



AKUMULIACINĖS KARŠTO VANDENS TALPOS VEIKIMO REŽIMŲ VERTINIMAS

Tomas Kropas¹, Giedrė Streckienė²

¹magistrantas, ²docentas

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

el. p. ¹tomas.kropas@stud.vgtu.lt; ²giedre.streckiene@vgtu.lt

Anotacija. Vis dažniau naudojant atsinaujinančius energijos šaltinius iškyla šilumos akumuliacijos technologijų svarba. Tačiau, paprastai tokių šaltinių generuojama energija laiko atžvilgiu nesutampa su sistemos ar vartotojo poreikiu – energija gaminama, kai nėra jos naudojimo ir atvirkščiai. Tai skatina tobulinti ir tirti įvairias energijos akumuliacijos technologijas, kurios padeda išspręsti šią problemą ir gali išlyginti energijos gamybos svyravimus paros, ar kito laikotarpio, bėgyje. Kartu iškyla šiose akumuliacijos technologijose vykstančių procesų efektyvumo vertinimo aktualumas bei poreikis. Šiame darbe nagrinėjami vandeninės akumuliacinės talpos veikimo režimai, atliekamas jų vertinimas. Išskirti trys pagrindiniai procesai: įkrovimas, laikymas ir iškrovimas. Atlikti atskiri realūs eksperimentai kiekvienam iš režimų, nustatyti jų efektyvumo koeficientai. Siekiant išnagrinėti šiluminės stratifikacijos pobūdį bei temperatūros pasiskirstymą talpoje išsamiau, iš eksperimentinių duomenų apskaičiuojami stratifikaciją apibūdinantys kriterijai. Atlikta skaitinė ir grafinė gautų rezultatų interpretacija. Gauti rezultatai palyginti su termovizinėmis nuotraukomis.

Reikšminiai žodžiai: akumuliacinė talpa, stratifikacija, efektyvumas, veikimo režimas, termovizija.

Įvadas

Sparčiai augant įvairių formų energijos poreikiui iškilo didelė problema, kuri yra susijusi su šių procesų metu į aplinką išsiskiriančiu teršalų kiekiu. Siekiant mažinti į atmosferą išmetamos taršos kiekį, vis didesnis dėmesys kreipiamas į atsinaujinančius energijos šaltinius, kurie neturi didelių CO₂ bei kitų teršalų emisijų ir nesukelia vadinamojo „šiltnamio“ efekto. Vienas didžiausių iššūkių, naudojant atsinaujinančius energijos šaltinius, ypač saulės ir vėjo, yra tas, kad jie labai nepastovūs (dažnai energija yra generuojama tada, kai nėra jos vartojimo ir atvirkščiai) ir negali būti naudojami kaip pastovus energijos šaltinis. Ši problema gali būti ir yra sprendžiama naudojant energijos akumulatorius.

Akumuliacinių sistemų veikimo principas yra pagrįstas energijos kaupimu, kai jos poreikis nesutampa su jos generavimu. Pavyzdžiui, saulės šildymo sistemose, kai energija gaunama iš šaltinio, bet nėra vartotojo poreikio arba šis poreikis yra mažas, perteklinė energija gali būti kaupiama akumuliacinėse talpose, ir panaudojama tada, kai poreikis yra, tačiau energijos išteklių jos negeneruoja (Rosen *et al.* 2004; Dincer *et al.* 2013; Aneke *et al.* 2016). Toks įrenginių derinys padeda užtikrinti

sistemos veikimo patikimumą, stabilumą ir žinoma padidina jos efektyvumą. Šiluminės energijos akumuliacinės talpos taip pat padeda išlyginti šiluminės energijos poreikio svyravimus skirtingais dienos laikotarpiais (Alva *et al.* 2017).

Įvairių formų energija gali būti kaupiama skirtingais būdais. Viena iš labiausiai paplitusių ir naudojamų energijos formų yra šiluma.

Yra išskiriami du pagrindiniai šilumos kaupimo būdai. Ji gali būti saugojama kaip savitoji arba slaptoji (latentinė) šiluma (Gil *et al.* 2010). Energijos kaupimas, naudojant slaptąją (latentinę) šilumą, yra pagrįstas medžiagų fazių virsmu, kai esant pastoviai temperatūrai skysčiui virstant garais arba kietam kūnui – skysčiu ir atvirkščiai yra sugeriamas arba išsiskiriamas tam tikras šiluminės energijos kiekis. Energijos kaupimas, naudojant savitąją šilumą nėra pagrįstas fazių virsmų reiškiniais. Čia vykstant šilumos absorbcijos procesui, pakyla akumuliacinėje talpoje naudojamos medžiagos temperatūra (Alva *et al.* 2018). Būtent šio tipo šilumos akumulatoriai dažniausiai yra naudojami įvairių tipų pastatuose šildymo, karšto vandens ruošimo sistemose.

