VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS
PASTATŲ ENERGETIKOS KATEDRA

Tomas Kropas

AKUMULIACINĖS KARŠTO VANDENS TALPOS VEIKIMO REŽIMŲ TYRIMAS

INVESTIGATION OF OPERATION MODES OF HOT WATER STORAGE TANK

Baigiamasis magistro darbas

Pastatų energijos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX059
Energijos inžinerijos specializacija
Energijos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2019

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS
PASTATŲ ENERGETIKOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

_____
(Parašas)
Artur Rogoža
(Vardas, pavardė)

_____
(Data)

Tomas Kropas

AKUMULIACINĖS KARŠTO VANDENS TALPOS VEIKIMO REŽIMŲ TYRIMAS

INVESTIGATION OF OPERATION MODES OF HOT WATER STORAGE TANK

Baigiamasis magistro darbas

Pastatų energijos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX059

Energijos inžinerijos specializacija

Energijos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas	doc. dr. Giedrė Streckienė (Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)	 (Parašas)	2019-05-21 (Data)
Konsultantas	dr. Juozas Bielskus (Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)	 (Parašas)	2019-05-21 (Data)
Konsultantas	_____ (Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)	_____ (Parašas)	_____ (Data)
Lietuvių kalbos konsultantas	lekt. Regina Žukienė (Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)	 (Parašas)	2019-05-20 (Data)

Vilnius, 2019

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS
PASTATŲ ENERGETIKOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

_____
(parašas)

Artur Rogoža
(vardas, pavardė)

2019 _____ *mėn.* _____ *d.*

Energijos inžinerija studijų kryptis

Pastatų energijos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas ***6211EX059***

Energijos inžinerijos specializacija

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO UŽDUOTIS

.....Nr. .....
Vilnius

Studentui (ei) .....*Tomui Kropui*.....
(vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema ..... *Akumuliacinės karšto vandens talpos veikimo režimų tyrimas*.....

.....

Patvirtinta *2019-03-06* Dekano įsakymu Nr. *70 ap*

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas *2019 m. gegužės mėn. 23 d.*

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Aprašyti tyrimų srities problematiką, aktualumą, tyrimo objektą, suformuluoti tikslą ir spręstinus uždavinius. Atlikti literatūros apžvalgą šilumos akumuliavimo tema, ypatingą dėmesį skiriant karšto vandens talpų veikimo tyrimams. Atlikti eksperimentinius tyrimus – temperatūros nustatymą skirtingame talpos aukštyje – tiesiogiai matuojant ir pasitelkiant termoviziją. Sudaryti nagrinėjamos akumuliacinės talpos skaitinį modelį skaičiuojamąja fluidu dinamikos programa ANSYS Fluent. Palyginti modeliavimo metu gaunamus rezultatus su eksperimentiniais duomenimis, tokiu būdu validuoti skaitinį modelį. Skaitiniu ir eksperimentiniu būdu ištirti vykstančius šiluminius procesus akumuliacinėje talpoje, jai veikiant statiniu ir dinaminiu režimu, įvertinti veiksnius turinčius įtakos temperatūros pasiskirstymui talpoje. Įvertinti atskirų veikimo režimų efektyvumą. Nusakyti temperatūrinio pasiskirstymo kitimą pasirinktu šiluminės stratifikacijos vertinimo kriterijumi. Rezultatus ir teiginius pateikti iliustruota grafine medžiaga. Parengti darbo išvadas ir pasiūlymus. Parengti pranešimą konferencijai ir jį atspausdinti konferencijos medžiagoje.

.....

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai: ..... *Regina Žukienė* .....
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

Vadovas ....*dr. Giedrė Streckienė*.....
(parašas) (Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

Užduotį gavau
.....
(parašas)

.....*Tomas Kropas*.....
(vardas, pavardė)

2019-05-02
(data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Aplinkos inžinerijos fakultetas
Pastatų energetikos katedra

ISBN ISSN
Egz. sk. .....
Data .....-.....-.....

Antrosios pakopos studijų **Pastatų energijos inžinerijos** programos magistro baigiamasis darbas

Pavadinimas	**Akumuliacinės karšto vandens talpos veikimo režimų tyrimas**
Autorius	**Tomas Kropas**
Vadovas	**Giedrė Streckienė**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Vis dažniau naudojant atsinaujinančius energijos šaltinius iškyla šilumos akumuliavimo 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 akumuliavimo technologijas, kurios padeda išspręsti šią problemą ir gali išlyginti energijos gamybos svyravimus per parą ar kitą laikotarpį. Šiame darbe nagrinėjami vandeninės akumuliacinės talpos veikimo režimai, atliekamas jų vertinimas. Išskirti trys pagrindiniai procesai: įkrovimas, laikymas, iškrovimas ir atskiras – dinaminis režimas. Atlikti realūs eksperimentai kiekvienam iš režimų, nustatyti jų efektyvumo koeficientai. Siekiant išnagrinėti šiluminės stratifikacijos pobūdį bei temperatūros pasiskirstymą talpoje išsamiau, iš eksperimentų duomenų apskaičiuojamas stratifikaciją apibūdinantis kriterijus – stratifikacijos skaičius. Atlikta skaitinė ir grafinė gautų rezultatų interpretacija. Gauti rezultatai palyginti su termovizinėmis nuotraukomis. Sukurtas ir su eksperimento rezultatais patikrintas akumuliacinės talpos skaitinis modelis, naudojantis ANSYS Fluent programa, kuria modeliuojami įvairūs talpoje vykstantys procesai. Kadangi akumuliacinės talpos įkrovimo ir dinaminio įkrovimo - iškrovimo procesų modeliavimo rezultatai gerai sutapo su eksperimentiniais duomenimis, sudarytas modelis panaudotas skirtingo srauto įtakos talpos veikimui analizei. Taip pat jis gali būti pritaikytas kitų veiksnių įtakos analizei.

Prasminiai žodžiai: Akumuliacinė talpa, stratifikacija, efektyvumas, veikimo režimas, termovizija, skaičiuojamoji fluidų dinamika, ANSYS Fluent, modelio validavimas.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Environmental Engineering
Department of Building Energetics

ISBN ISSN
Copies No. .....
Date .....-.....-.....

Master Degree Studies **Building Energy Engineering** study programme Master Graduation Thesis

Title	**Investigation of Operation Modes of Hot Water Storage Tank**
Author	**Tomas Kropas**
Academic supervisor	**Giedrė Streckienė**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

The increasing use of renewable energy sources is creating the importance of heat storage technologies. Generally, however, the energy generated by such sources over time does not coincide with the needs of the system or user - energy is produced when there is no use and vice versa. This encourages the development and exploration of various energy storage technologies that help solve this problem and can smooth out fluctuations in energy production over the course of the day or other period. In this work the modes of operation of hot water storage tank are analyzed and their evaluation is performed. Three main processes are distinguished: charging, storage, discharging and separate - dynamic mode. Seperated real experiments have been performed for each of the modes, their efficiency coefficients are determined. In order to analyze the nature of thermal stratification and the temperature distribution in the tank in more detail, the criterion describing stratification - the number of stratification - is calculated from the experimental data. Numerical and graphical interpretation of the obtained results was performed. The results are compared to photos of thermovision. An accumulation tank numerical model was developed and tested with the results of the experiment using ANSYS Fluent program, which simulates various processes in the tank. Since the results of the accumulation tank charging and dynamic charge - discharge process modeling coincided with the experimental data, the model was used to analyze the influence of different flow on the thermal storage. It can also be applied to the analysis of the influence of other factors.

