

Environmental engineering Aplinkos inžinerija

RT58 FAZINIO VIRSMO MEDŽIAGOS ŠILUMOS LAIDUMO KOEFICIENTO TYRIMAS NATŪRALIOS KONVEKCIJOS SĄLYGOMIS AKUMULIACINĖS TALPOS ĮKROVIMO METU

Giedrė STRECKIENĖ , Gustas VIGANAUSKAS, Eldar RYNKEVIČ, Artūras BANUŠKEVIČIUS

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva

- gauta 2025 m. gegužės 15 d.
- priimta 2025 m. gegužės 30 d.

Santrauka. Didėjant pasaulinei energijos paklausai, vis daugiau dėmesio skiriama efektyviems energijos kaupimo sprendimams, tarp kurių itin perspektyvios yra fazinio virsmo medžiagos (FVM). Jos leidžia efektyviai saugoti šiluminę energiją naudojant latentinę šilumą, kuri sugerama arba išskiriama agregatinės būsenos virsmo metu. Viena iš svarbiausių FVM savybių efektyviems šilumos mainams yra šilumos laidumo koeficientas. Deja, organinių medžiagų atveju jis nėra aukštas. Šiame straipsnyje pateikiama RT58 FVM tyrimas, kuriame pristatomas eksperimentinis šios medžiagos šilumos laidumo įvertinimas ir medžiagos pritaikymas akumuliacinėje talpoje. Atliekant analitinį vertinimą nagrinėjami šilumos mainai natūralios konvekcijos sąlygomis, kai siekiama įvertinti FVM šilumos laidumo įtaką sukauptos energijos kiekiui akumuliacinėje talpoje. Šiuo atveju nagrinėjama šildomojo paviršiaus temperatūra, šilumos laidumo koeficiento dydis ir kitos FVM pasirinkimas. Eksperimentiniai rezultatai leido patikslinti naudojamos RT58 medžiagos šilumos laidumo koeficiento vertę (0,188 W/(mK), o analitiniai skaičiavimai – tendencijas didinti sistemos su FVM šilumos mainų efektyvumą.

Reikšminiai žodžiai: fazinio virsmo medžiaga, natūrali konvekcija, šilumos atidavimas, šilumos laidumo koeficientas.

✉ Autorius susirašinėti. El. paštas giedre.streckiene@vilniustech.lt

1. Įvadas

Didėjant pasaulinei energijos paklausai, kurią lemia sparčiai augantis gyventojų skaičius ir ekonomikos plėtra, vis daugiau dėmesio skiriama energijos taupymo ir saugojimo sprendimams, kurie galėtų prisidėti prie energijos vartojimo mažinimo ir globalinio atšilimo padarinių švelninimo (Acheampong, 2018). Vienas iš galimų sprendimų, kuris yra plačiai taikomas ir nuolat tobulinamas – energijos akumuliacija. Energijos kaupimo sistemas galima rūšiuoti pagal norimą kaupti energijos tipą (elektrocheminį ir akumuliatorinį energijos kaupimą, šiluminį energijos kaupimą, termocheminį energijos kaupimą), pagal pritaikomumą / suderinamumą galimybes su kitomis sistemomis ar tam tikroje srityje, pvz., sutapdinta elektros ir šilumos gamyba (Streckienė et al., 2011), atsinaujinančios energijos technologijos, transporto sektorius ir t. t. (Koo-hi-Fayegh & Rosen, 2020).

Tarp įvairių energijos saugojimo metodų itin perspektyvios yra fazinio virsmo medžiagos (FVM), kurios pastaraisiais dešimtmečiais sulaukė daug dėmesio. FVM technologija leidžia efektyviai saugoti šiluminę energiją, naudojant slaptąją šilumą, kuri sugerama arba išskiriama

medžiagos agregatinės būsenos virsmo metu. Vykstant agregatinės būsenos virsmui, nesikeičia FVM temperatūra, tai gali būti sėkmingai naudojama temperatūrai stabilizuoti. Tokiu būdu FVM leidžia geriau užtikrinti patalpų vidaus temperatūros stabilumą, gerina mikroklimatą ir mažina pastatų energijos sąnaudas šildyti bei vėsinti. FVM taikymo galimybės apima įvairias sritis – nuo pasyvių šilumos saugojimo sistemų, tokių kaip sienų arba grindų šildymo elementai, iki aktyvių sistemų, kuriose naudojamos pažangios integracijos technologijos (Faraj et al., 2021; Pakalka et al., 2024).