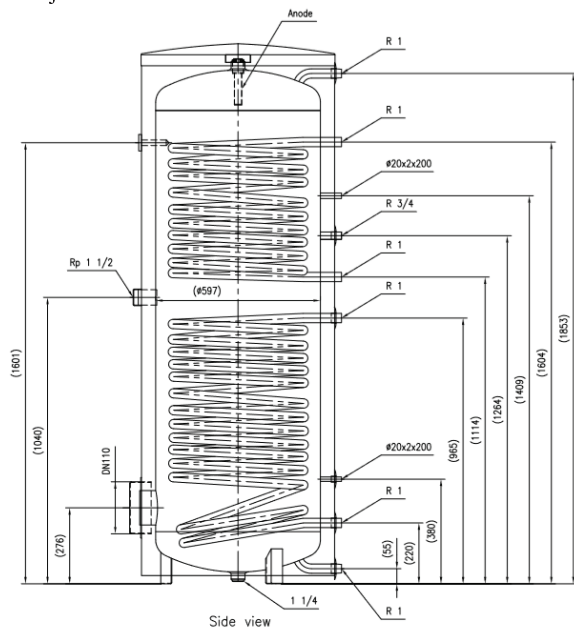
Šio darbo tikslas – išnagrinėti vandeninės vertikalios akumuliacinės talpos veikimo režimus eksperimentiniu

būdu ir nusakyti vykstančių procesų efektyvumą. Darbo rezultatai toliau gali būti panaudojami skaitinių ar imitacinių modelių patikrai, kai šiais modeliais nagrinėjamos saulės šildymo sistemos su akumuliacinėmis talpomis. Taip pat tai prisideda prie tokių akumuliacinio įrenginių pritaikymo analizės tikslesnio ribų nustatymo.

Objektas ir jo tyrimų metodika

Tyrimo objektas yra vertikali akumuliacinė talpa Reflex SF 500/2, esanti Vilniaus Gedimino technikos universiteto (VGTU) Pastato energetinių ir mikroklimato sistemų (PEMS) laboratorijoje. Šios talpos techninis brėžinys pateiktas (1 pav.).

Talpos aukštis yra 1961 mm, tūris – 470 l. Maksimali darbinė talpos temperatūra 95 °C šilumokaičio maksimali temperatūra 110 °C. Maksimalus darbinis slėgis 10 barų. Talpa yra izoliuota 50 mm poliuretano putų izoliacija.



1 pav. Akumuliacinės talpos techninis brėžinys

Ši akumuliacinė talpa yra skirta karšto vandens, pastato inžinerinėms sistemoms, ruošimui. Ji yra pastatoma ant žemės. Viduje turi 2 įleistus šilumokaičius talpos įkrovimui ir iškrovimui. Taip pat yra galimybė naudoti ir tūrinį įkrovimą ar/ir iškrovimą. Talpos apačioje yra numatytas šildymas elektriniu tenu.

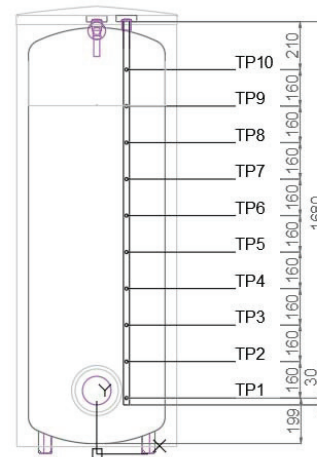
Yra išskiriami trys pagrindiniai akumuliacinės talpos veikimo režimai:

- Įkrovimas;
- Laikymas;
- Iškrovimas.

Daug autorių nagrinėja akumuliacinių talpų veikimą ir efektyvumą būtent šiais atskirais etapais arba keliais iš jų (Jack *et al.* 2009; Streckienė 2011; Nash *et al.* 2017). Šiame straipsnyje visi šie režimai bus nagrinėjami atskirai siekiant nustatyti kiekvieno jų efektyvumą bei ypatybes.

Norint nustatyti temperatūros pasiskirstymą talpoje naudojamas matavimo prietaisas su 10 K tipo NiCr-Ni termoporų, išsidėsčiusių išilgai plastikinio PP-R 16×2,7 mm strypo kas 16 cm. Tai leidžia stebėti, kaip temperatūra pasiskirsto visame talpos tūryje bet kuriuo eksperimento laiko momentu.

Matavimo prietaisas yra įleistas į tiriamąjį objektą – akumuliacinę talpa, per jos viršutinėje dalyje esančią angą. Bendras akumuliacinės talpos su matavimo prietaisu brėžinys pateikiamas (2 pav.).



2 pav. Akumuliacinės talpos su įleistu temperatūros matavimo prietaisu brėžinys

Temperatūros fiksavimui skirtingose akumuliacinės talpos vietose 10 termoporų yra prijungiami prie AHLBORN duomenų fiksavimo, valdymo ir įrašymo įrenginio ALMEMO 5990-2.

Norint vizualiai stebėti, kaip temperatūros pasiskirsto talpoje, naudojamas termovizorius. Eksperimentų metu jis yra pastatomas 4 metrų atstumu nuo talpos. Šiam tikslui akumuliacinės talpos sienelės izoliacinėje medžiagoje yra išpjaujama siaura juosta, šioje vietoje tiriamojo objekto korpusas yra nudažomas juodos spalvos matiniais dažais, kad įkautusio paviršiaus spinduliuojami infraraudonieji spinduliai termovizoriumi būtų fiksuojami kuo tiksliau.