Keywords: Accumulation tank, stratification, efficiency, mode of operation, thermovision, computational fluid dynamics, ANSYS Fluent, model validation.

Vilniaus Gedimino technikos universiteto
egzaminų sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo
bei gynimo organizavimo tvarkos aprašo
2 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Tomas Kropas, 20133129
(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)
Aplinkos inžinerijos fakultetas
(Fakultetas)
Pastatų energijos inžinerija, ENmf-17
(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2019 m. gegužės 20 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Akumuliacinės karšto vandens talpos veikimo režimų tyrimas“ patvirtintas 2019 m. kovo 06 d. dekano potvarkiu Nr. 70ap, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Parenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: daktaras Juozas Bielskus. Mano darbo vadovas docentas daktaras Giedrė Streckienė.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).

(Parašas)

Tomas Kropas
(Vardas ir pavardė)

TURINYS

ĮVADAS 12

1. LITERATŪROS APŽVALGA 14

Šilumos akumuliavimo būdai, medžiagos ir paskirtis 14

Šiluminė stratifikacija akumuliacinėse talpose 16

Procesų, vykstančių šilumos akumuliacinėse talpose, tyrimo metodai 17

Bedimensiai dydžiai šiluminei stratifikacijai vertinti 18

Skaitinės fluidų dinamikos taikymas 20

Eksperimentiniai akumuliacinių talpų tyrimai 24

Pagrindinės išvados iš apžvelgtų studijų 25

2. METODINĖ DALIS 26

2.1. Eksperimentas (natūrinis) 26

2.1.1. Tyrimo objektas ir veikimo režimai 27

2.1.2. Matavimo įranga ir sąlygos 29

2.1.3. Šiluminės stratifikacijos vertinimas 31

2.2. Skaitinis eksperimentas 32

2.2.1. ANSYS Fluent SFD paketas 33

2.2.2. Matematinis modelio aprašas 33

2.2.3. Sukurtas skaitinis modelis 34

3. TYRYMO REZULTATAI 36

3.1. Eksperimentiniai atskirų procesų tyrimai 36

3.1.1. Įkrovimo proceso analizė ir sąlygos 36

3.1.2. Laikymo proceso analizė ir sąlygos 43
3.1.3. Iškrovimo proceso analizė ir sąlygos 46
3.1.4. Kintamos galios įkrovimo proceso analizė ir sąlygos 49
3.1.5. Dinaminio įkrovimo – iškrovimo proceso analizė ir sąlygos 53
3.2. Modeliavimo (skaitinio eksperimento) rezultatų analizė 58
3.2.1. Įkrovimo proceso skaitiniai rezultatai 58
3.2.2. Natūrinio ir skaitinio įkrovimo proceso eksperimentų palyginimas 60
3.2.3. Dinaminio režimo modeliavimo rezultatai 61
3.2.4. Natūrinio ir skaitinio dinaminio proceso eksperimentų palyginimas 64
3.2.5. Debito įtakos tyrimas vykstant dinaminiam akumuliacinės talpos veikimui 65
IŠVADOS/REKOMENDACIJOS 71
LITERATŪROS SĄRAŠAS 73
PRIEDAI 77
Priedas nr.1 Skirtingų CFD modelių rezultatų palyginimas.
Priedas nr.2 Straipsnis „AKUMULIACINĖS KARŠTO VANDENS TALPOS VEIKIMO REŽIMŲ VERTINIMAS“ leidinyje „Pastatų energetika“.
Priedas nr.3 Straipsnio pristatymas konferencijoje „Šilumos energetika ir technologijos – 2019“ 2019 m. sausio 31d., Kaunas.

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Sutankintas baigtinių elementų tinklelis charakteringose akumuliacinės talpos vietose (Li, 2016).....23

2 pav. Termoporų išdėstymas akumuliacinėje talpoje eksperimento metu (Wang et al., 2017).....24

3 pav. Akumuliacinės talpos techninis brėžinys (paimta iš objekto techninio aprašo) 27

4 pav. Tiriamojo objekto nuotrauka (sudaryta autoriaus).....28

5 pav. Daugiataškinis temperatūros matavimo prietaisas (sudaryta autoriaus).....29

6 pav. Akumuliacinė talpa su įleistu matavimo prietaisu (sudaryta autoriaus) 30

7 pav. Duomenų fiksavimo valdymo ir įrašymo įrenginys (sudaryta autoriaus).....30

8 pav. Akumuliacinė talpa ANSYS Fluent programoje (sudaryta autoriaus) 35

9 pav. Baigtinių elementų tinklelis (sudaryta autoriaus) 35

10 pav. Stratifikacijos skaičiaus priklausomybės nuo laiko grafikas, įkrovimo procesas (sudaryta autoriaus) 39

11 pav. Temperatūros pasiskirstymas talpoje įkrovimo metu priklausomai nuo termoporų padėties ir laiko (sudaryta autoriaus).....40

12 pav. Vizualaus vertinimo fragmentai, įkrovimo procesas, a) proceso pradžioje (t=0 val.), b) proceso viduryje(t=po 1 val.), c) proceso pabaigoje (t=po 2,5 val.) (sudaryta autoriaus) 40

13 pav. Stratifikacijos skaičiaus kitimas laikymo proceso metu 44

14 pav. Temperatūrų pasiskirstymas talpoje, laikymo metu, priklausomai nuo termoporų padėties ir laiko (sudaryta autoriaus).....45

15 pav. Vizualaus vertinimo fragmentai – laikymo procesas, a) proceso pradžioje (t=0 val.), b) proceso viduryje (t=1 val.), c) proceso pabaigoje (t=2 val.) (sudaryta autoriaus) 46

16 pav. Stratifikacijos skaičiaus kitimas iškrovimo proceso metu (sudaryta autoriaus) ...47

17 pav. Temperatūros pasiskirstymas talpoje, iškrovimo proceso metu (sudaryta autoriaus) 48

18 pav. Vizualaus vertinimo fragmentai – iškrovimo procesas, a) proceso pradžioje (t=0 val.), b) proceso viduryje (t=1 val.), c) proceso pabaigoje (t=2 val.) (sudaryta autoriaus) 49

19 pav. Kaitinimo galios priklausomybės nuo laiko grafikas, dinaminis įkrovimo procesas (sudaryta autoriaus) 50

20 pav. Stratifikacijos skaičiaus priklausomybės nuo laiko grafikas, įkrovimo procesas (sudaryta autoriaus) 51

21 pav. Temperatūros pasiskirstymas talpoje dinaminio įkrovimo metu priklausomai nuo termoporų padėties ir laiko (sudaryta autoriaus) 52

22 pav. Vidutinės akumuliacinės talpos temperatūros priklausomybė nuo laiko, dinaminis įkrovimo - iškrovimo procesas (sudaryta autoriaus) 54

23 pav. Stratifikacijos skaičiaus kitimas įkrovimo – iškrovimo procesuose (sudaryta autoriaus) 54

24 pav. Temperatūros pasiskirstymas talpoje dinaminio įkrovimo – iškrovimo proceso metu, priklausomai nuo termoporų padėties ir laiko (sudaryta autoriaus) 55

25 pav. Vizualaus vertinimo fragmentai įkrovimo – iškrovimo procesas, a) t=0 val., b) t=5 min. (sudaryta autoriaus) 56

26 pav. Vizualaus vertinimo fragmentai įkrovimo – iškrovimo procesas, a) t=10 min., b) t=20 min, c) t=30min. (sudaryta autoriaus) 57

