting cycles of paraffin in a novel shell and tube with longitudinal fins based heat storage design solution for domestic and industrial applications. *Applied Energy*, 206, 1158-1168. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.043>
- Mahdi, M. S., Mahood, H. B., Khadom, A. A., Campbell, A. N., Hasan, M., & Sharif, A. O. (2019). Experimental investigation of the thermal performance of a helical coil latent heat thermal energy storage for solar energy applications. *Thermal Science and Engineering Progress*, 10, 287-298. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.02.010>
- 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>
- Moldgy, A., & Parameshwaran, R. (2018). Study on thermal energy storage properties of organic phase change material for waste heat recovery applications. *Materials Today: Proceedings*, 5(8), 16840-16848. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.05.137>
- 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>
- Pakalka, S., Valančius, K., Čiuprinskas, K., Pum, D., & Hinteregger, M. (2017, April 27-28). Analysis of possibilities to use phase change materials in heat exchangers-accumulators. In *10th International conference "Environmental Engineering"* (pp. 1-8), Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania. Vilnius: VGTU Press. <https://doi.org/10.3846/enviro.2017.270>
- 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>
- Zauner, C., Hengstberger, F., Mörzinger, B., Hofmann, R., & Walter, H. (2017). Experimental characterization and simulation of a hybrid sensible-latent heat storage. *Applied Energy*, 189, 506-519. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.079>
- Zondag, H. A., de Boer, R., Smeding, S. F., & van der Kamp, J. (2017). Development of industrial PCM heat storage lab prototype. *Energy Procedia*, 135, 115-125. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.495>
- 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, 402-413. <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.05.007>

## INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF MASS FLOW RATE ON PHASE CHANGE MATERIAL BEHAVIOUR

S. Pakalka, K. Valančius, M. Damonskis

### Abstract

The paper presents an experimental study of the influence of heat transfer fluid (HTF) mass flow rate on phase change materials (PCM) behaviour. The experimental study was performed on a specially designed test bench. Research object – PCM based thermal energy storage unit which consists of a stainless steel tank with dual circuit tube-fin copper heat exchanger. The tank (storage volume) was filled with phase change material RT82. The experiment was carried out using three different mass flow rates of HTF: high – 0.25 kg/s, medium – 0.125 kg/s, low – 0.05 kg/s. The analysis showed that in the case of high and medium mass flow rates the melting/solidification process highly depends on the temperature of inlet HTF. Influence of mass flow rate is higher in the case of low mass flow rate.

**Keywords:** thermal energy storage, Phase change material (PCM), latent heat, heat transfer, heat exchanger, heat carrier flow, test bench.