Akumuliacinės talpos vertinimui skaičiuojamas temperatūrinis efektyvumas, o stratifikacijai įvertinti – stratifikacijos skaičius (Str).

Statinio režimo metu Str skaičius apskaičiuojamas kaip santykis tarp temperatūros gradientų vidurkio bet kuriuo laiko momentu su temperatūros gradientų vidurkiu statinio režimo pradžioje (Bouhal *et al.* 2017; Streckienė 2011).

$$Str = \frac{\overline{(\partial T / \partial z)_t}}{(\partial T / \partial z)_{t=0}}. \quad (1)$$

Temperatūrų gradientų vidurkis bet kuriuo laiko momentu išreiškiamas:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_t = \frac{1}{J-1} \cdot \left[\sum_{j=1}^{J-1} \frac{T_{j+1} - T_j}{\Delta z} \right], \quad (2)$$

čia: Δz – atstumas tarp temperatūros daviklių arba sluoksnių, m; T – temperatūra, K; z – talpos aukštis, m; t – laikas, s; J – vandens sluoksnių skaičius; j – vandens sluoksnis.

Dinaminio režimo metu Str skaičius apibrėžiamas kaip santykis vidutinio temperatūros gradiento su įkrovimo ar iškrovimo proceso maksimaliu vidutiniu temperatūros gradientu. Vidutinis maksimalus temperatūros gradientas apskaičiuojamas, tariant, kad maksimalus temperatūros skirtumas vyksta tik viename iš sluoksnių, o visuose kituose sluoksniuose temperatūros gradientas lygus nuliui. Didžiausia temperatūra (T_{\max}) – tai aukščiausia vandens temperatūra proceso pradžioje, o minimali temperatūra (T_{\min}) yra įtekančio vandens srauto, jei vyksta talpos iškrovimas. Didžiausias vidutinis temperatūros gradientas įkrovimo/iškrovimo metu išreiškiamas (Han *et al.* 2009; Streckienė 2011):

$$\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{\max} = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{(J-1) \cdot \Delta z}. \quad (3)$$

Temperatūrinio efektyvumo vertinamas kaip santykis tarp šaltinio atiduoto energijos kiekio ir sistemos gauto energijos kiekio.

Rezultatai ir jų aptarimas

Nagrinėjama akumuliacinė talpa yra išbandoma atskirais įkrovimo, laikymo ir iškrovimo etapais. Nustatomas stratifikacijos skaičius ir efektyvumo koeficientas atskiriems veikimo režimams.

Įkrovimo proceso metu akumuliacinė talpa yra šildoma elektriniu tenu, įtaisytu jos apačioje. Norint apskaičiuoti įkrovimo proceso efektyvumą, reikia žinoti, kiek elektros energijos buvo perduota į akumuliacinę talpą, priimant prielaidą, kad visa suteikta elektros energija pavirto šiluma. Elektrinio teno perduodamas energijos kiekis nustatomas pagal formulę:

$$Q_{el} = P \cdot t = U \cdot I \cdot t, \quad (4)$$

čia: I – elektros srovės stipris, A; U – elektros srovės įtampa, V; P – elektros galia, W; t – laikas, h; Q_{el} – kaitinimo elemento suteiktas energijos kiekis, kWh.

Kadangi elektra į kaitinimo elementą yra tiekiamas trimis fazėmis, atskirai matuoti kiekvienos fazės parametrai: srovės stipris ir įtampa. Talpos įkrovimas vyko 2,5 valandos. Bendras perduotas energijos kiekis skaičiuojamas kaip atskirų fazių suteikto energijos kiekio suma:

$$Q_{el} = (P_1 + P_2 + P_3) \cdot t; \quad (5)$$

$$Q_{el} = (3540,14 + 3590,82 + 3513,35) \cdot 2,5 = 26,61 \text{ kWh}.$$

Viso buvo perduota 26,61 kWh energijos, kai akumuliacinės talpos vidutinė temperatūra įkrovimo proceso metu pakilo nuo 23,5 °C iki 74,8 °C. Energijos kiekis, kurį gavo šilumos talpa skaičiuojama pagal formulę:

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T, \quad (6)$$

čia: m – medžiagos masė, kg; C_p – savitoji šiluma, kJ/(kg·K); ΔT – temperatūros pokytis vykstant procesui talpoje; °C.

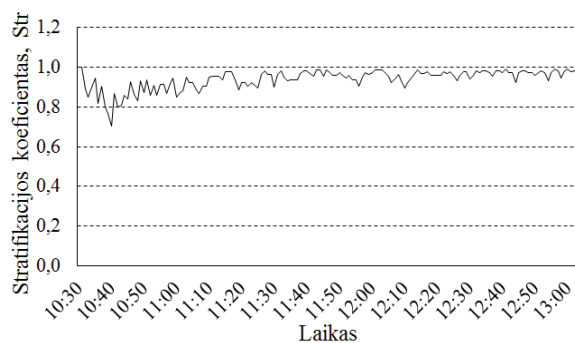
$$Q_{talpos} = \frac{438,95 \cdot 4,2 \cdot (74,83 - 23,52)}{3600} = 26,276 \text{ kWh}.$$

Tada nustatomas įkrovimo proceso efektyvumas:

$$\eta_{\text{įkrovimo}} = \frac{Q_{talpos}}{Q_{el}}. \quad (7)$$

Apskaičiuotas įkrovimo proceso efektyvumas buvo 98,75 %.

