

Environmental engineering Aplinkos inžinerija

FAZINIO VIRSMO MEDŽIAGOS CHARAKTERISTIKŲ ŠILUMOS KAUPIKLYJE SKAITINIS MODELIAVIMAS

Saulius PAKALKA¹, Kęstutis VALANČIUS¹, Giedrė STRECKIENĖ ^{1*}, Vaidvilė ULBIKAITĖ²

¹*Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva*

²*VŠĮ Perspektyvinių technologijų taikomųjų tyrimų institutas, Vilnius, Lietuva*

Gauta 2018 m. birželio 10 d.; priimta 2018 m. birželio 25 d.

Santrauka. Siekiant efektyviai išnaudoti perteklinę, atliekinę ar atsinaujinančių energijos išteklių gaminamą energiją, vis dažniau taikomas fazinio virsmo medžiagų (FVM) panaudojimas pastato energetinėse sistemose. Kartu tai kelia naujus technologinius iššūkius pasirenkant konkrečias medžiagas, sistemų projektinius sprendinius, nes reikia gerai išmanyti šilumos mainų procesą vykstant fazės virsmui. Šiame darbe siekiama ištirti šilumos mainus šilumos kaupiklyje su fazinio virsmo medžiagomis naudojantis COMSOL *Multiphysics* programa. Analizės metu įvertintos medžiagos savybės vykstant fazės virsmui. Tai leido nustatyti, kad medžiagos šilumos laidumo koeficientas turi didelę reikšmę šilumos mainų intensyvinimui. Be to, atskirų taškų analizė tyrimo objekte atskleidė, kad per nagrinėjamąjį laikotarpį FVM paviršiniame sluoksnyje fazės virsmas neįvyksta. Siekiant to išvengti, galimi papildomi sprendimai, tokie kaip šilumai laidžių medžiagų integravimas į FVM arba šilumos mainų paviršiaus ploto didinimas.

Reikšminiai žodžiai: šilumos kaupimas, fazinio virsmo medžiaga (FVM), fazinio virsmo šiluma, šilumos mainai, skaitinis modeliavimas, COMSOL *Multiphysics*.

Įvadas

Nuosekliai didėjanti atsinaujinančių energijos išteklių (AEI) dalis bendrajame energijos balanse skatina ieškoti vis efektyvesnių energijos kaupimo būdų siekiant subalansuoti energijos gamybos ir vartojimo režimus, nes AEI pasižymi energijos gamybos nepastovumu laike. Šilumos kaupimo sistemų taikymas yra vienas iš būdų, užtikrinančių efektyvų ir stabilų atsinaujinančios, perteklinės ar atliekinės energijos panaudojimą, kai energijos gamybos ir vartojimo režimai nesutampa.

Europos Sąjungos AEI, šildymo ir vėsinimo, šilumos energijos kaupimo strategijos ir gairės numato, 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 (European Commission [EC], 2016). Sistemos, galinčios efektyviai kaupti didelius energijos kiekius, suteikia galimybę prisidėti prie energijos tiekimo tinklų apkrovos valdymo bei balansavimo.

Šilumos energija gali būti kaupiama beveik nekintant jos temperatūrai kai kuriose medžiagose – tai vadinamoji fazinio virsmo šiluma (lydymosi šiluma, garavimo

šiluma). Fazinio virsmo šiluma apibūdina energijos kiekį, reikalingą medžiagos agregatinei būsenai pakeisti. Tai gali būti fazės virsmas iš kietosios į kietąją, iš kietosios į skystąją ir iš skystosios į dujinę. Vykstant medžiagos fazės virsmui iš skystosios į dujinę, pastebimi kiti procesai, kai fazinio virsmo temperatūra smarkiai priklauso nuo kraštinių sąlygų ir medžiagos fazės virsmas naudojamas ne tik šilumai kaupti (Mehling ir Cabeza, 2008).

Fazinio virsmo medžiagų (FVM) pagrindu veikiančios šilumos kaupimo sistemos gali užimti žymiai mažesnę tūrį lyginant su nekintančios fazės šilumos kaupimo sistemomis. Tačiau šilumos perdavimas naudojant FVM yra žymiai sudėtingesnis ir praktiniai tyrimai parodė (ypač su žemos lydymosi temperatūros druskomis), kad medžiagų savybės gali pablogėti po tam tikro fazės virsmo ciklų kiekio (Gil et al., 2010).