FVM klasifikacija prasideda nuo to, kokia fazių virsmo transformacija įvyksta. Dažniausiai pasitaikantis agregatinės būsenos virsmas yra iš kietojo kūno į skystąjį lydymosi metu ir atvirkštinis – kietėjimo metu. Šios transformacijos vyksta trijose skirtingose fazinio virsmo medžiagų rūšyse: organinėse, neorganinėse ir sudėtinėse. Organinės FVM apima parafino vaškus bei neparafinines medžiagas, tokias kaip riebalų rūgštys, esteriai, glikolio rūgštys ir alkoholių junginiai (Okogeri & Stathopoulos, 2021). Neorganinės FVM apima hidratuotus druskų junginius ir metalus. Sudėtinės medžiagos gaminamos maišant organines,

neorganines medžiagas su grafitu ar nanometalais, siekiant sukurti medžiagą, turinčią reikiamas šilumines savybes (Teamah, 2023). Organinės rūšies FVM tinkamos naudoti žemesnėse temperatūrose (<200 °C), jos kietėja esant nedideliui atvėsimui žemiau kietėjimo taško ir pasižymi fazių kaitos stabilumu, nesukeliant korozijos. Pagrindiniai šios rūšies medžiagų trūkumai yra mažas šiluminis laidumas, didelis tūrio pokytis ir degumas. Neorganinės FVM pasižymi didesniu šilumos laidumu ir lydomosi entalpija, taip pat jų panaudojimo temperatūrinis intervalas yra didesnis. Trūkumai – didelė medžiagos peršaldymo tikimybė, korozinis pobūdis, segregacijos sukeliamas nestabilumas įvairių ciklų metu (Noohi et al., 2022).

Viena iš pagrindinių FVM savybių, kurią būtina įvertinti renkantis tokią medžiagą sistemai, yra šiluminis laidumas. Nuo jo priklauso energijos akumuliacijos sistemos efektyvumas ir našumas. Kuo didesnis medžiagos šiluminis laidumas, tuo greičiau įsisavinama ir išleidžiama energija iš medžiagos. Didesnis šiluminis laidumas padeda užtikrinti, kad skirtinguose FVM sluoksniuose temperatūra būtų viena ir tarp sluoksnių nesusidarytų temperatūrų skirtumai, taip pat padeda išlaikyti homogeninį lydimąsi, medžiagos struktūra išlieka nepakitusi, neatsiranda medžiagos dalelių atsiskyrimų (Esfandeh, 2024). FVM taikymas vis plačiau nagrinėjamas užpildant akumuliacines talpas, naudojamas karštam vandeniui ruošti. Tokie įrenginiai integruojami saulės energijos transformavimo sistemose su plokščiaisiais arba vakuuminiais saulės kolektoriais bei hibridinėse šildymo sistemose derinant su šilumos siurbliais. Šiais atvejais naudojama FVM akumuliacinėse talpyklose gali sukaupti didesnį šilumos kiekį mažesniame tūryje, todėl FVM tampa efektyvesnės už tradicinės šilumos kaupimo medžiagas. Be to, tokios akumuliacinės talpos leidžia papildyti šilumos tiekimo laiką bei išlaikyti aukštą tiekiamo šilumnešio temperatūrą (Li et al., 2023).

Literatūros apžvalga parodė, kad medžiagos su fazių virsmu tampa vis aktualesnės tiek aktyviosiose, tiek pasyvioiose sistemose. Tačiau būtina atsižvelgti į FVM fizikines charakteristikas, jų įtaką nagrinėjamos sistemos veikimui bei nustatyti, kuri FVM būtų tinkamiausia nagrinėjamo atveju. Nustatyta viena iš kertinių savybių yra šilumos laidumo koeficientas. Todėl medžiagos pasirinkimas tampa kompleksiniu uždaviniu, formuojančiu iššūkius. Atitinkamai šios medžiagos tobulinamos siekiant pagerinti jų šilumines savybes bei pagerinti visos sistemos efektyvumą. Šiame tyrime išsamiai analizuojama FVM RT58, jos pritaikymas šilumos akumuliacijai bei eksperimentiškai įvertinamas jos šilumos laidumo koeficientas. Šios medžiagos pasirinkimą lėmė jos galimas pritaikomumas karšto vandens ruošimo sistemose. Tyrimu siekiama įvertinti faktinį RT58 šilumos laidumo koeficientą, nes literatūroje dažniausiai šis dydis nurodomas 0,2 W/(mK), bei išnagrinėti šilumos laidumo koeficiento įtaką šilumos akumuliacijos talpos sukauptam energijos kiekiui – tam atliekami analitiniai šilumos mainų skaičiavimai. Papildomai vertinama temperatūrų skirtumo akumuliacinėje talpoje įtaka.

2. Metodika

2.1. Šilumos mainų įvertinimas akumuliacinėje talpoje, pripildytoje FVM

FVM taikymo tyrimui pasirenkama išanalizuoti parafino RT58 pripildytą talpą ir joje vykstančius šilumos mainus įkrovimo metu. Talpos apatinis paviršius šildomas iš saulės kolektorių atitekančiu fluidu (galima ir kitais būdais palaikyti apatinio paviršiaus temperatūrą). Laikoma, kad apatinio paviršiaus temperatūra (t_s) nekinta talpos įkrovimo metu, be to, FVM yra pasiekusi lydomosi temperatūrą. Tokiu būdu siekiama įvertinti tik fazės virsmo (kietoji medžiaga – skystis) metu sukaupiamą energiją. Šis energijos kiekis (kJ) įvertinamas formule:

$$E = Mh_{sf}, \quad (1)$$

čia M – medžiagos masė (kg); h_{sf} – savitoji lydomosi šiluma (kJ/kg).