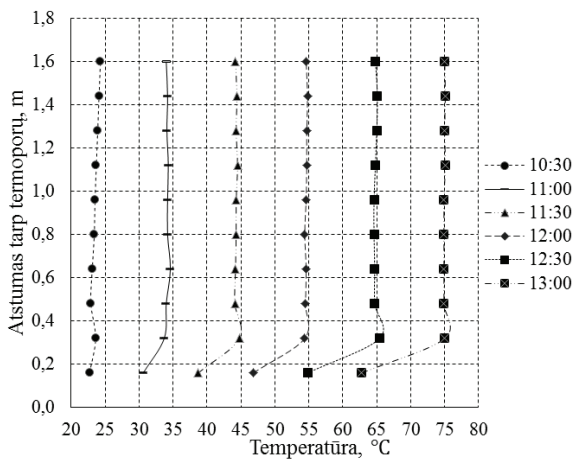
Kitas naudojamas kriterijus, vertinantis įkrovimo procesą yra stratifikacijos skaičius. Idealiu atveju, kai temperatūrų pasiskirstymas talpoje yra tolygus, stratifikacijos skaičius lygus 1, jei talpoje temperatūrinis režimas yra nenusistovėjęs, fluidas susimaišęs ir stratifikacijos visai nėra Str skaičius bus lygus 0. Iš bandymo metu gautų duomenų šis koeficientas apskaičiuotas kiekvienam laiko žingsniui. Stratifikacijos skaičiaus kitimas laiko atžvilgiu pateikiamas 3 paveiksle.



3 pav. Str skaičiaus priklausomybė nuo laiko įkrovimo proceso metu

Kaip matome iš grafiko, stratifikacijos skaičius įkrovimo metu svyruoja nuo 0,7 iki 1,0. Pačioje proceso pradžioje, kai kaitinimas tik prasideda $Str = 1$, tai reiškia, kad akumuliacinė talpa yra pilnai susistratifikavusi, temperatūrinis režimas joje yra nusistovėjęs. Vėliau, vykstant talpos įkrovimo procesui, temperatūrinis režimas talpoje yra sutrikdomas, fluidas dėl natūralių plūdrumo jėgų poveikio ir konvekcijos reiškinio maišosi, stratifikacijos skaičius sumažėja ir nebesiekia maksimalios reikšmės. Vidutinis įkrovimo metu esantis stratifikacijos skaičius yra $Str = 0,94$.

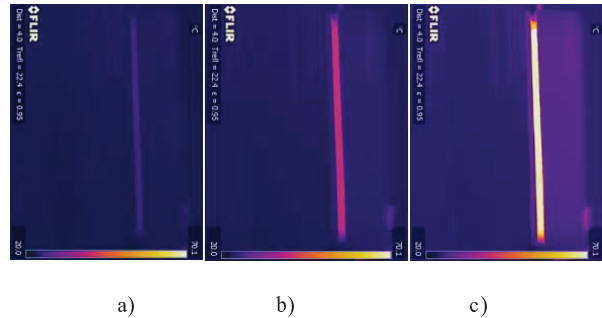
Bandyto metu, vienos minutės intervalu fiksuotos temperatūros skirtingose talpos vietose. Kaitinant akumuliacinę talpą, laikui bėgant temperatūros atskirose sluoksniuose kyla nevienodai. Temperatūrų pasiskirstymas talpoje įkrovimo metu priklausomai nuo laiko pavaizduotas (4 pav.).



4 pav. Temperatūros pasiskirstymas talpoje įkrovimo metu

Kaip matome iš pateikto grafiko, temperatūros vykstant talpos įkrovimo procesui palaipsniui auga. Temperatūrų augimas yra tendencingas ir pastovus. Išsiskiria tik žemiausiai esančios termoporos parodymai. Būtent šios TP1 termoporos užfiksuotos temperatūros yra mažiausios ir temperatūros augimas šiame taške yra mažesnis. Tai sąlygoja jos padėtis talpoje. TP1 termopora yra išsidėsčiusi žemiau kaitinimo elemento, o šildamas vanduo dėl natūralių plūdrumo jėgų kyla į viršų, todėl šiai akumuliacinės talpos zonai tenka mažiausias šilumos kiekis. Įkrovimo procesas vizualiai stebėtas termovizoriaumi. Nustatyti temperatūrų režiai yra nuo 20 °C iki 70,1 °C. Gauti rezultatai pateikiami (5 pav.).

Gautos termovizinės nuotraukos pagrindžia eksperimento metu gautas išvadas. Matome, kad temperatūra palaipsniui kyla visame akumuliacinės talpos tūryje. Talpos apačioje galime įžiūrėti šiek tiek šaltesnę sritį.