Vykstant FVM kietėjimo procesui mažėja medžiagos užimamas tūris, o esant netolygiam medžiagos fazės virsmui iš skystosios į kietąją gali susiformuoti laisvasis tūris (tuštumos). Tipinėse sistemose akumuliacinės talpyklos pripildomos FVM iki 80 % bendro tūrio, taip paliekant vietos medžiagai plėstis lydantis FVM. Chiew ir kiti (2017)

*Autorius susirašinėti. El. paštas giedre.streckiene@vgtu.lt

eksperimentiškai ir skaitiškai nagrinėjo tuštumų formavimąsi kietėjimo procese ir tuštumų įtaką šilumos mainų efektyvumui. Tyrime nustatyta, kad laisvojo tūrio (tuštumų) buvimas sistemoje sudaro kompleksiškesnį modeliavimo atvejį ir netinka naudoti tipines eksperimentines fazinio virsmo kreives modelio patikrai. Be to, FVM lydymosi procesas esant laisvajam oro tūriui užtrunka ilgiau nei be šių tuštumų, nes sumažėja šilumos mainų paviršiaus plotas.

Pastaraisiais metais atliekama daug FVM tyrimų taikant įvairių kompiuterinio modeliavimo programinę įrangą. Tai leidžia greičiau ir pigiau, lyginant su eksperimentiniais tyrimais, atlikti FVM pagrindu veikiančių šilumos kaupimo sistemų analizę. Tačiau FVM modeliavimas yra kompleksiškas uždavinys, reikalaujantis taikyti įvairius metodus ir tinkamai aprašyti kraštines sąlygas. Modeliuojant fazės virsmą kinta medžiagos savybės priklausomai nuo jos būvio, todėl šis kitimas turi būti įvertintas. Taip pat svarbu modeliavimo rezultatus palyginti su eksperimentiniais duomenimis, taip formuojant atitinkamų parametrų kitimo priklausomybes, kurios gali būti taikomos tolesniuose tyrimuose.

Hu, Li, Shu ir Niu (2017) taikė Boltzmano gardelės metodą modeliuodami fazinio virsmo (lydymosi) procesą uždaroje ertmėje. Nagrinėdami izoterminį lydymosi procesą jie nustatė, kad priklausomai nuo Furjė kriterijaus (Fo) dydžio šiluma procese perduodama labiau laidumo būdu ($Fo < 4$) arba šilumos konvekcijos būdu ($Fo > 10$). Be to, vykstant intensyvesniems konvekciniams šilumos mainams, viršutinis FVM sluoksnis greičiau pereina į skystąją fazę. Dallaire ir Gosselin (2016) nagrinėjo du modelius, kuriais įvertinama termomechaninė sąveika tarp FVM ir akumuliacinės talpyklos korpuso: taikant tampriosios sienelės modelį arba naudojant oro tarpą, leidžiantį medžiagai plėstis. Abu modeliai buvo integruoti į baigtinių tūrių judančio tinklelio metodą.

Atsižvelgiant į tai, kad fazinių virsmų procesas vis dar nėra išsamiai ištirtas ir toks šilumos akumuliacijos būdas vis labiau taikomas, šiame darbe siekiama išanalizuoti šilumos mainų procesą šilumos kaupiklio fragmente. Darbo tikslui pasiekti atliekamas modeliavimas taikant COMSOL *Multiphysics* programą, nagrinėjamas temperatūros ir FVM fazės kitimas skirtingose šilumos kaupiklio vietose esant nestacionariam šilumos mainų procesui.

1. FVM šilumos kaupimo sistemų projektiniai sprendiniai ir skaičiavimo metodai

Siekiant panaudoti FVM šilumai kaupti, šios medžiagos turi atitikti keliamus reikalavimus, susijusius su medžiagų termodinaminėmis, kinetinėmis ir cheminėmis savybėmis. Papildomai reikia atsižvelgti į jų ekonominę naudingumą ir prieinamumą. FVM galima suskirstyti į organines (pvz., parafino junginiai), neorganines (pvz., druskos) ir eutektines (mišiniai).

Du pagrindiniai parametrai, pagal kuriuos atliekamas pirminis FVM tinkamumo vertinimas, yra fazinio virsmo temperatūra ir fazinio virsmo šilumos kiekis. Šalia šių fizi-

nių reikalavimų papildomai galima išskirti tokius reikalavimus kaip ilgaamžiškumas, kuo žemesnis medžiagos peraušimo efektas, geras šilumos laidumas, žemas garų slėgis, mažas tūrio kitimas, cheminis stabilumas, FVM suderinamumas su kitomis medžiagomis, pvz., konstrukciniu plienu, plastikumu ir pan., atitiktis saugumo reikalavimams, maža kaina bei perdurbimo galimybė (Mehling ir Cabeza, 2008).