Teoriniu skaičiavimu taip pat siekiama nustatyti ištirpusio parafino kiekį po tam tikro laikotarpio (3 valandų). Tokiu būdu nustatoma išsilydžiusios FVM masė:

$$M = \frac{E}{h_{sf}} = \frac{\dot{q}A\tau}{h_{sf}} = \frac{\alpha A(t_s - t_l)\tau}{h_{sf}}, \quad (2)$$

čia $\dot{q}$ – šilumos srauto tankis (W/m²); A – šildomojo paviršiaus plotas (m²); τ – laikas (s); α – vidutinis šilumos atidavimo koeficientas (W/(m²K)); t_s – paviršiaus temperatūra (°C); t_l – medžiagos temperatūra (°C).

Nagrinėjamo atveju šiluma pernešama daugiausia natūralios konvekcijos būdu, todėl, norint nustatyti šilumos atidavimo koeficientą, apskaičiuojamas Nu kriterijus (Lloyd & Moran, 1974):

$$Nu = \frac{\alpha L_c}{\lambda} = 0,15Ra^{1/3}, \quad (3)$$

čia Ra – Reilėjaus kriterijus, $Ra = \frac{g\beta(t_s - t_l)L_c^3}{\nu^2}Pr$; g – laisvojo kritimo pagreitis (m/s²); β – šiluminio plėtimosi koeficientas (1/K); t_l – FVM temperatūra (°C); t_s – paviršiaus temperatūra (°C). Pr – Prandtliaus kriterijus, $Pr = \frac{\nu}{a}$; ν – kinematinis klampumo koeficientas (m²/s); a – temperatūros laidumo koeficientas (m²/s); L_c – charakteringas matmuo (m), $L_c = A/p$; A – plotas (m²); p – perimetras (m); λ – FVM šilumos laidumo koeficientas (W/mK), nustatomas eksperimentiniu būdu.

Norint palyginti FVM akumuliacijos galimybes su vandeniu pripildyta tokiu pačiu kiekiu akumuliacinėje talpoje, nustatomas analogiškame tūryje sukauptas šilumos kiekis:

$$Q = (\rho VC_p)_v \Delta t, \quad (4)$$

čia ρ – tankis (kg/m³); V – tūris (m³); C_p – savitoji izobarinė šiluma (J/(kgK)); Δt – temperatūrų skirtumas (°C); indeksas v nurodo, kad taikomos vandens savybės.

Pagrindinės termofizinės FVM RT58 savybės (Pakalaka et al., 2024), taikomos atliekant analitinį skaičiavimą, apima lydimosi / kietėjimo temperatūrų intervalą 53–59 °C;

lydymosi savitąją šilumą 181 kJ/kg; specifinę šiluminę talpą 2,1 kJ/kgK; kietosios fazės tankį 0,9 kg/m³; dinaminės klampios koeficientą 0,0269 kg/(m·s); šiluminio plėtimosi koeficientą $1,1 \cdot 10^{-4}$ 1/K (El Idi & Karkri, 2020). Teorinio skaičiavimo metu įvertinamas pagrindinis atvejis bei atliekama parametrinė analizė, kurios metu tiriama šilumos laidumo koeficiento bei apatinio paviršiaus temperatūros įtaka.

2.2. FVM šilumos laidumo eksperimentinis tyrimas

Medžiagų šilumos laidumui nustatyti yra taikomi keli eksperimentiniai metodai. Juos galima suskirstyti į dvi pagrindines kategorijas: nusistovėjusios būsenos ir pereinamojo vyksmo metodus. Taikant nusistovėjusios būsenos metodus bandinys tiriamas pasiekus stabilų temperatūros pasiskirstymą. Šilumos laidumas nustatomas įvertinant vienmatį šilumos srautą dėl temperatūros gradiento per bandinį. Šiame darbe atliekant eksperimentą nusistovėjusios būsenos metodu siekiama nustatyti tiriamosios medžiagos FVM RT58 šilumos laidumo koeficientą.

Eksperimentui buvo naudojama FVM RT58 plokštelė, kurios ilgis – 149 mm, plotis – 150 mm, storis – 105 mm. Plokštelė įdėta į šilumą izoliuojantį rėmelį. Rėmelio išoriniai matmenys: ilgis – 249 mm, plotis – 253 mm, storis – 100 mm (1 pav., a). Tyrimui atlikti buvo naudojamas šilumos laidumo bandymų stendas IZOL-01P (1 pav., b) su sunumeruotais pagrindiniais stendo komponentais. Šį bandymų stendą sudaro „Ahlborn“ daugiakanalis duomenų kaupiklis ALMEMO 5690 (žr. Nr. 1, 1 pav., b). Prie šio duomenų kaupiklio prijungta šilumos srauto matavimo plokštė FQA018C, kurios ilgis ir plotis 120 mm, matavimo diapazonas nuo –40 iki +80 °C, o tikslumas +23 °C temperatūroje – 5 %. Prie šio duomenų kaupiklio taip pat prijungti temperatūros jutikliai, jie fiksuoja šildomos (2) ir aušinamos plokštelių (3) paviršiaus temperatūras. Šių paviršių temperatūrą fiksuoja NiCr-Ni T 190-0 termoporus, kurių matavimo diapazonas nuo –25 iki +400 °C ir jos priskiriamos 2 tikslumo klasei. Kaitinimo plokštelės (2) paviršiaus temperatūra yra reguliuojama temperatūros regulatoriumi (4), kuris įjungia arba išjungia relę, tiekiančią