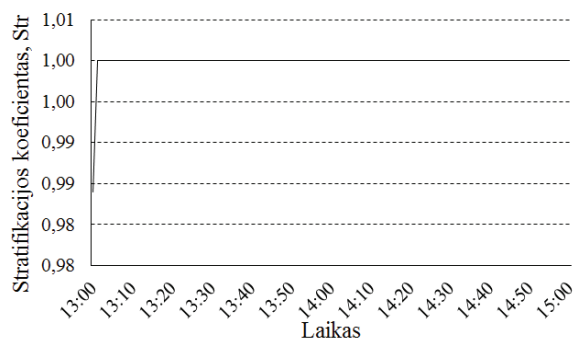
5 pav. Vizualaus vertinimo fragmentai, įkrovimo procesas, a) proceso pradžioje ($t = 0$ val.), b) proceso viduryje ($t = 1$ val.), c) proceso pabaigoje ($t = 2,5$ val.)

Laikymo proceso metu akumuliacinės talpos efektyvumas priklauso tik nuo jos šiluminių savybių. Prarandamas energijos – šilumos kiekis yra lygus šilumos nuostoliams per sienes. Kuo geresnė šiluminė izoliacija, kuo geriau ji izoliuota, tuo talpos efektyvumas didesnis.

Šilumos nuostoliai skaičiuojami analogiškai įkrovimo metu skaičiuotiems nuostoliams. Gautas prarastos energijos kiekis yra 0,402 kWh. Bandyto metu akumuliacinės talpos vertinimui pasirinkta laikymo proceso trukmė yra 2 valandos. Bendras proceso efektyvumas laikymo režimo metu skaičiuojamas pagal formulę:

$$\eta_{\text{laikymo}} = \frac{Q_{\text{talpos, pradzioje}} - Q_{\text{nuostoliai}}}{Q_{\text{talpos, pradzioje}}} = \frac{26,28 - 0,402}{26,28} = 98,47 \%$$

Kaip ir įkrovimo, taip ir laikymo proceso metu be efektyvumo, pasirinktas dar vienas akumuliacinės talpos vertinimui kriterijus yra stratifikacijos skaičius. Iš bandymo metu gautų duomenų šis šiluminę stratifikaciją tiriamajame kūne apibūdinantis koeficientas, paskaičiuotas kiekvienam laiko žingsniui – kas vieną minutę. Stratifikacijos skaičiaus kitimas laiko atžvilgiu yra pateikiamas (6 pav.).



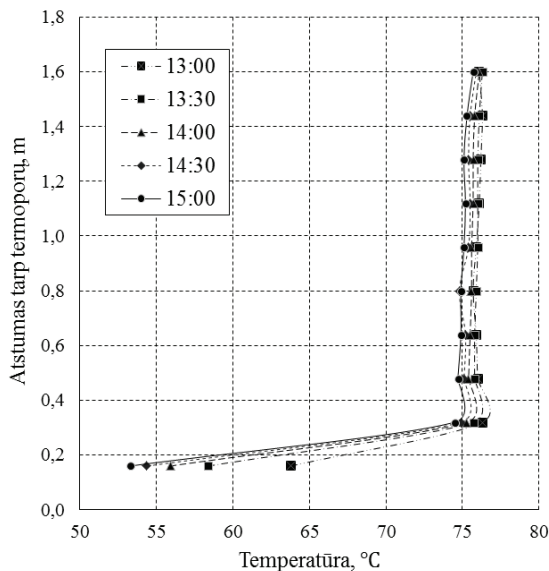
6 pav. Str skaičiaus priklausomybė nuo laiko laikymo proceso metu

Kaip matome iš grafiko, stratifikacijos skaičius proceso metu svyruoja nuo 0,98 iki 1,0. Pačioje proceso pradžioje, kai laikymo procesas tik prasideda $Str = 0,98$, tai reiškia, kad akumuliacinė talpa nėra visiškai pilnai susistratifikavusi, temperatūrinis režimas joje nėra pilnai nusistovėjęs. Vėliau, vykstant talpos laikymo procesui, temperatūrinis režimas talpoje nusistovi, kadangi nėra išorinių trikdžių, kurie ardytų stratifikaciją. Talpoje esantis fluidas pilnai išstratifikuoja ir Str skaičius tampa lygus 1. Vidutinis įkrovimo metu esantis stratifikacijos skaičius yra $Str = 1,00$.

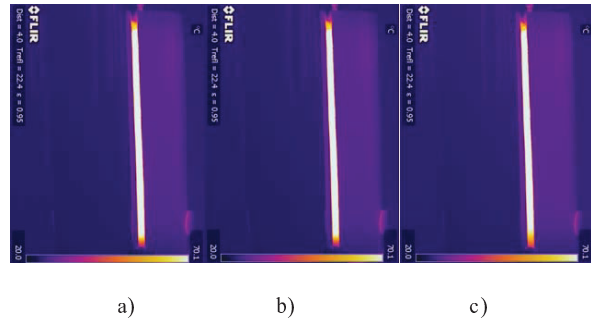
Bandyto metu, kaip ir įkrovimo proceso metu, vienos minutės intervalu fiksuotos temperatūros skirtingose talpos vietose. Temperatūrų pasiskirstymas talpoje laikymo metu, priklausomai nuo laiko pavaizduotas (7 pav.).