Vykstant fazės virsmui, nekinta FVM temperatūra, todėl, be šilumos kaupimo, FVM gali būti naudojama ir temperatūrai stabilizuoti (Soares, 2015). Viena didžiausių technologinių problemų projektuojant FVM šilumos kaupimo sistemas – tai mažas šių medžiagų šilumos laidumo koeficientas. Pavyzdžiui, daugumos organinių ir neorganinių FVM šilumos laidumo koeficientas yra 0,5 W/mK. Vykstant FVM aušinimo procesui – fazės virsmui iš skystosios į kietąją, ties šilumos mainų paviršiumi formuojasi kietosios fazės sluoksnis ir šilumos mainai šilumos kaupiklyje toliau vyksta per nuolatos augantį kietosios fazės sluoksnį. Todėl esant aušinimo, t. y. šilumos kaupiklio iškrovimo, procesui, vyrauja šilumos perdavimas laidumu (Laing, Bauer, Steinmann ir Lehmann, 2009).

Kitas svarbus veiksnys projektuojant FVM šilumos kaupimo sistemas – medžiagos tankis. Kintant medžiagos fazei, kinta ir tankis, atitinkamai ir šilumos perdavimas, medžiagos savitoji šiluma bei medžiagos užimamas tūris. Vykstant analitinius ar skaitinius tyrimus, sudėtinga išsamiai įvertinti medžiagos tankio kitimą. Klasikiniai uždavinių sprendimo metodai, tokie kaip Stefano uždavinys, sukurti taikant prielaidą, kad medžiagos tankis nekinta ir yra pastovus. Tačiau dėl šios prielaidos susidaro papildomų paklaidų (Dallaire ir Gosselin, 2016).

Analizuojant tokio tipo sistemas, būtina atsižvelgti į šilumos kaupiklio geometriją, norint užtikrinti optimalų FVM ir konstrukcinių medžiagų santykį. Tai turi tiesioginę įtaką šilumos mainų procesui šilumos kaupiklyje ir sukauptam šilumos kiekiui. Siekiant užtikrinti sistemos ilgaamžiškumą, FVM kiekis ir šilumokaičio geometrija turi būti optimizuoti (Agyenim et al., 2010).

Šilumos mainų gerinimo būdai gali būti tokie: FVM įkapsuliacija į nedideles šilumai laidžias kapsules (makro ir mikroįkapsuliacija), didelio šilumos laidumo medžiagų maišymas su FVM, FVM grafito kompozitų naudojimas, didelį šilumos laidumą turinčių medžiagų sluoksnių (pvz., vario plokštelių, porėto grafito struktūros) integravimas į šilumos kaupimo įrenginį, FVM mechaninis maišymas procese bei kelių skirtingų lydymosi temperatūrų FVM naudojimas viename šilumos kaupiklyje (sistemoje) (Al-Abidi, Mat, Sopian, Sulaiman ir Mohammad, 2013; Medrano et al., 2009; Buschle, Steinmann ir Tamme, 2006).

Pastaraisiais metais išaugus poreikiui skaičiuoti FVM pagrindu veikiančias šilumos kaupimo sistemas, vis aktyviau vystomi skaitmeniniai skaičiavimo bei modeliavimo metodai. Be tradicinių modeliavimo metodų, tokių kaip baigtinių tūrių metodas, baigtinių skirtumų metodas ir baigtinių elementų metodas, pastaruoju metu aktyviai taikoma Boltzmano gardelės metodas (BGM) (angl. *lattice Boltzmann method*) pagrįsta kinetinė teorija, skirta fazės virsmo užda-

viniams spręsti (Hu et al., 2017). Dažniausiai taikomi FVM modeliavimo metodai skirstomi į keturias grupes (Y. Zhao, C. Y. Zhao ir Xu, 2017): sluoksnio (ribos) sekimo metodas (angl. *front tracking method*), lygio nustatymo metodas (angl. *level set method*), entalpijos metodas (angl. *enthalpy method*) ir fazės lauko metodas (angl. *phase field method*).

2. Tyrimo objektas ir darbo metodika

Tyrime nagrinėjamas FVM pagrindu veikiančio šilumos kaupiklio fragmentas. Šilumos kaupiklio šilumokaičio medžiaga – varis. Šilumai kaupti pasirinkta organinė fazinio virsmo medžiaga – parafinas RT82 (gamintojas „Rubitherm Technologies GmbH“).

Šiame darbe fazinio virsmo medžiagose vykstančių šilumos mainų procesui modeliuoti naudojama COMSOL *Multiphysics* programinė įranga, turinti integruotą fazės virsmo skaičiavimo modulį. Lygtys šioje programoje sprendžiamos taikant baigtinių elementų metodą. Plačiau šios programos taikymą medžiagos fazės virsmui modeliuoti nagrinėjo Samara, Groulx ir Biwole (2012), Petrone ir Cammarate (2012), Liu ir Groulx (2011), Groulx ir Ogoh (2009), Foong ir kiti (2010).