27 pav. Akumuliacinės talpos įkrovimo procesas t=15min. (sudaryta autoriaus) 59

28 pav. Modeliavimo rezultatas t=30min. (sudaryta autoriaus) 59

29 pav. Natūrinio ir skaitinio eksperimentų palyginimas – vidutinė talpos temperatūra įkrovimo proceso metu (sudaryta autoriaus) 60

30 pav. Srauto judėjimo linijos akumuliacinėje talpoje t=15min. (sudaryta autoriaus) 62

31 pav. Temperatūros pasiskirstymas talpoje, a) t=1 min., b) t=5min. (sudaryta autoriaus) 62

32 pav. Temperatūros kitimas akumuliacinės talpos modelyje, priklausomai nuo proceso laiko (sudaryta autoriaus) 63

33 pav. Natūrinio ir skaitinio eksperimentų palyginimas – vidutinė talpos temperatūra dinaminio įkrovimo - iškrovimo proceso metu (sudaryta autoriaus) 64

34 pav. Srauto judėjimas skirtinguose modeliuose, t=15 min. a) q=0,44 kg/s, b) q=0,22 kg/s, c) q=0,11 kg/s (sudaryta autoriaus) 66

35 pav. Temperatūros pasiskirstymas talpoje, kai t=5min. a) q=0,11 kg/s, b) q=0,22 kg/s, c) q=0,44 kg/s (sudaryta autoriaus) 67

36 pav. Temperatūros pasiskirstymas talpoje, kai t=15min. a) q=0,11 kg/s, b) q=0,22 kg/s, c) q=0,44 kg/s(sudaryta autoriaus).....68
37 pav. Temperatūros pasiskirstymas talpoje, kai t=30min. a) q=0,11 kg/s, b) q=0,22 kg/s, c) q=0,44 kg/s (sudaryta autoriaus).....68
38 pav. Temperatūros kitimas akumuliacinės talpos modeliuose, priklausomai nuo proceso laiko (sudaryta autoriaus).....69
39 pav. Skaitinių eksperimentų palyginimas. Vidutinė talpos temperatūra dinaminio įkrovimo - iškrovimo proceso metu, esant skirtingiems debitams (sudaryta autoriaus).....70

ĮVADAS

Problema ir darbo aktualumas

Šiais laikais sparčiai auga energijos poreikiai pastatuose, pramonėje ir kasdieniniame mūsų gyvenime. Įvairių formų energijos gamybai sparčiai augant 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 CO_2 bei kitų teršalų emisijų ir nesukelia vadinamojo „šiltnamio" efekto. Vienas didžiausių iššūkių, naudojant atsinaujinančius energijos šaltinius, ypač saulės ir vėjo, yra tas, kad jie yra 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 akumuliatorius.

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 ištekliai jos negeneruoja (Rosen et al., 2004; Dincer et al., 2013; Aneke et al., 2016). Toks įrenginių derinys padeda užtikrinti sistemos 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).

Šiais laikais vis daugiau inžinerinių pastato ar pramonės sistemų pasižymi dinaminiu režimu. Patys atsinaujinantys šaltiniai veikia ir generuoja ne pastovios galios energiją, o skirtingas galias skirtingais laiko tarpsniais (pvz., saulės kolektoriai) ir tai tampa gan dideliu galvosūkiu tiek projektuotojui, tiek ir tokių sistemų naudotojui. Norint numatyti teisingus inžinerinius sprendimus sistemose, reikia suvokti, kaip pačios sistemos veikia esant ne tik tariamam pastoviam, o ir dinaminiam režimui, kiek laiko gali užtekti šilumos, sukauptos akumuliacinėje talpoje ir kiek jos bus sukaupta, esant tokiam šilumos šaltinio veikimui. Taip pat labai svarbu įvertinti, kas nutinka su temperatūriniu pasiskirstymu talpoje (stratifikacija) ir kitomis akumuliacinių talpų savybėmis, esant neįprastam ciklišką jų veikimui. Šiuo tikslu darbe nagrinėjami įvairūs akumuliacinės talpos veikimo režimai, kai procesai (įkrovimas, iškrovimas, laikymas) vyksta ne tik kiekvienas atskirai, o ir visi ar iš dalies visi kartu (dinaminis režimas). Tai yra, kai vienu metu šilumos energija yra

kraunama į talpą ir tuo pačiu metu talpoje jau sukaupta energija yra naudojama sistemos šilumos poreikiui padengti. Iki šiol trūksta darbų, kurie vertintų tokį sistemos veikimo modelį (Li, 2016).

Norint įvertinti tokio sistemos derinio veikimo efektyvumą ir ištirti patį jos funkcionalumą bei procesus akumuliacinėje talpoje gali būti pasitelkiamos įvairios analizės metodikos: energinė, ekserginė efektyvumo analizė (Jack et al., 2009; V.Martinaitis, 2007), skaičiuojamosios fluidų dinamikos (SFD, angl. – CFD) modeliai, pvz., ANSYS paketas kartu su papildiniu FLUENT. Taip pat atliekami natūriniai eksperimentai, reikalingi modelio validacijai ir gautų rezultatų palyginimui su realia situacija.

Atsižvelgiant į esamą sistemų su šilumos akumuliacinėmis talpomis problematiką ir aktualumą, apibrėžiamas šio darbo tikslas ir uždaviniai jam pasiekti.

Darbo tikslas – ištirti akumuliacinėje karšto vandens talpoje vykstančius procesus esant įvairiems veikimo režimams bei nustatyti stratifikacijos kitimą ir efektyvumą.

Tyrimų objektas – šilumos akumuliacinė talpa, naudojama karšto vandens ruošimui saulės kolektorių sistemai.

Darbo uždaviniai:

1. Atlikti literatūros apžvalgą nagrinėjama tema;
2. Atlikti eksperimentinius bandymus statinio ir dinaminio akumuliacinės talpos veikimo laikotarpiais;
3. Sukurti skaitinį ir analitinį sistemos modelius ANSYS Fluent programoje;
4. Atlikti sistemos modeliavimą ir skaitinio modelio patikrinimą, lyginant su natūrinio eksperimento duomenimis;
5. Nustatyti akumuliacinės talpos stratifikaciją, jos kitimo tendencijas, efektyvumą, kitus parametrus, esant stacionariam ir dinaminiam režimui bei parengti išvadas ir rekomendacijas.



1. LITERATŪROS APŽVALGA

Šiame skyriuje apžvelgiama literatūra, susijusi su nagrinėjama tematika. Apžvelgiami kitų mokslininkų darbai, susiję su akumuliacinėmis talpomis, jų efektyvumo vertinimu ir skaičiavimais. Pateikiama akumuliacinių talpų klasifikacija, paskirtis, pagrindinės naudojimo ir taikymo sritys. Aprašomos pagrindinės akumuliacinių talpų savybės, naudojamos užpildymo medžiagos. Nagrinėjama, kokie veiksniai ir reiškiniai vyksta akumuliacinėse talpose, kaip jie aprašomi ir vertinami.

Šilumos akumuliavimo būdai, medžiagos ir paskirtis

Energijos akumuliavimo sąvoka yra suprantama kaip turimos energijos potencialo paėmimas, saugojimas ir panaudojimas tada, kai atsiras jos poreikis sistemoje. Įvairių formų energija gali būti kaupiama skirtingais būdais. Viena iš labiausiai paplitusių ir naudojamų energijos formų yra šiluma.