Kaip matome iš pateikto grafiko, temperatūros vykstant talpos laikymo procesui palaipsniui krenta. Temperatūrų kritimas yra tendencingas ir pastovus. Išsiskiria tik žemiausiai esančios termoporos parodymai. Būtent šios – TP1 termoporos užfiksuotos temperatūros yra mažiausios ir temperatūros kritimas šiame taške yra didžiausias. Tai sąlygoja jos padėtis talpoje. TP1 termopora yra žemiausiai, o vėsdamas vanduo dėl natūralių plūdrumo jėgų ir tankių skirtumo sėda žemyn, todėl natūralu, kad labiausiai fluidas atvėsta talpos apačioje. Temperatūros kritimą sąlygoja akumuliacinės talpos šilumos nuostoliai per sienelės.

Procesas stebėtas ir termovizoriumi, kelios vizualaus temperatūrų pasiskirstymo stebėjimo nuotraukos 13:00 val., 14:00 val. ir 15:00 val. pateiktos (8 pav.).



7 pav. Temperatūros pasiskirstymas talpoje įkrovimo metu priklausomai nuo termoporų padėties ir laiko



8 pav. Vizualaus vertinimo fragmentai – laikymo procesas, a) proceso pradžioje ($t = 0$ val.), b) proceso viduryje ($t = 1$ val.), c) proceso pabaigoje ($t = 2$ val.)

Gautos nuotraukos atspindi laikymo proceso metu gautus rezultatus. Nustatytos temperatūrų ribos termovizijai yra nuo $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $70,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ Temperatūros talpoje kinta nežymiai, tik apatinėje dalyje ima ryškėti šaltesnio vandens zona.

Akumuliacinės talpos iškrovimo proceso metu proceso efektyvumas priklauso tik nuo jos šiluminių savybių ir šilumos nuėmimo efektyvumo. Iš nagrinėjamos talpos šiluma yra nukraunama tūriu. Karštas vanduo paimamas iš talpos viršutinės dalies ir tiekiamas per šalia esantį vėdinimo įrenginio šilumokaitį, šildant į patalpą tiekiamą oro srautą, ir atvėsus yra grąžinamas atgal į akumuliacinės talpos apatinę dalį.

Bandyto metu yra matuojamos iš talpos paimamo ir grąžinamo vandens temperatūros bei šilumnešio srauto debitas, kuris tiriamuoju laikotarpiu buvo lygus $0,47\text{ kg/s}$. Tada iš akumuliacinės talpos paimtas šilumos kiekis skaičiuojamas pagal formulę (9):

$$\dot{Q}_{iškrauta} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta t, \quad (9)$$

čia: $\dot{Q}_{iškrauta}$ – šilumos srautas, paimtas iš talpos, kW; \dot{m} – masinis debitas, kg/s Δt – temperatūrų skirtumas tarp paimamos iš talpos ($t_{iškrauta}$) ir grąžinamos į talpą ($t_{grąžinama}$) temperatūrų, K; c_p – savitoji šiluma, kJ/(kg·K);

Tada per laiką paimamas šilumos kiekis yra skaičiuojamas kaip suma šilumos srautų kiekvieno laiko tarpu (matuojama kas minutę).

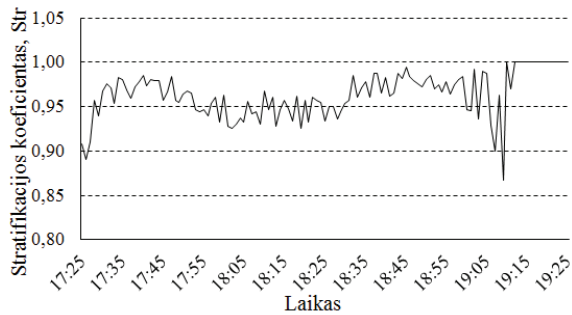
$$Q_{iškrauta} = \sum \frac{\dot{Q}_{iškrauta}}{60}. \quad (10)$$

Visas iš talpos paimtas šilumos kiekis yra lygus $29,39\text{ kWh}$. Nustatomas talpos iškrovimo proceso efektyvumas:

$$\eta_{iškrovimo} = \frac{Q_{iškrauta}}{Q_{talpos, pradzioje}}. \quad (11)$$

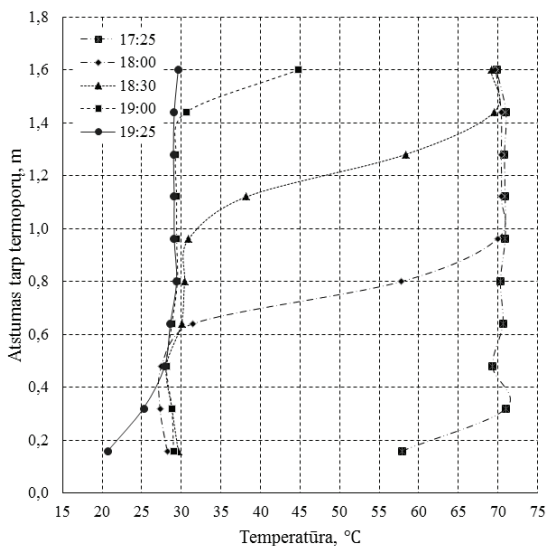
Apskaičiuotas iškrovimo proceso efektyvumas $99,64\%$.

Kaip ir įkrovimo bei laikymo, taip ir iškrovimo proceso metu be efektyvumo, naudojamas ir stratifikacijos skaičius, kurio kitimas pateiktas (9 pav.).