Modeliuojamas nestacionarus šilumos mainų procesas (visa proceso trukmė 1000 s), kurio metu šilumnešis (vanduo), tekantis variniais vamzdeliais (1 paveikslas, a), perduoda šilumą į FVM, kuriomis užpildytas tūris (1 paveikslas, c). Siekiant padidinti šilumos mainų paviršiaus plotą, papildomai integruotos šilumai laidžios varinės plokštelės (angl. *fins*) (1 paveikslas, b). Variniai vamzdeliai ir plokštelės sudaro šilumokaitį. Siekiant supaprastinti šilumos perdavimo proceso modeliavimą laikoma, kad šilumnešis įkaitina varinį šilumokaitį iki tam tikros nekintančios temperatūros ir šilumos mainai vyksta tarp varinio šilumokaičio (1 paveikslas, d – šilumokaičio sluoksniai) ir FVM (1 pav., e – FVM sritis).

Aprašant šilumos mainų procesą FVM pagrindu veikiančiame šilumos kaupiklio fragmente atliekami to-

kie pagrindiniai etapai: šilumos perdavimo kietuosiuose kūnuose, pradinųjų sąlygų, šilumos mainų su aplinka, pradinės temperatūros ir šilumos perdavimo vykstant fazės virsmui aprašymas.

Šilumos perdavimo procesas kietajame kūne aprašomas tokia lygtimi:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q + Q_{ted}, \quad (1)$$

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

Šilumos srauto tankis dėl šilumos laidumo nustatomas pagal formulę:

$$\mathbf{q} = -\lambda \nabla T, \quad (2)$$

čia λ – medžiagos šilumos laidumo koeficientas. Vykstant šilumos mainams su aplinka – $\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = 0$, čia \mathbf{n} yra vienetinis vektorius.

Pradiniu laiko momentu $T = T_0$. Vykstant medžiagos fazės virsmui šilumos perdavimo procesas aprašomas tokia lygtimi:

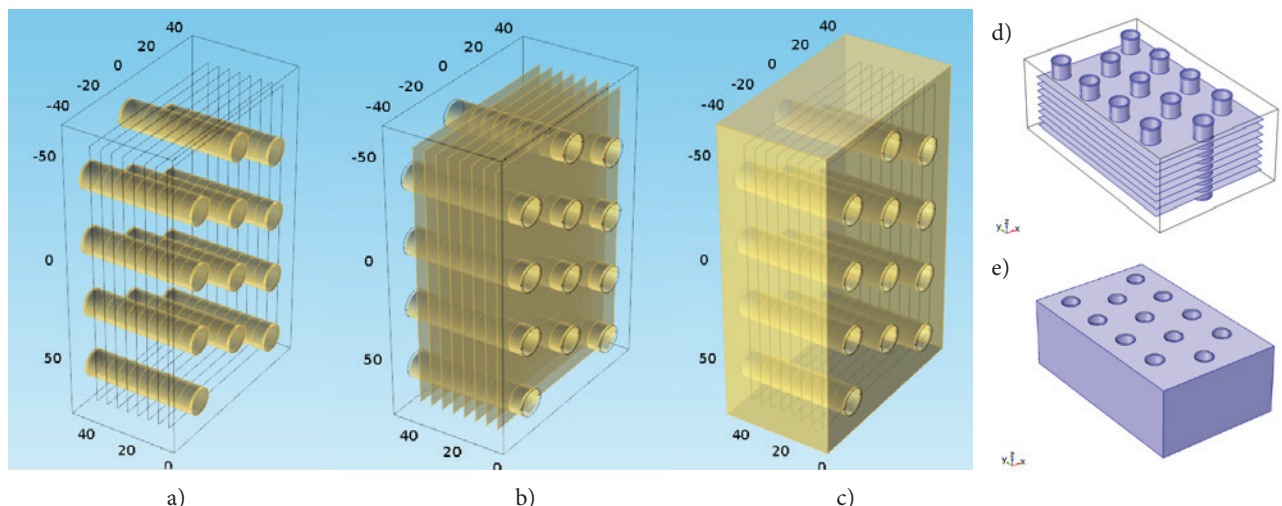
$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q + Q_p + Q_{vd}, \quad (3)$$

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

FVM savybės – tankis, savitoji šiluma ir šilumos laidumo koeficientas – įvertinamos tokiomis lygtimis:

$$\rho = \theta \rho_{phase1} + (1 - \theta) \rho_{phase2}, \quad (4)$$

$$c_p = \frac{1}{\rho} \left(\theta \rho_{phase1} c_{p,phase1} + (1 - \theta) \rho_{phase2} c_{p,phase2} \right) + L \frac{\partial \alpha_m}{\partial T}, \quad (5)$$