Yra išskiriami du pagrindiniai šiluminės energijos 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 arba specifinę šilumą nėra pagrįstas fazių virsmų reiškiniu. Čia vykstant šilumos absorbcijos procesui, pakyla akumuliacinėje talpoje naudojamos medžiagos temperatūra (Alva et al., 2018). Tokiu būdu talpoje sukauptos energijos kiekis gali būti apskaičiuojamas, remiantis formule:

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \tag{1}$$

Čia: m – medžiagos masė, kg;

C_p – specifinė šiluma, kJ/(kg·K);

ΔT – temperatūros pokytis vykstant procesui talpoje; °C.

Būtent šio tipo šilumos akumuliatoriai dažniausiai yra naudojami įvairių tipų pastatuose šildymo, karšto vandens ruošimo sistemose.

Akumuliacinės talpos gali būti užpildytos įvairiomis – tiek skystomis, tiek kietomis medžiagomis: terminiais aliejais, druskų tirpalais, druskų lydiniais, skystais metalais, uolienomis. Tačiau naudojant įvairius lydinius ir medžiagas, kurios natūralioje būsenoje yra kietos, reikalingos aukštos temperatūros. Pavyzdžiui, naudojant lydytas druskas reikalinga temperatūra yra nuo ≈200°C (lydymosi temperatūra) iki ≈565°C – maksimali darbinė temperatūra (Alva et al., 2018). Buityje eksploatuojamose sistemose viena populiariausių akumuliacinių talpų užpildymo medžiagų, esant plačiam neaukštų temperatūrų diapazonui 25-90 °C yra vanduo (ar vandens mišiniai su tam tikra priemaišų koncentracija nuo užšalimo, esant šaltajam periodui). Jis yra prieinamas, pigus, netoksiškas ir turi didesnę specifinę šilumą (4,184 kJ/kg·K) nei kitos panašios medžiagos (Hasnain S.M., 1998; Tatsidjodoung et al., 2013; Alva et al., 2018; Han et al., 2009). Būtent tokio temperatūrų diapazono šilumnešis paprastai yra naudojamas įvairių paskirčių pastatų karšto vandens poreikiams inžinerinėse sistemose padengti. Baigiamajame magistro darbe kaip nagrinėjamos akumuliacinės talpos užpildas taip pat bus naudojamas vanduo.

Pačios akumuliacinės talpos turi būti atsparios išorės poveikiams, deformacijoms, apkrovoms, nes tai gali turėti įtaką jų veikimui. Todėl jos turi būti tvirtos ir patvarios. Dažniausiai tokios talpos yra gaminamos iš daugelio skirtingų konstrukcijų medžiagų, tokių kaip plienas, aliuminis, gelžbetonis, stiklo pluoštas. Akumuliacinės talpos yra izoliuojamos stiklo, mineraline vata, poliuretanu (Hasnain S.M., 1998), norint išvengti nereikalingų šilumos nuostolių į aplinką ir palaikyti gerą talpos efektyvumą.

Išskiriami pagrindiniai akumuliacinių talpų veikimo etapai yra trys:

- įkrovimas,
- laikymas,
- iškrovimas.

Daug autorių nagrinėja akumuliacinių talpų veikimą ir efektyvumą būtent šiais atskirais etapais arba keliais iš jų (Jack et al., 2009; Streckienė, 2011a; Nash et al., 2017). Norint analizuoti akumuliacines talpas, įvairias sistemas su jomis, nustatyti stratifikaciją akumuliacinėje talpoje, jos efektyvumą, kitus parametrus yra kuriama vis daugiau skaitinių ir analitinių modelių (González et al., 2016; Wang et al., 2017; Streckienė, 2011a; Nash et al., 2017; Baeten et al., 2016).

Šiluminė stratifikacija akumuliacinėse talpose

Vienos labiausiai paplitusių šiluminės energijos akumuliatorių buityje yra stratifikuotos šiluminės akumuliacinės talpos. Jos gali būti įvairių konstrukcijų:

- tiesioginio veikimo (kai šilumnešis tiesiogiai imamas/tiekiamas į talpą),
- su į talpą įleistu šilumokaičiu ir
- su atskiru ne talpoje esančiu šilumokaičiu.

Vienas iš svarbiausių veiksnių, kuris, yra reikalingas ir gali pagerinti tokios akumuliacinės talpos veikimą ir efektyvumą yra šiluminė stratifikacija. Ji atsiranda dėl temperatūrų skirtumo tarp įtekančio ir ištekančio iš talpos fluido. Atsiradus gravitacijos, terminio plūdrumo jėgoms, kurios lemia talpoje esančio skysčio išsisluoksniavimą, karštesnis vanduo kyla į viršų, o šaltesnis – sėda žemyn. Dėl susidariusios stratifikacijos akumuliacinėje talpoje esantis aukštesnės temperatūros fluidas nesimaišo su žemesnės temperatūros fluidu arba tas maišymasis yra kiek įmanoma mažinamas (Hasnain S.M., 1998; Shin et al., 2004; González et al., 2016; Han et al., 2009; Ismail et al., 1997).

Kai talpoje esantis skystis pasiskirsto į karšto ir šalto vandens zonas, tarp jų atsirandantis skiriamasis, besimaišančio vandens, pereinamasis temperatūros sluoksnis, vadinamas „termoklina“ (angl. thermocline) (Njoku et al., 2016; Castell et al., 2010). Šioje zonoje vyksta didžiausi temperatūros kitimai. Tačiau susidaręs „temperatūrinis barjeras“ – temoklina, padeda išlaikyti pastovų vertikalų tankio ir temperatūros gradientą, kuris yra labai svarbus norint minimalizuoti karšto ir šalto vandens sluoksnių talpoje tarpusavio maišymąsi ir sukaupti maksimalų energijos kiekį (Han et al., 2009). Kuo pereinamasis sluoksnis yra plonesnis, tuo daugiau energijos yra sukaupta talpoje, todėl yra stengiamasi kaip įmanoma labiau jį sumažinti. Tačiau tai padaryti nėra taip paprasta, nes pačio skiriamojo sluoksnio susidarymas priklauso nuo daugelio veiksnių: talpos geometrinių savybių, įėjimo/išėjimo atvamzdžių vietos, šiluminių charakteristikų ir pačios hidrodinamikos talpoje (Castell et al., 2010).

Akumuliacinėje talpoje vykstant įkrovimo ar iškrovimo procesams, pereinamoji sritis keičia savo vietą. Vykstant talpos įkrovimo procesui, pereinamoji sritis leidžiasi žemyn, viršuje kaupiasi karštas vanduo, o apačioje – šaltas. Vykstant iškrovimo ciklui, viskas vyksta atvirkščiai – pereinamoji zona kyla į viršų (Bouhal et al., 2017).

Norint išlaikyti šiluminę stratifikaciją tokio tipo akumuliacinėse talpose reikia, kad karštas šilumnešis įtekėtų ir ištekėtų viršutinėje talpos dalyje, o šaltas – apatinėje, jei šaltas vanduo bus tiekiamas viršutinėje talpos dalyje, jis dėl didesnio tankio judės į talpos dugną ir termoklina bei stratifikacija bus suardyta (Han et al., 2009). Todėl dažniausiai šildantysis talpą fluidas yra imamas iš talpos apačios, pašildomas ir gražinamas į viršutinę jos dalį. O vartotojo pusės sistema ima karštesnį šilumnešį iš talpos viršutinės dalies, panaudoja jo šilumą ir gražina į apatinę talpos dalį.