9 pav. Str skaičiaus kitimas, iškrovimo proceso metu

Kaip matome iš grafiko, stratifikacijos skaičius iškrovimo metu svyruoja nuo 0,87 iki 1,0. Pačioje proceso pradžioje, kai iškrovimo procesas tik prasideda, $Str = 0,98$. Tai reiškia, kad akumuliacinė talpa nėra visiškai pilnai susistratifikavusi, stratifikacija, kuri susidarė laikymo proceso metu yra suardoma. Tačiau pastebėta, kad vidutinis stratifikacijos skaičius proceso metu yra 0,96. Tai reiškia, kad temperatūros pasiskirstymas talpoje yra gana tolydus. Taip yra todėl, kad karštas vanduo paimamas iš viršutinių talpos sluoksniu, o šaltas gražinamas į apatinius, todėl pačio stratifikacijos reiškinio toks akumuliacinės talpos iškrovimo būdas ženkliai nesutrikdo.

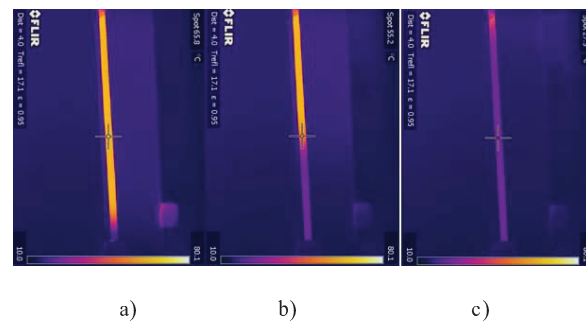


10 pav. Temperatūros pasiskirstymas talpoje iškrovimo proceso metu

Bandymo metu, kaip kitų nagrinėtų procesų metu, vienos minutės intervalu fiksuotos temperatūros skirtingose talpos vietose. Temperatūrų pasiskirstymas talpoje iškrovimo proceso metu, priklausomai nuo laiko pavaizduotas (10 pav.).

Pateiktame grafike matome, kad laikui bėgant temperatūros atskiruose talpos sluoksniuose mažėja. Pačioje proceso pradžioje didelio skirtumo nuo laikymo fazės temperatūrų pasiskirstymo nematome, tačiau laikui bėgant, po 35 min iškrovimo proceso pradžios (18:00 val.) ir po 65min nuo proceso pradžios (18:30 val.) – kartu tai atspindi būseną iškrovimo proceso viduryje – matomas ryškus temperatūrų skirtumas tarp temperatūros talpos viršuje ir apačioje. Talpos vidurinėje dalyje formuojasi temperatūrinis laiptas, vadinamas termoklina. Ji formuojasi todėl, kad kaip ir minėta, karštas vanduo yra paimamas iš talpos viršaus ir gražinamas atvėsęs į apatinę talpos dalį, šie srautai tarpusavyje nesimaišo ir laikui bėgant atskiria temperatūriniu laiptu karštąjį ir šaltąjį akumuliacinės talpos zonas.

Termovizinės iškrovimo proceso nuotraukos atitinkamai 17:30 val., 18:00 val. ir 19:00 val. pateikiamos (11 pav.). Nustatytos temperatūrų ribos šiam procesui stebėti termovizoriumi yra nuo 10 °C iki 80,1 °C.



11 pav. Vizualaus vertinimo fragmentai – laikymo procesas, a) proceso pradžioje ($t = 0$ val.), b) proceso viduryje ($t = 1$ val.), c) proceso pabaigoje ($t = 2$ val.)

Iš (11 pav.) pateiktų termovizinių nuotraukų matome, kaip vyksta iškrovimo procesas ir kaip keičiasi temperatūros talpoje. Pirmojoje nuotraukoje matome, kad temperatūrinis režimas po laikymo proceso yra nusistovėjęs, šiek tiek žemesnių parametrų šilumnešis yra talpos apačioje. Prasidėjus iškrovimo procesui (vidurinis pavėkslas) matome, kaip talpos viduje pasikeičia temperatūrinis režimas, atsiranda aiški riba tarp karštosios ir šaltosios akumuliacinės talpos zonos. Tai pagrindžia darytą išvadą iš eksperimento rezultatų apie termoklinos susiformavimą iškrovimo proceso metu. Toliau matome, kaip karštas vandens sluoksnis mažėja, o šaltas didėja,

termoklina juda į viršutinę talpos dalį, kol temperatūros susilygina ir talpa yra iškrauta.

Išvados

Darbe išnagrinėti vertikalioje akumuliacinėje talpoje vykstantys pagrindiniai veikimo režimai. Eksperimentu metu gautos pagrindinės išvados yra šios:

1. Gautas įkrovimo proceso efektyvumas yra 98,75 %, įkrovimo metu vidutinis Str skaičius sudaro 0,94. Jis svyruoja nuo 0,7 proceso pradžioje, kai temperatūrinis režimas yra sutrikdomas ir palaipsniui didėja – talpa stratifikuojasi, maksimalus gautas Str skaičius įkrovimo proceso metu yra 1,0. Temperatūros palaipsniui kyla visame talpos tūryje.