1 paveikslas. Modeliuojamas FVM šilumos kaupiklis
Figure 1. Simulated PCM based thermal energy storage

$$\lambda = \theta \lambda_{phase1} + (1 - \theta) \lambda_{phase2}, \quad (6)$$

čia θ – FVM tūrio dalis pirmoje fazėje; L – fazinio virsmo šiluma; α_m – koeficientas, apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\alpha_m = \frac{1 - \theta}{2} \frac{\rho_{phase2} - \theta \rho_{phase1}}{\theta \rho_{phase1} + (1 - \theta) \rho_{phase2}}. \quad (7)$$

Modeliuojant fazinio virsmo medžiagas, jų savybės turi būti aprašomos esant skirtingai jų agregatinei būsenai. Pagrindiniai tyrimo objekto parametrai – fizikinės savybės, naudojamos sudarant skaičiuojamąjį modelį, pateiktos 1 lentelėje. 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 šilumos kaupiklio fragmento analizei pavaizduotas 2 paveiksle, a. Taip pat šiame paveiksle pateikti du taškai išsamesnei FVM analizei: T1 taškas – tarp šilumokaičio plokštelių (2 paveikslas, b) ir T2 – viršutiniame FVM sluoksnyje (2 paveikslas, c), nes FVM temperatūra skirtinga įvairiose šilumos kaupiklio vietose.

3. Rezultatai

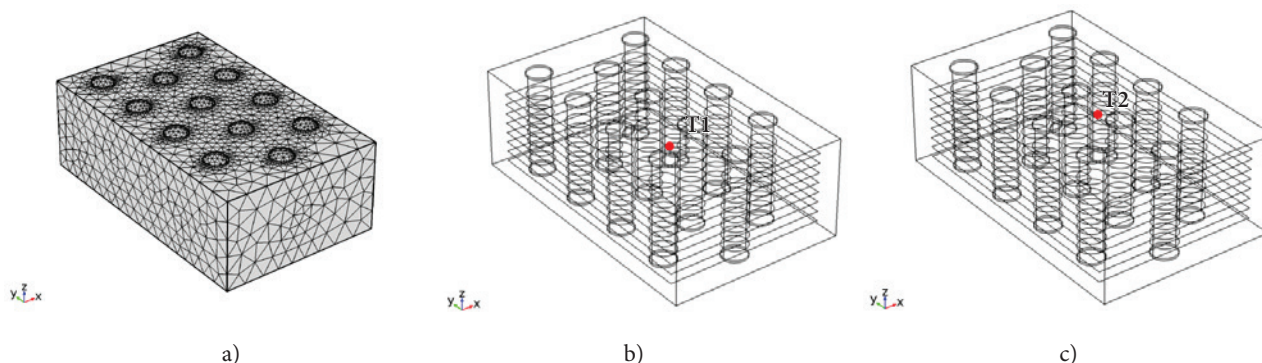
Aprašius nagrinėjamą objektą kartu su jo vienareikšmiškumo sąlygomis, buvo atlikti skaičiavimai COMSOL *Multiphysics* programoje. Gauti rezultatai analizuojami tam tikrais laikotarpiais bei tam tikruose taškuose ar plokštumoje siekiant išsamesnį iširti temperatūros pasiskirstymą ir įvertinti fazės virsmo procesą. Temperatūros pasiskirstymas nagrinėjamas, kai laikotarpis yra 200 s nuo kaitinimo proceso pradžios ir proceso pabaiga 1000 s. Temperatūros pasiskirstymas ir izoterminiai paviršiai šilumos kaupiklyje nagrinėjami laikotarpiais pavaizduoti 3 paveiksle.

Iš paveiklo matyti, kad proceso pradžia pasižymi gerokai mažesne ir netolygesne temperatūra, o proceso pabaigoje (po 1000 s) pastebima gerokai aukštesnė viso kūno temperatūra. Be to, proceso pabaigoje izoterminiai paviršiai matomi tik išoriniuose FVM sluoksniuose. Nagrinėjamojo tūrio centre FVM temperatūra tampa lygi šilumos šaltinio (šilumokaičio) temperatūrai.