Tačiau atviro tipo akumuliacinėse talpose reikia riboti šilumnešio įtekėjimo ir ištekėjimo greičius, nes tai tiesiogiai susiję su turbulencijos atsiradimu talpoje, kuri gali neigiamai paveikti stratifikaciją, iš pradžių tai gali turėti teigiamą poveikį, vėliau didelis įtekėjimo, ištekėjimo debitas ima ją ardyti (Wang et al., 2017; Ievers et al., 2009). Ir atvirkščiai, kuo mažesnis karšto vandens debitas, tuo lėčiau, bet tolygiau formuojasi stratifikacija. Talpose su integruotu, viduje esančiu šilumokaičiu, didžiulį efektą turi šilumokaičio vieta akumuliacinės talpos vertikaliosios ašies atžvilgiu. Šildantysis šilumokaitis turėtų būti viršutinėje talpos dalyje, norint pagerinti stratifikacijos efektą (Han et al., 2009).

Didelę reikšmę stratifikacijos reiškiniui turi ir šilumnešio temperatūros. Kuo karštesnis fluidas įteka į talpą ją kraunant, tuo stratifikacija formuojasi greičiau.

Vienas paprasčiausių parametrų aprašančių stratifikaciją yra talpos aukščio ir pločio santykis H/D. Daug tyrimų parodė, kad aukštesnėse talpose stratifikacijos reiškinys vyksta geriau, nei žemose. Kuo didesnis talpos aukščio ir skersmens santykis, tuo talpa yra geriau stratifikuota, tačiau vėliau santykiui didėjant, tarp 3 – 4 atsiranda kainos ir efektyvumo klausimas ir įrenginėti labai aukštas talpas gali būti ekonomiškai nebenaudinga (Castell et al., 2010).

Procesų, vykstančių šilumos akumuliacinėse talpose, tyrimo metodai

Energinė analizė

Energijos tvermės dėsnis (arba pirmasis termodinamikos dėsnis – PTD) teigia, kad vykstant energijos virsmų procesams energijos kiekis nekinta, tik iš vienos formos pereina į kitą. PTD išreiškia įvairių energijos formų balansą virsmų veikiamoje sistemoje. Jis įvertina įvairių energijos formų energiją, pereinančia tarp sistemos ir išorės, bet neįvertina nei tos energijos kokybės, nei lygio (Dincer et al., 2013; V.Martinaitis, 2007; Li, 2016; Njoku et al., 2016).

Ekserginė analizė

Šiuo metu vis plačiau pastebima, kad įvairių įrenginių veikimo vertinimas tik energine analize nėra pakankamas, nes ne visada tiksliai atsižvelgiama į skirtingas energijos formas (V.Martinaitis, 2007). Todėl vis dažniau pradėta taikyti ekserginę analizę. Eksergijos analizė buvo taikoma nuo 1970 – ųjų, siekiant rasti racionalų energijos naudojimą, tuo pačiu sumažinti iškastinio kuro suvartojimą, naudoti efektyvesnes sistemas ar jų veikimo režimus, bei taikyti energijos pasiūlos ir paklausos atitikimo kokybės lygį. Todėl, ekserginė analizė lygiagrečiai taikoma su energijos analize, siekiant rasti kuo racionalesnį energijos naudojimą. *Eksergija* yra apibrėžiama kaip didžiausias teorinis darbas gautas iš sistemos ir ją supančios aplinkos (Torío et al., 2009).

Antrasis termodinamikos dėsnis (ATD) leidžia įvertinti energijos kokybės ir lygio skirtumus. Eksergijos, kaip galimos transformuoti i darbą energijos dalies, sąvoka ir esmė apima PTD ir ATD kartu įvertinant supančios aplinkos parametrus (V.Martinaitis, 2007; Njoku et al., 2016; Rosen et al., 2004; Dincer et al., 2013). Toks analizės metodas buvo taikomas M. Rosen, I. Dincer ir R. Tang tyrime „Effect of stratification on energy and exergy capacities in thermal storage systems“ Taip pat aprašytas I. Dincer ir M. Rosen knygoje „Exergy“, V. Martinaičio knygoje „Termodinaminė analizė“.

Bedimensiai dydžiai šiluminei stratifikacijai vertinti

Norint įvertinti akumuliacines talpas, šiluminę stratifikaciją talpoje skaitiniu ar analitiniu būdu literatūroje sutinkami ir plačiai naudojami bedimensiai kriterijai (Castell et al., 2010). Pagrindiniai iš jų yra:

- Ričardsono kriterijus – Ri;
- Reinoldso kriterijus – Re;
- Peklė kriterijus – Pe;
- Stratifikacijos skaičius - Str.

Ričardsono kriterijus – dažnai naudojamas apibūdinant šiluminę stratifikaciją. Vienas iš pagrindinių bedimensių kriterijų, sutinkamų literatūroje, apibūdinant akumuliacines talpas. Tai

plūdrumo jėgų santykis su srauto inercijos jėgomis. Šis bedimensis kriterijus priskiriamas prie tokių kriterijų, kurie pateikia informaciją apie talpos konstrukciją ir veikimo sąlygas.

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2} = \frac{g \cdot \beta \cdot H \cdot (T_{top} - T_{bottom})}{v_s^2} \quad (2)$$

Čia Gr – Grashofo skaičius, Re – Reinoldso skaičius, g – laisvojo kritimo pagreitis, m/s^2; β – terminio plėtimosi koeficientas, 1/K; H – talpos aukštis, m; T_{top} ir T_{bottom} – temperatūra talpos viršuje ir dugne, K; v_s – vidutinis vandens greitis difuzoriuje ar išleidimo angoje, m/s, lygus v_s=Q/($\pi \cdot r_{strat}^2$); Q – iškrovimo debitas, m^3/s; r_{strat} – difuzoriaus spindulys, m.

Mažas Ričardsono kriterijus reiškia susimaišiusią akumuliacinę talpą – nestratifikuotą, o didesnis Ričardsono kriterijus apibūdina stratifikuotą talpą. Ri kriterijui didelę įtaką turi srauto greitis, nes mažesnės srauto greičio reikšmės leidžia gauti didesnį Ri kriterijų, kas rodo geresnę šiluminę stratifikaciją. Pažymėtina, kad šis kriterijus apibūdina šiluminę stratifikaciją kokybiškai, bet ne kiekybiškai (Castell et al., 2010; Streckienė, 2011a; Wang et al., 2017; Bouhal et al., 2017).

Re ir Pe kriterijai gali būti naudojami analizuojant talpoje esantį temperatūros pasiskirstymą, tačiau jie nepateikia aiškios informacijos apie vykstančią šiluminę stratifikaciją. Paprastai šie kriterijai vartojami kaip papildomi kriterijai kartu su Ri kriterijumi (Streckienė, 2011a; Castell et al., 2010).

Reinoldso skaičius apibūdina srauto turbulentiškumą. Jis parodo inercinių ir klampos jėgų skystyje santykį. Kanaluose esant mažiems Re skaičiams $\leq$ 2100 – 2300, fluido srautas yra laminarinis, kai jis didėja iki Re $\approx$ 4000, skystis yra pereinamoje zonoje, esant dideliems Re $\geq$ 4000 skaičiams, laikoma, kad fluido judėjimas yra turbulentinis. Esant turbulentiniam režimui reikia atidžiai stebėti ir pasirinkti tinkamą fluido įtekėjimo ir ištekėjimo greitį, nes nuo jo tiesiogiai priklauso talpos fluido turbulentiškumas. Esant stipriai turbulentiškam srautui, stratifikacija gali būti neigiamai paveikta, suardyta, pereinamojo sluoksnio storis gali labai padidėti (Li, 2016).