2. Ištirtas laikymo procesas, jo efektyvumas yra 98,47 %. Šio proceso metu Str skaičius svyruoja nuo 0,98 proceso pradžioje iki maksimalaus galimo 1,0. Vidutinis laikymo proceso Str skaičius yra 1,0. Tai rodo, kad laikymo proceso metu temperatūrinis režimas akumuliacinėje talpoje nusistovi, nėra maišymosi, talpa pilnai susistratifikavusi. Gauti temperatūriniai grafikai rodo, kad šaltas vanduo susitelkia apačioje, o karštas viršuje. Susiformuoja temperatūrinis barjeras „termoklina“, esantis talpos apačioje.

3. Išnagrinėjus akumuliacinės talpos iškrovimo procesą, gautas jo efektyvumas yra 99,64%. Beveik visa talpoje akumuluota šiluma buvo perduota šilumos vartotojui. Stratifikacijos skaičius svyruoja nuo 0,87 iki 1,0. Prasidėjus iškrovimo procesui temperatūrinis režimas yra suardomas, bet vidutinis stratifikacijos skaičius yra 0,98 – jis išlieka aukštas. Tai reiškia, kad temperatūros pasiskirstymas talpoje yra gana tolydus. Nustatyta, kad pačio stratifikacijos reiškinio toks akumuliacinės talpos iškrovimo būdas ženkliai nesutrikdo.

4. Išanalizavus termovizines nuotraukas, matyti, kad jos patvirtina eksperimento rezultatus. Įkrovimo proceso metu temperatūra kyla visame talpos tūryje, termoklina, nors ir nežymi, yra talpos apačioje. Laikymo proceso metu temperatūrinis režimas nusistovi. Pereinamasis sluoksnis yra apačioje. Iškrovimo proceso metu, aiškiai matomas termoklinos kylimas į viršų, o talpa akivaizdžiai pasidalina į karštą ir šaltą zonas. Nagrinėjamas šilumos akumuliatorius visiškai iškraunamas, kai termoklina nukeliauja į talpos viršų ir žymaus temperatūrų skirtumo tarp viršutinės ir apatinės talpos dalies nebėra.

Padėka

Dėkoju doc. dr. Juozui Bielskui už pagalbą atliekant eksperimentinius tyrimus VGTU Pastato energetinių ir mikroklimato sistemų laboratorijoje.

Literatūra

- Alva G., Liu L., Huang X., Fang G. 2017. Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 68(August 2016): 693–706. DOI: 10.1016/j.rser.2016.10.021 .
- Alva G., Lin Y., Fang G. 2018. An overview of thermal energy storage systems, *Energy* 144: 341–378. DOI: 10.1016/j.energy.2017.12.037 .
- Aneke M., Wang M. 2016. Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review, *Applied Energy* 179: 350–377. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.06.097 .
- Bouhal T., Fertahi S., Agrouaz Y., El Rhafiki T., Kousksou T., Jamil A. 2017. Numerical modeling and optimization of thermal stratification in solar hot water storage tanks for domestic applications: CFD study, *Solar Energy* 157(September): 441–455. DOI: 10.1016/j.solener.2017.08.061 .
- Dincer I., Rosen M.A. 2013. *Exergy Analysis of Thermal Energy Storage Systems*. DOI: 10.1016/B978-0-08-097089-9.00009-7 .
- 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. DOI: 10.1016/j.rser.2009.07.035 .
- Han Y.M., Wang R.Z., Dai Y.J. 2009. Thermal stratification within the water tank, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13(5): 1014–1026. DOI: 10.1016/j.rser.2008.03.001 .
- Jack M.W., Wrobel J. 2009. Thermodynamic optimization of a stratified thermal storage device, *Applied Thermal Engineering* 29(11–12): 2344–2349. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2008.11.021 .
- Nash A.L., Badithela A., Jain N. 2017. Dynamic modeling of a sensible thermal energy storage tank with an immersed coil heat exchanger under three operation modes, *Applied Energy* 195: 877–889. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.03.092 .
- Rosen M.A., Tang R., Dincer I. 2004. Effect of stratification on energy and exergy capacities in thermal storage systems, *International Journal of Energy Research* 28(2): 177–193. DOI: 10.1002/er.960 .
- Streckienė G. 2011b. *Kogeneracinės jėgainės šilumos akumuliacinės talpos veikimo režimų tyrimai*.

EVALUATION OF HOT WATER STORAGE TANK OPERATING MODES

T. Kropas, G. Streckienė

Summary

The importance of heat accumulation technologies arises with increased usage of renewable energy sources. However, often the energy generated by such sources over time does not match the needs of the system or the user – energy is produced when there is no need and vice versa. This situation enhances new investigations of various accumulation technologies and their application. Such technologies compensate fluctuations in energy production and use over a day. At the same time, the need and importance to evaluate the efficiency of processes in

heat storage grows. In this work the operation modes of the accumulation tank are analyzed and their evaluation is performed. When we are talking about accumulation tanks, three main processes are distinguished: charging, storage and discharging. In this article separate experiments for each of these modes were performed and efficiency coefficients were determined. In

order to determine what happens to the thermal stratification and the temperature distribution in the tank, stratification numbers are calculated from the experimental data. A numerical and graphical interpretation of the obtained results was performed. The results are compared with thermovision photos.