elektros energiją plokštėje esančiam elektriniam šildytuvui. Aušinamas paviršius (3) aušinamas vandentiekio vandeniu. Mėginio storiui matuoti prie duomenų kaupiklio prijungiamas padėties jutiklis FWA050T (5). Didžiausias padėties jutiklio matavimo ilgis yra 50 mm, o jo skiriama geba – 0,01 mm (Zakarka et al., 2021).

Bandymo metu stebimos šiltos ir šaltos plokštelių temperatūros, bandinio storis ir šilumos srautas, pratekantis pro bandinį į matavimo plokštelę. Eksperimento metu palaikoma 35 °C šiltosios plokštelės temperatūra, o šaltosios plokštelės temperatūra nėra pastovi. Bandymas atliekamas tol, kol pastebimas šilumos srauto nusistovėjimas. Duomenys nuskaitomi 1 sekundės intervalu. Rezultatams apskaičiuoti vertinami tik paskutinių 30 minučių duomenys.

Šilumos laidumo koeficiento reikšmei nustatyti taikomas Furjė dėsnis. Šilumos srauto tankis, pratekantis per bandinio plokštelę, yra lygus:

$$\dot{q} = \frac{\lambda}{\delta} (t_1 - t_2), \quad (5)$$

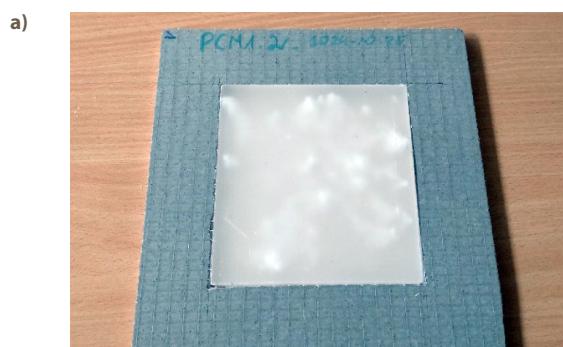
čia λ – šilumos laidumo koeficientas (W/(mK)); δ – bandinio storis (m); t_1 – šiltosios plokštelės temperatūra (°C); t_2 – šaltosios plokštelės temperatūra (°C); $\dot{q}$ – šilumos srauto tankis (W/m²).

Remiantis šia lygtimi nustatomas medžiagos šilumos laidumo koeficientas. Matavimų ir skaičiavimų rezultatai pateikiami kitame skyriuje.