Peklė kriterijus parodo priklausomybę tarp masinio šilumos perdavimo ir šilumos perdavimo laidumu. Paprastai jis naudojamas su Ri skaičiumi, siekiant apibūdinti šiluminę stratifikaciją akumuliacinėse talpose.

Kadangi šiluminės stratifikacijos vertinimas gali priklausyti ir nuo talpos veikimo režimo, kuris skirstomas į statinį ir dinaminį, išskiriamas ir Str (stratifikacijos) kriterijus. Jis apibūdina temperatūrų pasiskirstymą talpoje. Idealiu atveju, kai temperatūrų pasiskirstymas talpoje yra tolygus, stratifikacijos skaičius yra lygus 1, jei talpoje temperatūrinis režimas yra nenusistovėjęs, fluidas susimaišęs ir stratifikacijos visai nėra – Str skaičius bus lygus 0.

Be šių, jau aprašytų bedimensių dydžių, literatūroje sutinkamas dar vienas kriterijus – MIX. Šis skaičius apibūdina energijos ir temperatūros pasiskirstymą talpoje. MIX skaičius svyruoja nuo 0 iki 1. Kai MIX = 0, akumuliacinė talpa būna idealiai stratifikuota, o kai MIX = 1 – talpa visiškai susimaišiusi, t.y. visiškai nestratifikuota. Šis skaičius yra vienintelis parametras, kuris įvertina skirtingą temperatūrų pasiskirstymą talpos viduje, skaidant talpą į kelis skirtingų temperatūrų tūrius, sluoksnius. MIX skaičius nėra jautrus įeinančio srauto greičiui, tačiau labai jautrus įeinančio ir išeinančio srauto temperatūroms (Wang et al., 2017; Streckienė, 2011a; Castell et al., 2010). Šis skaičius apibūdina energijos ir temperatūros pasiskirstymą talpoje. Šis kriterijus paskaičiuojamas pagal tokią formulę (Castell et al., 2010):

$$MIX = \frac{(M_{E,strat} - M_{E,act})}{(M_{E,strat} - M_{E,fully\text{-}mixed})} \quad (3)$$

Čia $M_E = \sum_{i=1}^{n} y_i \cdot E_i;$ E – vandens energija, kJ; $E_i = \rho \cdot V_i \cdot c_p \cdot T_i;$ $M_{E,act}$ – energijos momentas faktinei talpai, kJ·m; $M_{E,fully\text{-}mixed}$ – energijos momentas visiškai sumaišytos temperatūros talpai, kJ·m; $M_{E,strat}$ – energijos momentas stratifikuotai talpai, kJ·m; y – atstumas nuo kontrolinio tūrio centro iki talpos dugno, m; i – kontrolinis tūris; n – vandens sluoksnių skaičius talpoje.

Skaitinės fluidų dinamikos taikymas

SFD arba skaičiuojamoji fluidų dinamika (angl. CFD) – visame pasaulyje vis labiau populiarėjantis būdas nagrinėti fluidų dinamikos ir šilumos mainų problemas. Jo pradžia yra siejama su II pasaulinio karo metais.

Patys skaitiniai skaičiavimo metodai yra skaidomi į kelias pagrindines grupes:

- Baigtinių skirtumų metodas;
- Baigtinių elementų metodas (BEM);

- Baigtinių tūrių metodas;
- Diskrečiųjų elementų metodas.

Anksčiau skaitinio modeliavimo galimybės būdavo labai ribotos dėl kompiuterinių resursų trūkumo. Lietuvoje iki XX a. antros pusės BEM buvo žinomas, tačiau inžineriniuose skaičiavimuose mažai taikomas. Tačiau per paskutinius dešimtmečius vis stiprėjant technikai, modeliavimas kyla į neregėtas aukštumas ir yra vis daugiau naudojamas visame pasaulyje ne tik tarp šio metodo kūrėjų bet ir tarp vartotojų. Dabar BEM suprantamas, kaip universali skaičiavimo technologija, apytikslis skaičiavimo metodas, skirtas diferencialinėms dalinių išvestinių lygtims spręsti. Viena didžiausių priežasčių, kodėl šis metodas vis populiarėja yra tai, kad sukurtas kompiuterinis modelis gali iš dalies pakeisti fizinį ir teorinį - analitinį modelį.

Atlikti fizinį eksperimentą dažnu atveju užtrunka daug laiko, taip pat jie gali būti brangūs dėl eksperimentui reikalingų medžiagų ir įrangos. Taip pat jie nėra lankstūs – vienas eksperimentas yra skirtas vienam konkrečiam atvejui ištirti. Analitinis arba matematinis metodas dažnai gali būti neįkandamas dėl sudėtingų lygčių ir jų sistemų sprendimo, be to, jis yra apribotas nesudėtingomis geometrijomis. Skaitinis modeliavimas leidžia mums daug kartų sumažinti eksperimento laiko ir medžiagų sąnaudas, dažnu atveju paketuose jau yra sukurti pagrindiniai matematiniai modeliai ir programos naudotojui nereikia kiekvieną kartą sudarinėti įvairių lygčių iš naujo. Belieka tik apsirašyti geometriją, kraštines sąlygas, apsirašyti patį fizinį modelį ir pasirinkti, koks matematinis modelis bus taikomas konkretaus uždavinio sprendimui. Taigi, dėl šių ir kitų priežasčių kompiuteriniai modeliavimo įrankiai tampa vis plačiau naudojami.

Baigtinių elementų pagrindu yra parašyta daug universalių bei specializuotų kompiuterinių programų ir programinių paketų, tačiau populiariausi SFD modeliavimui yra ANSYS kartu su FLUENT, PHOENIX, COMSOL ir kitos.

Siekiant nustatyti šiluminę stratifikaciją akumuliacinėse talpose taip pat vis dažniau yra taikomas skaitinis modeliavimas. Įvairūs autoriai nagrinėja akumuliacines talpas pasitelkiant skirtingus SFD paketus (Baeten et al., 2016; Streckienė, 2011a; Yang et al., 2016; Nash et al., 2017). Nors programos yra skirtingos, dažnai jų sprendimo algoritmas yra toks pats. Taikomas metodas realizuojamas standartiniu algoritmu, kuris mažai priklauso, nuo sprendžiamų uždavinių turinio ir yra beveik toks pats įvairių fizinių sistemų uždaviniuose.

Programose, nagrinėjant šilumos ir masės mainų procesus yra sprendžiamos 3 pagrindinės lygtys (Wang et al., 2017; Streckienė, 2011a; Yaïci et al., 2013; Bouhal et al., 2017):

- Nepertraukiamumo;
- Judėjimo;
- Energijos.

Nagrinėtoje literatūroje aprašomos pagrindinės į skaitinį modelį įvedamos fizikinės savybės: tankis, kinematinė klampa, specifinė šiluma, šiluminio laidumo koeficientas (Wang et al., 2017; Streckienė ,2011a; Moncho-Esteve et al., 2017).