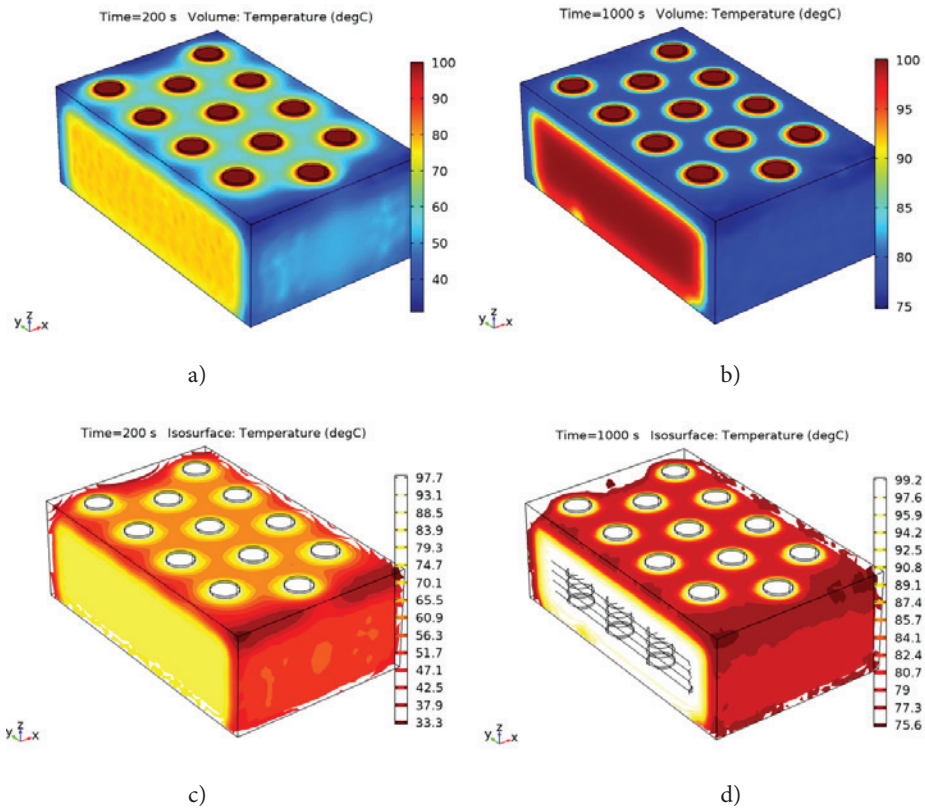
Siekiant atvaizduoti skystosios FVM fazės pasiskirstymą tarp šilumokaičio plokštelių, pasirinkta plokštuma šilumos kaupiklio centre (4 paveikslas, a). Skystosios FVM fazės tūrio dalis nagrinėjamoje plokštumoje po 200 s ir 1000 s atitinkamai pavaizduota 4 paveikslas b ir c dalyse. Iš 4 paveikslas matyti, kad tarp šilumokaičio plokštelių esanti FVM jau proceso pradžioje (po 200 s) yra skystosios fazės. Proceso pabaigoje išsilydžiusios FVM kiekis didėja ir

1 lentelė. Modeliuojant taikomų medžiagų parametrų vertės
Table 1. Thermophysical properties of the materials used in the simulation

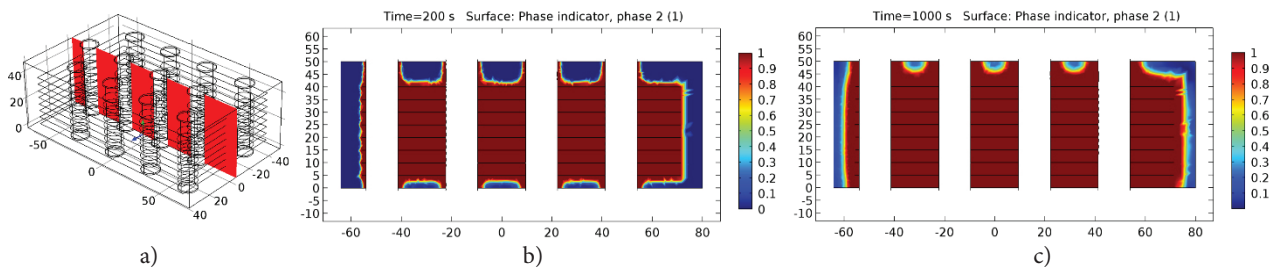
Parametras	Reikšmė	Parametras	Reikšmė
Šilumokaičio temperatūra	373,15 K	FVM šilumos laidumas (kietoji fazė)	0,3 W/(m·K)
FVM tankis (kietoji fazė)	880 kg/m ³	FVM šilumos laidumas (skystoji fazė)	0,17 W/(m·K)
FVM lydymosi temperatūra	353,15 K	FVM savitoji šiluma (kietoji fazė)	1800 J/(kg·K)
FVM tankis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