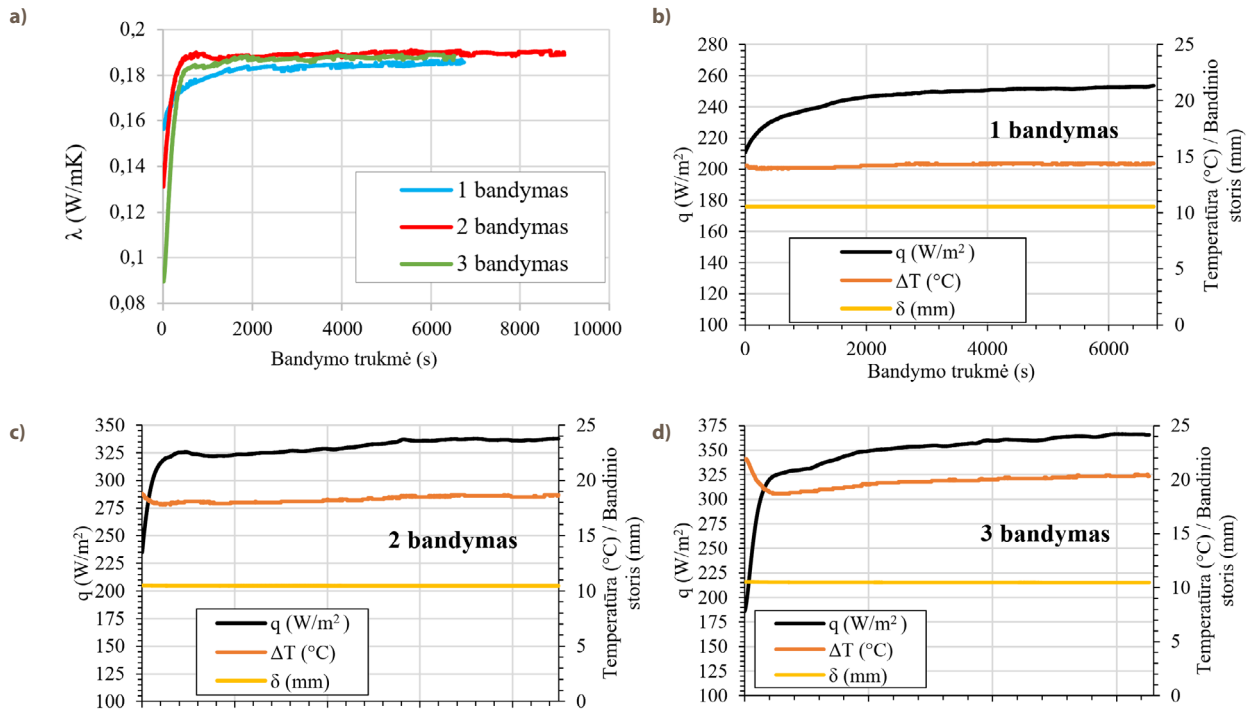
3. Rezultatai ir jų aptarimas

3.1. Eksperimento rezultatai

Šiluminio laidumo koeficientui nustatyti buvo atlikti trys bandymai. Siekiant sulaukti nusistovėjusios būsenos parametrų visų bandymų trukmė išėjo skirtinga. Šių bandymų gauti išsamūs duomenys pateikiami 2 paveiksle. Iš grafiko matyti, kad po 3600 s, t. y. 1 valandos, šilumos laidumo procesas per tiriamąją plokštelę dažnu atveju pradeda stabilizuotis, todėl galima jau skaičiuoti FVM šilumos laidumo vertę. Bandymų metu gautos šilumos laidumo koeficiento



1 paveikslas. Eksperimento įranga ir medžiagos: a) tiriamosios medžiagos plokštelė; b) IZOL-01P šiluminio laidumo tyrimo stendas



2 paveikslas. FVM šilumos laidumo koeficiento reikšmės bei 1–3 bandymų išsamūs duomenys

reikšmės esant stacionariam režimui svyruoja nuo 0,18 iki 0,19 W/(mK).

Viso 1 bandymo trukmė sudarė 6742 s, iš kurių pastebėta, kad po 3600 s procesas nekito. Šilumos srauto tankis per plokštelę siekė 250 W/m². Temperatūrinis skirtumas tarp šiltos ir šaltos plokštelių buvo apie 14–15 °C, o bandinio storis nepasikeitė. 2 bandymas truko 8991 s, o šilumos laidumo procesas dėl nepastovaus temperatūrinio skirtumo vis kito. Procesas tapo pastovus tik po 7200 s. Šilumos srauto tankis per plokštelę paskutinį pusvalandį buvo 336–338 W/m². Temperatūrinis skirtumas tarp šiltos ir šaltos plokštelių buvo apie 18–19 °C, o bandinys suplonėjo 0,04 mm. 3 bandymo trukmė sudarė 6526 s, šilumos laidumo procesas dėl nepastovaus temperatūrinio skirtumo vis kito. Procesas tapo pastovus tik po 4500 s. Šilumos srauto tankis per plokštelę buvo 360–366 W/m². Temperatūrinis skirtumas tarp šiltos ir šaltos plokštelių buvo apie 20–21 °C, o bandinys suplonėjo 0,06 mm.

Iš visų trijų bandymų aiškiai matoma tiesioginė šilumos srauto tankio priklausomybė nuo temperatūrinio skirtumo tarp šiltos ir šaltos plokštelių. Kuo didesnis temperatūrinis skirtumas, tuo didesnis šilumos srauto tankis prateka per bandinio plokštelę. Tačiau reikia paminėti, kad temperatūriniam skirtumui įtaką daro tuo metu esančio vandentiekio temperatūra, nes šiltosios plokštelės paviršiaus temperatūra palaikoma tokia pati, t. y. 35 °C, o vandentiekio temperatūros bandymo metu nebuvo galima koreguoti.