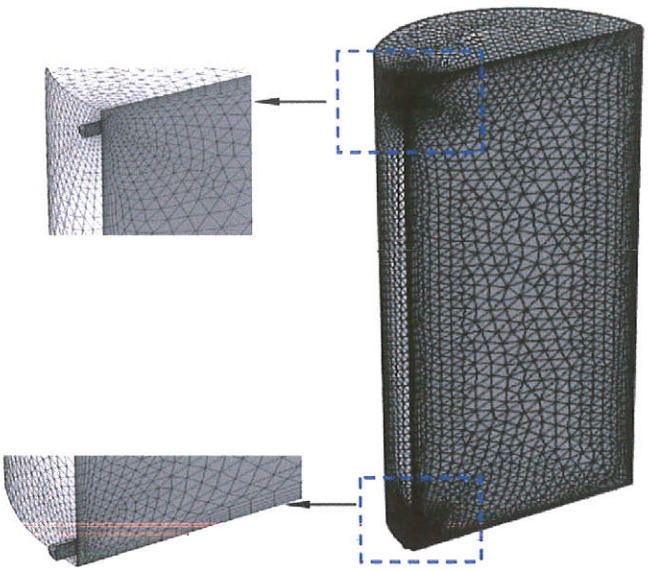
Taip pat autoriai aprašo pradines sąlygas ir kraštines sąlygas. Pradinės sąlygas sudaro: slėgis, greičių ir temperatūros laukai pradiniu laiko momentu. Pradinės temperatūros sąlygos suteikiamos akumuliacinės talpos užpildui ir išoriniam talpos izoliacijos sluoksniui, kuriam priskiriama išorės temperatūros reikšmė. Kraštinės sąlygos nusako sąveikos sąlygas baigtiniuose elementuose (Streckienė, 2011a; Wang et al., 2017).

Nagrinėtoje literatūroje pastebėta, kad labai svarbus yra baigtinių elementų tinklo sudarymas (ang. mesh). Taip tiriamasis objektas yra suskaidomas į diskrečiuosius arba baigtinius elementus, sudaromas diskretusis modelis. Baigtiniai elementai pagal savo geometriją gali būti skirstomi į:

- 1D – vienmačiai (linijiniai);
- 2D – dvimačiai (plokštieji)
- 3D – trimačiai (erdviniai)

Be abejo, patys paprasčiausi yra vienmačiai ir dvimačiai baigtiniai elementai. Trimačiai baigtiniai elementai sukurti tik vėliau, jie yra universaliausi, o sprendiniai yra tiksliausi, bet jie reikalauja didžiausių kompiuterinių resursų, sunkesnė yra duomenų ir rezultatų vizualizacija.

Kuo geresnės kokybės ir smulkesnis diskrečiųjų elementų tinklelis, tuo kokybiškesni ir tikslesni modeliavimo rezultatai bus gauti. Įvairiuose nagrinėtuose moksliniuose darbuose nustatyta, kad prie įėjimų ir išėjimų iš talpos bei jos sienelių baigtinių elementų tinklelis turi būti sutankintas, norint gauti kuo tikslesnius skaičiavimo rezultatus (Wang et al., 2017; Fan et al., 2015; Yang et al., 2016; Yaïci et al., 2013).



1 pav. Sutankintas baigtinių elementų tinklelis charakteringose vietose (Li, 2016)

Pateiktame 1 paveiksle matyti, kaip baigtinių elementų tinklelis yra sutankinamas prie charakteringų akumuliacinės talpos taškų – įtekėjimo, ištekėjimo angų bei prie talpos sienelių. Šiuolaikinės programos gali automatiškai sutankinti tinklelį tokiose vietose, tačiau ne visos. Esant būtinybei tinklelį galima koreguoti ir rankiniu būdu.

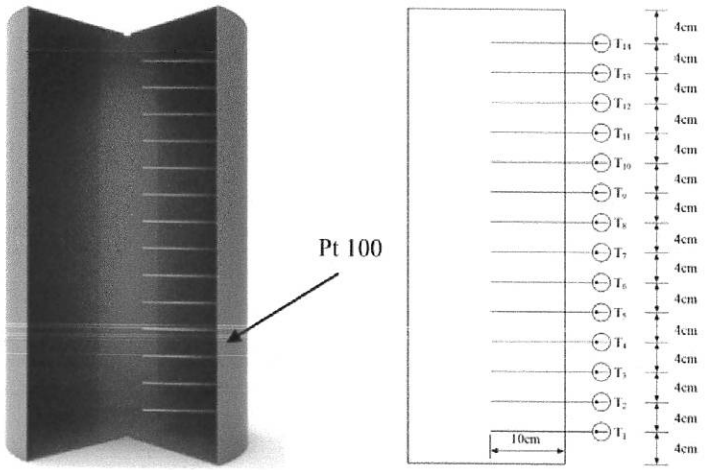
Norint įsitikinti, ar sudarytas skaitinis modelis yra tikslus ir parengtas teisingai, reikalingas jo patikrinimas. Norėdami tai padaryti, nagrinėti autoriai elgiasi dvejopai. Pirmasis būdas – patikrinti gautus SFD modelio generuojamus rezultatus su jau literatūroje žinomomis vertėmis ar eksperimentiškai ištirtais variantais (Baeten et al., 2016). Antrasis būdas – atlikti eksperimentą ir patikrinti rezultatus gautus modeliuojant ir eksperimento metu (Moncho-Esteve et al., 2017).

Eksperimentiniai akumuliacinių talpų tyrimai

Yra atlikta ir aprašyta daug eksperimentų su akumuliacinėmis talpomis. Įvairių šalių mokslininkai jau daug metų jas tiria ir aprašo savo straipsniuose. Eksperimento metu labai svarbus matavimo įrangos tikslumas ir patikimumas bei teisingas rezultatų interpretavimas.

Dažnu atveju, norint sužinoti temperatūros pasiskirstymą talpose, į jų vidų yra įmontuojamos termoporos (2 paveikslas) (Wang et al., 2017; Moncho-Esteve et al., 2017), kurių

duomenys yra nuskaitomi ir sisteminami. Vėliau – braižomos temperatūros pasiskirstymo kreivės. Būtent temperatūros pasiskirstymas padeda nustatyti stratifikaciją, pereinamąjį temperatūrų sluoksnį.



1 pav. Termoporų išdėstymas akumuliacinėje talpoje eksperimento metu (Wang et al., 2017).

Dar vienas iš esminių eksperimento metu matuojamų dydžių yra šilumnešio debitas. Fiksuojami įeinančio ir išeinančio fluido srauto dydis, jo greitis. Vėliau, turint fluido greičius talpoje, išskaičiuojami tokie dydžiai kaip Re, Ri kriterijai. Taip pat tiriama, kokią įtaką šilumnešio debitas turi akumuliacinės talpos efektyvumui, stratifikacijai bei kitiems dydžiams (Wang et al., 2017).

Jei talpa yra ne tiesioginio veikimo, t.y. jei yra įkraunama/iškraunama per tarpinį šilumokaitį, reikia įvertinti ir jo charakteringas savybes. Jei fluidas talpoje šildomas elektra, reikia charakterizuoti naudojamą šildymo teną, jo sunaudojamą elektros energiją.

Neatskiriamas nuo eksperimento dydis yra ir jo trukmė. Mokslininkai tiria kaip ir per kiek laiko atliekamas eksperimentas, koks šilumnešio srautas pratekėjo per tą laiką, kaip greitai susiformavo stratifikacija, kiek laiko, esant laikymo ciklui, talpoje išlaikoma energija ir pan.

Kiekvienas eksperimentas turi kažką išskirtinio, todėl aprašyti jų visų neįmanoma. Skirtingi vandens sklaidytuvai, įėjimo ir išėjimo angų diametras, jų vieta talpoje, skirtingos temperatūros, akumuliacinės talpos forma, tūris, dydis – visa tai suteikia savitumo kiekvienam eksperimentui.