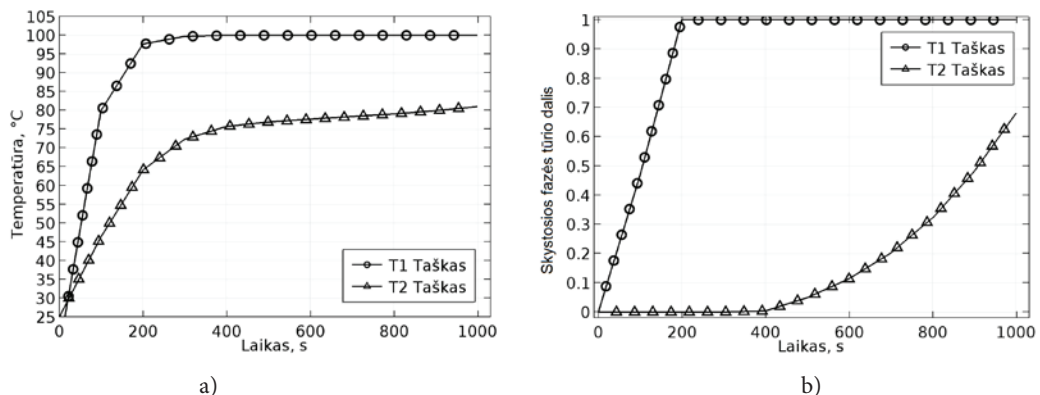
2 paveikslas. Baigtinių elementų tinklas (a) ir analizuojami taškai (b ir c)
Figure 2. Meshing of the geometry studied (a) and cut points for analysis (b and c)



3 paveikslas. Temperatūros pasiskirstymas (po 200 s (a) ir po 1000 s (b) ir izoterminiai paviršiai fazinio virsmo medžiagoje (po 200 s (c) ir po 1000 s (d))
 Figure 3. Temperature distribution (after 200 s (a) and after 1000 s (b)) and isothermal contours in phase change material (after 200 s (c) and after 1000 s (d))



4 paveikslas. Pjūvio vieta šilumos kaupiklyje (a), skystosios FVM fazės tūrio dalis po 200 s (b) ir 1000 s (c)
 Figure 4. Cut plane in thermal energy storage (a), fraction of liquid phase (after 200 s (b) and after 1000 s (c))



5 paveikslas. Temperatūros (a) ir skystosios FVM fazės tūrio dalies (b) kitimas skirtinguose šilumos kaupiklio taškuose
 Figure 5. Temperature profile (a) and fraction of liquid phase (b) in different points of thermal energy storage

tik nuo šilumokaičio toliau esančiuose išoriniuose FVM sluoksniuose yra kietoji fazė.

Temperatūros ir skystosios FVM fazės tūrio dalies kitimas vykstant nagrinėjama šilumos mainų procesui tarp šilumokaičio plokštelių T1 (2 paveikslas, b) ir viršutiniame FVM sluoksnyje T2 (2 paveikslas, c) pateiktas 5 paveiksle. Iš grafiko matyti, kad T1 taške temperatūra kyla greičiau lyginant su T2 tašku. Taip yra todėl, kad tarp šilumokaičio plokštelių šilumos mainų procesas vyksta žymiai greičiau ir po 100 s FVM temperatūra pasiekia lydimosi temperatūrą. Po 300 s FVM temperatūra tampa lygi šilumos šaltinio temperatūrai. T2 taškas yra viršutiniame FVM sluoksnyje, nutolusiame nuo šilumokaičio, todėl temperatūra kinta žymiai lėčiau. Tik proceso pabaigoje (po 1000 s) FVM temperatūra pasiekia lydimosi temperatūrą, todėl galima daryti išvadą, kad išoriniuose (paviršiniuose) FVM sluoksniuose fazės virsmas visiškai neįvyksta.

Iš 5 paveikslų (b) dalies matyti, kad T1 taške medžiagos fazės virsmas visiškai įvyksta po 200 s. Vykstant fazės virsmui sukaupiamas energijos kiekis nustatomas pagal (5) lygtį. T2 taške, nutolusiame nuo šilumokaičio paviršiaus, fazės virsmas visiškai neįvyksta ir proceso pabaigoje skystosios FVM fazės tūrio dalis yra 0,7. Tai reiškia, kad sukaupiami apie 70 % fazinio virsmo šilumos, nors FVM temperatūra proceso pabaigoje buvo lygi medžiagos lydimosi temperatūrai (matyti iš 5 paveikslų, a).

Išvados

Fazinio virsmo medžiagų panaudojimas šilumai kaupti – tai perspektyvus būdas didinti šilumos kaupimo tankį ir efektyviai išnaudoti perteklinę bei atliekinę įvairių energijos šaltinių generuojamą energiją. Dauguma FVM pasižymi savybe blogai praleisti šilumą, o tai yra viena didžiausių neigiamų savybių projektuojant šilumos kaupiklius.