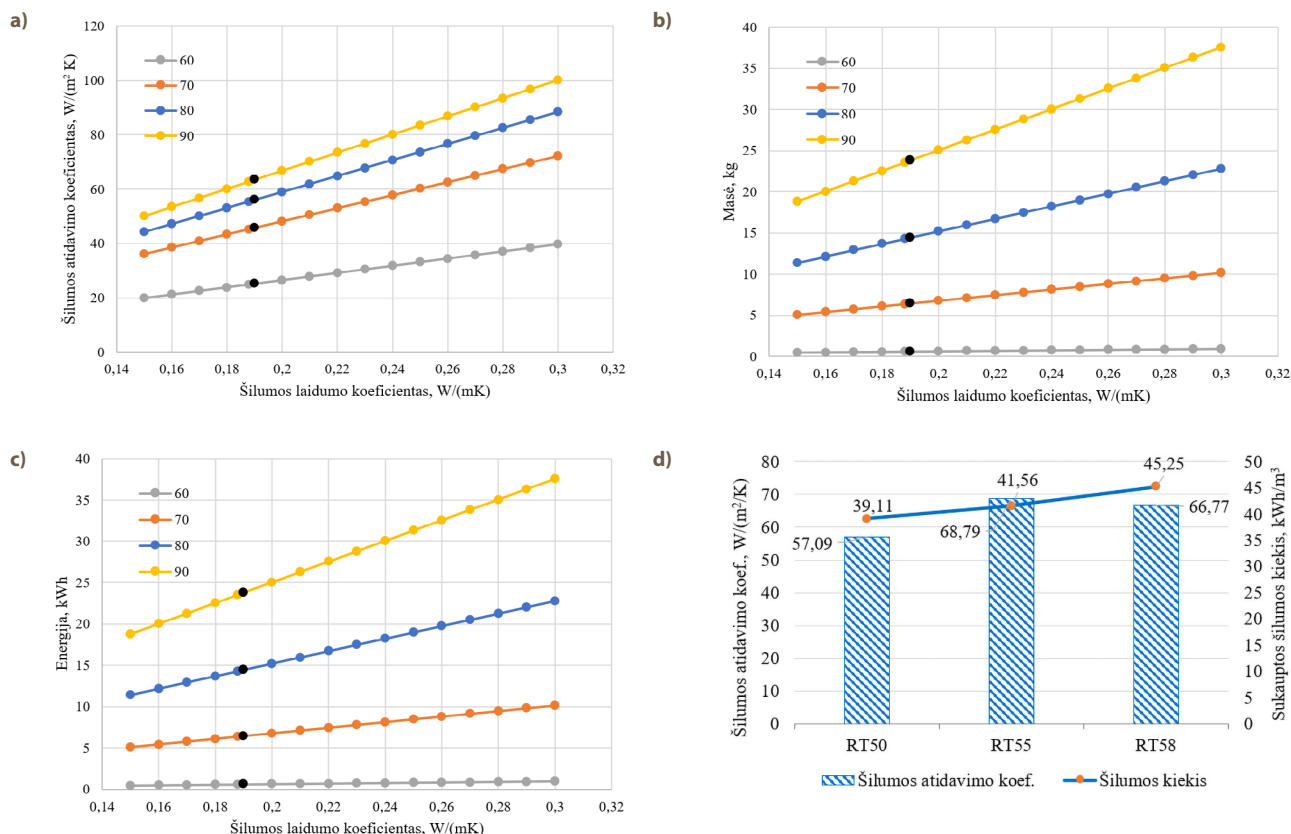
Remiantis gautais duomenimis ir pritaikius 5 formulę, buvo nustatyta medžiagos šilumos laidumo koeficiento vertė. Bandymo rezultatai parodė, kad galima pasikliauti tiek paskutinėmis eksperimentiniu stendu fiksuotomis šilumos laidumo koeficiento vertėmis, tiek paskutinio 30 mi-

nučių laikotarpio. O, pasiekus stacionarias šilumos laidumo proceso sąlygas, galima naudoti tik paskutinio laikotarpio aktualias dydžių vertes. Atliekant eksperimentą pasirinktomis sąlygomis FVM nesideformuoja, tačiau jei karštojo paviršiaus temperatūra būtų keliama, FVM pradėtų lydytis ir vyktų plastinės deformacijos. Atlikus eksperimentą nustatyta, kad tiriamosios medžiagos RT58 šilumos laidumo koeficientas lygus 0,188 W/(mK), kai karštosios plokštelės paviršiaus temperatūra palaikoma 35 °C, tai atitinka gamintojo deklaruojamą vertę 0,2 W/(mK). Tolesniems skaičiavimams bus naudojama ši patikslinta vertė.

3.2. Teorinio skaičiavimo rezultatai

Analitinio tyrimo metu nustatoma, kokią įtaką turi šilumos laidumo koeficientas akumuliacinės talpos įkrovimo metu šilumos atidavimo koeficientui, išsilydžiusios masės kiekiui bei sukauptai energijai. Įkrovimas vykdomas natūralios konvekcijos būdu esant skirtingai paviršiaus ir FVM temperatūrai. Šiuo atveju vertinama, kad šildomojo paviršiaus temperatūra kinta nuo 60 iki 90 °C (3 pav.). Taip pat palyginama alternatyva naudoti kitą FVM. Baziniu variantu vertinama, kad cilindrinės talpos skersmuo yra 50 cm, o apatinis paviršius (dugnas) yra šildomas ir palaikoma pastovi jo temperatūra. Analizuojamas 3 valandų laikotarpis.

3 paveiksle (a, b, c) matyti, kad šilumos laidumo koeficiento įtaka didėja augant apatinio paviršiaus temperatūrai, tai skatina aktyvesnes natūralios konvekcijos sroves. Esant nedideliam temperatūrų skirtumui tarp šildomojo paviršiaus ir FVM lydymosi temperatūros šilumos laidumo koeficiento dydis mažiau veikia išsilydžiusios medžiagos masę. Juodai pažymėti taškai atspindi atvejį, jei naudojama



3 paveikslas. Šilumos laidumo koeficiento įtaka: a) šilumos atdavimo koeficientui; b) išsilydžiusiai masei; c) sukauptam energijos / šilumos kiekiui; d) RT50, RT55 ir RT58 palyginimas

eksperimente bandyta medžiaga. Šiuo atveju šilumos atdavimo koeficientas kinta nuo 24,9 iki 62,8 $W/(m^2 K)$, jei paviršiaus temperatūra padidinama nuo 60 iki 90 °C. Atitinkamai išsilydžiusios medžiagos masės padidėjo nuo 0,58 kg iki 23,53 kg, o sukauptas energijos kiekis nuo 0,03 kWh iki 1,18 kWh. Jei šilumos laidumo koeficientas padidėtų iki 0,3 $W/(mK)$, tai leistų padidinti šilumos atdavimo koeficientą iki 100,2 $W/(m^2 K)$ ir išsilydžiusios medžiagos masę sudarytų 37,5 kg, tai leistų sukaupti 1,89 kWh šilumos, kai šildomojo paviršiaus temperatūra 90 °C. Parametrinė analizė atskleidžia būtinybę didinti FVM šilumos laidumo koeficientą arba didinti aktyvų šilumos mainų paviršiaus plotą, pavyzdžiui, pasitelkiant briaunotuosius paviršius.

Norint palyginti šią sistemą su vandens akumuliacinės talpos kaupimo galimybėmis, tyrime apskaičiuotas sukauptos šilumos tankis, t. y. kiek kWh tenka 1 m³. Pagal apskaičiuotą išsilydžiusios FVM tūrį, nustatyta, kad šilumos tankis šioje sistemoje sudaro 45,25 kWh/m³, o tokia pačia vandens kiekyje energijos tankis sudaro 25,67 kWh/m³ (temperatūrų skirtumas 58–80 °C), tai atitinka literatūroje nurodomas vertes (Bentivoglio et al., 2021).

Kadangi FVM turėtų būti naudojama tokiam pačiam tikslui, lyginamos FVM turi turėti panašų skystosios ir kietosios agregatinės būsenos virsmo intervalą. Palyginimui parenkamos RT50, RT55 ir RT58 medžiagos, kurių savybės pateikiamos gamintojo tinklalapyje (Rubitherm, 2025). Visų šių parafino pagrindu FVM šilumos laidumo koeficiento

vertę gamintojas deklaruoja 0,2 $W/(mK)$, o savitąją izobarinę šilumą 2,0 kJ/(kgK). Šių trijų FVM palyginimo rezultatai pateikti 3 paveiksle, d. Palyginamasis tyrimas parodė, kad RT50 sukaupiamas šilumos kiekis (39,11 kWh/m³) mažesnis, nes leidžiamos mažesnės temperatūros, iki kurių gali būti šildomas paviršius, tačiau ši medžiaga tinkama, jei norime pradėti akumuliuoti šilumą žemesnėje temperatūroje. RT55 ir RT58 turi panašius rodiklius (tiek šilumos atdavimo koeficientas, tiek sukauptos šilumos kiekis viename m³), todėl kiekvienos iš jų atskirai naudojimas priklauso nuo atskiro pritaikomojo atvejo.

Apibendrinant teorinius skaičiavimus, matyti aiškios tendencijos gerinti FVM šilumos laidumo koeficientą, tai kartu leistų plačiau naudoti šias medžiagas pastatų ir energijos inžinerijoje. Atskirų FVM panaudojimas stipriai priklauso nuo naudojimo srities, tai kartu kelia iššūkius rinkti tinkamas medžiagas ir kartu siekti efektyvių šilumos mainų procesų.

4. Išvados

Didėjant energijos paklausai ir vis plačiau naudojant atsinaujinančius energijos šaltinius, energijos kaupimo sprendimai tampa vis aktualesni. Tai kartu lemia ir fazinio virsmo medžiagų plėtrą, ir naudojimą kaupiant šilumą. Šiame tyrime atlikti fazinio virsmo RT58 eksperimentiniai tyrimai

leidžia geriau suprasti šių medžiagų šilumos laidumo procesą. Tyrimo metu, nustatyta, kad

- eksperimentiškai įvertinta FVM RT58 šilumos laidumo vidutinė reikšmė 0,188 W/mK praktiškai atitinka gamintojo deklaruojamą vertę (0,2 W/(mK));
- didėjantis FVM šilumos laidumo koeficientas gerina šilumos perdavimą, nes leidžia efektyviau perduoti šilumą iš šildomo paviršiaus į medžiagą. Padidinus šilumos laidumo koeficientą nuo 0,188 W/(mK) iki 0,3 W/(mK), šilumos atidavimo koeficientas išauga nuo 62,8 W/(m²K) iki 100,2 W/(m²K), kai šildomojo paviršiaus temperatūra 90 °C;
- apskaičiuotas išsilydžiusios FVM šilumos sukaupimas (45,25 kWh/m³) yra žymiai didesnis nei tokio paties vandens kiekio sukaupta šiluma (25,67 kWh/m³) esant temperatūrų skirtumui 58–80 °C;
- šilumos kaupimo tikslams tikslinga naudoti RT55 arba RT58 fazinio virsmo medžiagas, kurios gali veikti platesniame veikimo diapazone.