Atlikus FVM pagrindu veikiančio šilumos kaupiklio modeliavimą, nustatyta, kad žemas FVM šilumos laidumo koeficientas turi didelę įtaką šilumos mainų intensyvumui. Analizuojant temperatūros pasiskirstymą skirtinguose taškuose matyti, kad nuo šilumos mainų paviršiaus nutolusiame taške FVM temperatūra pasiekia lydimosi temperatūrą tik proceso pabaigoje, t. y. 900 s ilgiau, lyginant su tašku, esančiu arčiau šilumos šaltinio (viso proceso trukmė 1000 s). Be to, per nagrinėjamąjį laikotarpį (1000 s) FVM išoriniuose sluoksniuose fazės virsmas neįvyksta, tačiau temperatūra yra artima lydimosi temperatūrai.

Siekiant, kad medžiagos fazės virsmas įvyktų visame šilumos kaupiklio tūryje per nagrinėjamą laikotarpį siūlomi tokie galimi sprendiniai: šilumos mainų paviršiaus ploto didinimas arba papildomų šilumai laidžių medžiagų integravimas į FVM. Tokiu atveju turi būti sprendžiamas optimizavimo uždavinys, keičiant kraštines šilumos mainų proceso sąlygas.

Literatūra

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>
- 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>
- Buschle, J., Steinmann, W. D., & Tamme, R. (2006). Latent heat storage for process heat applications. In *Proceedings of The 10th International Conference on Thermal Energy Storage ECOSTOCK* (pp. 1-8). Atlantic City.
- Chiew, J., Chin, C. S., Ji, A. 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>
- 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>
- European Commission (EC). (2016). *An EU Strategy on Heating and Cooling*. COM(2016) 51. Brussels, 13 p.
- Foong, C. W., Hustain, J. E., Lovseth, J., & Nydal, O. J. (2010). Numerical study of a high temperature latent heat storage (200–300°C) using Eutectic Nitrate Salt of Sodium Nitrate and Potassium Nitrate. In *Proceedings of COMSOL Conference 2010* (pp. 1-8). Paris, France.
- 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>
- Groulx, D., & Ogoh, W. (2009). Solid-liquid phase change simulation applied to a cylindrical latent heat energy storage system. In *Proceedings of the 2009 COMSOL Conference* (pp. 1-7). Boston, USA.
- 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>
- Laing, D., Bauer, T., Steinmann, W. D., & Lehmann, D. (2009, June). Advanced high temperature latent heat storage system – design and test results. In *Proceedings of the 11th International Conference on Thermal Energy Storage* (pp. 1-8). Stockholm, Sweden.
- Liu, C., & Groulx, D. (2011). Numerical study of the effect of fins on the natural convection driven melting of phase change material. In *Proceeding of the 2011 COMSOL Conference* (pp. 1-7). Boston, USA.
- 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*. Berlin: Springer.
- Petrone, G., & Cammarata, G. (2012). Simulation of PCM melting process in a differentially heated enclosure. In *Proceedings of the 2012 COMSOL Conference*. Milan, Italy.
- Samara, F., Groulx, D., & Biwole, P. H. (2012). Natural convection driven melting of phase change material: comparison of two methods. In *Proceedings of the 2011 COMSOL Conference* (pp. 1-7). Boston, USA.

- Soares, N. (2015). *Thermal energy storage with phase change materials for the improvement of the energy performance of buildings* (PhD thesis). Universidade de Coimbra, Portugal.
- Zhao, Y., Zhao, C. Y., & Xu, Z. G. (2017). Numerical study of solid-liquid phase change by phase field method. *Computers and Fluids*, 164(2018), 94-101.
<https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2017.05.032>

SIMULATION OF THE PHASE CHANGE MATERIALS' CHARACTERISTICS IN A THERMAL ENERGY STORAGE

S. Pakalka, K. Valančius, G. Streckienė, V. Ulbikaitė

Abstract

In order to use efficiently residual, waste or renewable energy, the application of phase change materials (PCM) grows in building energy systems. At the same time, this poses new technological

challenges in choosing specific materials, system design solutions, because it requires a specific knowledge of the heat transfer process during the phase change. The aim of the work is to investigate the heat transfer in a PCM based thermal energy storage unit using the COMSOL Multiphysics software. In the analysis, the properties of the material were evaluated during the phase change. This allowed to determine that the thermal conductivity of the material is of great importance for the intensification of heat transfer. In addition, the analysis of several points in the analyzed object revealed that the phase change does not occur in the surface layer of the PCM during the period under consideration. In order to avoid that, additional solutions such as integrating heat-conductive materials into the PCM or increasing the surface area of the heat transfer could be used.

Keywords: thermal energy storage, phase change material (PCM), latent heat, heat transfer, numerical simulation, COMSOL multiphysics.