Analitiniai skaičiavimai parodė, kad sistemos su FVM, kai šilumos mainų procesus lemia natūrali konvekcija, ypač jautrios FVM šilumos laidumo koeficientui, todėl šios fizikinės savybės didinimo sprendiniai reikšmingai prisidėtų prie sistemų efektyvumo didinimo.

Literatūra

- Acheampong, A. O. (2018). Economic growth, CO₂ emissions and energy consumption: What causes what and where? *Energy Economics*, 74, 677–692. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.07.022>
- Bentivoglio, F., Rouge, S., Soriano, O., & Tempass de Sousa, A. (2021). Design and operation of a 180 kWh PCM heat storage at the Flaubert substation of the Grenoble urban heating network. *Applied Thermal Engineering*, 185, Article 116402. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116402>
- El Idi, M. M., & Karkri, M. (2020). Heating and cooling conditions effects on the kinetic of phase change of PCM embedded in metal foam. *Case Studies in Thermal Engineering*, 21, Article 100716. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100716>
- Esfandeh, S. (2024). Introduction to phase change materials. In *Advanced materials-based thermally enhanced phase change materials* (pp. 1–17). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21574-2.00002-2>
- Faraj, K., Khaled, M., Faraj, J., Hachem, F., & Castelain, C. (2021). A review on phase change materials for thermal energy storage in buildings: Heating and hybrid applications. *Journal of Energy Storage*, 33, Article 101913. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101913>
- Koohi-Fayegh, S., & Rosen, M. A. (2020). A review of energy storage types, applications and recent developments. *Journal of Energy Storage*, 27, Article 101047. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101047>
- Li, Y., Hu, B., Wang, D., Liu, H., Liu, Y., & Haghighat, F. (2023). Enhancing the performance of solar water heating systems: Application of double-layer phase change materials. *Renewable Energy*, 219, Article 119367. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119367>
- Lloyd, J. R., & Moran, W. R. (1974). Natural convection adjacent to horizontal surface of various planforms. *Journal of Heat Transfer*, 96(4), 443–447. <https://doi.org/10.1115/1.3450224>
- Noohi, Z., Nosouhian, S., Niroumand, B., & Timelli, G. (2022). Use of low melting point metals and alloys (T_m < 420 °C) as phase change materials: A review. *Metals*, 12(6), Article 945. <https://doi.org/10.3390/met12060945>
- Okogeri, O., & Stathopoulos, V. N. (2021). What about greener phase change materials? A review on biobased phase change materials for thermal energy storage applications. *International Journal of Thermofluids*, 10, Article 100081. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100081>
- Pakalka, S., Donėlienė, J., Rudzikas, M., Valančius, K., & Streckienė, G. (2024). Development and experimental investigation of full-scale phase change material thermal energy storage prototype for domestic hot water applications. *Journal of Energy Storage*, 80, Article 110283. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.110283>
- Rubitherm. (2025). *FVM medžiagos*. <https://www.rubitherm.eu/en/index.php/productcategory/organische-pcm-rt>
- Streckienė, G., Martinaitis, V. ir Šiupšinskas, G. (2011). Šilumos akumuliacinės talpos parinkimo ekonominis vertinimas, esant skirtingai mažos galios kogeneracinės jėgainės veikimo strategijai. *Energetika*, 57(1), 1–10. <https://doi.org/10.6001/energetika.v57i1.2038>
- Teamah, H. M. (2023). Introduction and history of phase change materials' heat transfer. In *Phase change materials for heat transfer* (pp. 1–26). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91905-0.00003-4>
- Zakarka, M., Skuodis, Š., Šiupšinskas, G., & Bielskus, J. (2021). Compressive strength and thermal properties of sand–bentonite mixture. *Open Geosciences*, 13(1), 988–998. <https://doi.org/10.1515/geo-2020-0289>

INVESTIGATION OF THE THERMAL CONDUCTIVITY OF RT58 PHASE CHANGE MATERIAL DURING THE CHARGING PROCESS OF A THERMAL STORAGE TANK UNDER NATURAL CONVECTION CONDITIONS

G. Streckienė, G. Viganas, E. Rynkevič, A. Banuškevičius

Abstract

As global energy demand grows, more and more attention is being paid to efficient energy storage solutions, among which Phase Change Materials (PCMs) are particularly promising. They allow efficient thermal energy storage by using the latent heat that is absorbed or released during the transformation of the aggregate state. One of the most important properties of PCM for efficient heat transfer is the thermal conductivity. Unfortunately, it is not high for organic materials. This paper presents a study of RT58 PCM, presenting an experimental evaluation of the thermal conductivity of this material and the application of the material in a storage tank. The analytical evaluation focuses on the heat transfer under natural convection conditions, where the aim is to assess the influence of the thermal conductivity of the PCM on the amount of energy stored in the storage tank. In this case, the temperature of the heating surface, the magnitude of the thermal conductivity coefficient and the choice of the other PCM are considered. The experimental results allowed to refine the value of the thermal conductivity coefficient of the RT58 material used (0.188 W/(mK)) and the analytical calculations allowed to trend towards an increase of the heat exchange efficiency of the system with the PCM.

Keywords: phase change material, natural convection, heat transfer, thermal conductivity coefficient.