Pagrindinės išvados iš apžvelgtų studijų

Iš apžvelgtų literatūros šaltinių sužinota, kaip planuoti ir atlikti eksperimentus, į ką atsižvelgti planuojant eksperimentą, atliekant SFD modeliavimą. Kaip pagrįsti sukurto SFD modelio rezultatų teisingumą, lyginant jį su atliktu fiziniu, realiu eksperimentu.

Skaitinio modeliavimo metu yra svarbu teisingai apsirašyti pradines ir kraštines sąlygas, aprašyti fizikines talpos ir jos fluido medžiagų savybes, talpos geometriją. Pasirinkti uždavinio tipą, kokios lygtys bus sprendžiamos skaitinio modelio skaičiavimo metu. Kuriant SFD modelį dar vienas esminis uždavinys – teisingai sudaryti diskretųjį tinklą. Svarbu sutankinti jį prie charakteringų talpos vietų: talpos įkrovimo, iškrovimo vietų, sienelių, šilumokaičių, kaitinimo elementų.

Apžvelgti bedimensiai dydžiai, naudojami stratifikuotų akumuliacinių talpų vertinimui ir aprašymui. Nustatyta, kad vienas iš dažnai naudojamų kriterijų aprašant akumuliacines talpas yra Stratifikacijos skaičius, jis gali būti derinamas su kitais bedimensiais dydžiais (Ri, Re, Pe, MIX).

Susipažinta, kaip kiti autoriai atlieka akumuliacinių talpų efektyvumo vertinimą. Šalia energinio vertinimo, kuris remiasi PTD dažnas iš autorių naudoja ir vis populiarėjantį ekserginį vertinimą, kuris nagrinėja energijos srautus ne tik kiekybiškai, bet ir kokybiškai, įvertina naudojamo energijos šaltinio potencialą ir tikslingą jo panaudojimą talpoje.

Sužinota, kad didelę įtaką šiluminei stratifikacijai talpoje turi įeinančio ir išeinančio iš talpos šilumnešio temperatūros, greičiai ir debitai. Svarbi fluidų įėjimo ir išėjimo vieta, diametras. Nustatyta, kad talpą geriausia krauti viršutinėje jos dalyje, o panaudotą ir atvėsusį šilumnešį iš naudojimo kontūro gražinti į apatinę talpos dalį. Norint išlaikyti stratifikaciją, reikėtų vengti didelių Re skaičių, nusakančių fluido turbulentiškumą. Turbulencijos srovės gali suardyti šiluminę stratifikaciją talpoje.

Žinoma, svarbi ir akumuliacinę talpą užpildanti medžiaga. Baigiamajame magistro darbe, kaip nagrinėjamos akumuliacinės talpos užpildas bus naudojamas vanduo.

Planuojama atlikti fizinį, realų eksperimentą, sukurti skaitinį tiriamojo objekto modelį ir gautus rezultatus palyginti tarpusavyje. Validuotas skaitinis modelis galės būti panaudotas

išsamesnei talpoje vykstančių procesų analizei. Apskaičiuoti talpos efektyvumą esant tik įkrovimo, iškrovimo ir saugojimo procesams atskirai ir dinaminiam veikimo režimui, kai šie procesai vyksta kartu.

2. METODINĖ DALIS

Šiame skyriuje aprašoma baigiamojo darbo metodinė dalis. Pristatomas tiriamasis darbo objektas, naudojama matavimo įranga, eksperimentas bei jo eiga, pateikiamas tiriamojo objekto SFD modelis, jo sudarymo prielaidos ir skaičiavimai.

2.1. Eksperimentas (natūrinis)

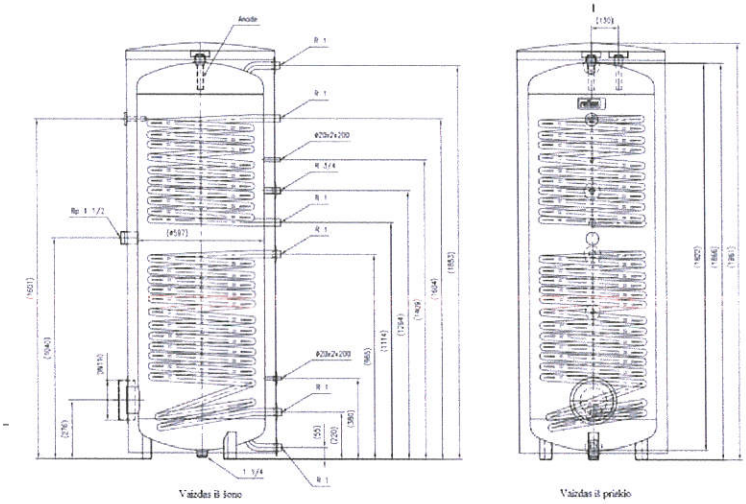
Baigiamajame darbe atlikti keli natūriniai eksperimentai. Pirmiausia tiriamasis objektas – akumuliacinė talpa – tiriamas visais jos veikimo režimais: įkrovimas, laikymas, iškrovimas. Šio atlikto eksperimento duomenys ir rezultatai naudojami skaitinio modelio validacijai. Vėliau tiriamas akumuliacinės talpos dinaminis režimas, kai visi trys pagrindiniai etapai vyksta ne atskirai, o kartu, t.y. bus tiriamas realus talpos veikimas, esant ir energijos gamybos ir naudojimo procesams. Eksperimentų metu bus fiksuojamos įeinančio ir išeinančio iš talpos šilumnešio temperatūros, srautai, elektrinio šildymo teno naudojama elektros galia.

Temperatūrų pasiskirstymui pačioje talpoje nustatymui pagal turimą analogą gaminamas matavimo prietaisas su 10 termoporų, išsidėsčiusių išilgai plastikinio strypo, kuris įleidžiamas į talpą. Taip galima stebėti, kaip temperatūros pasiskirsto visame talpos tūryje bet kuriuo eksperimento laiko momentu. Taip pat stebimas vaizdinis temperatūros pasiskirstymas, naudojant termovizorių.

Talpos įkrovimas atliekamas elektriniu kaitinimo elementu – tenu, esančiu akumuliacinės talpos apačioje. Talpos iškrovimas numatomas vykdyti tūriniu iškrovimu, nuvedant šilumą į vėdinimo įrenginio tiekiamo oro srauto šildymo sekciją.

2.1.1. Tyrimo objektas ir veikimo režimai

Tyrimo objektas yra akumuliacinė talpa Reflex SF 500/2, esanti VGTU Pastato energetinių ir mikroklimato sistemų (PEMS) laboratorijoje. Šios talpos techninis brėžinys ir nuotrauka pateikta 3, 4 paveiksluose.



2 pav. Akumuliacinės talpos techninis brėžinys (paimta iš objekto techninio aprašo)



3 pav. Tiriamojo objekto nuotrauka (sudaryta autoriaus)

Ši akumuliacinė talpa yra skirta ruošti karštą vandenį pastato inžinerinėms sistemoms. 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.

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

Yra išskiriami trys pagrindiniai nagrinėjami akumuliacinės talpos veikimo režimai:

- Įkrovimas;
- Laikymas;
- Iškrovimas.

Pirmojo eksperimento metu visi šie režimai bus tiriami atskirais etapais. **Antrojo eksperimento** metu tiriamas dinaminis akumuliacinės talpos režimas, kai vyksta vienalaikis talpos įkrovimas ir iškrovimas. Taip yra imituojamas realios karšto vandens ruošimo ir naudojimo sistemos veikimas.

2.1.2. Matavimo įranga ir sąlygos

Eksperimentų metu naudojama tokia matavimo įranga:

Srauto jutiklis – ultragarsinis debitomatis US ECHO II. Matavimo ribos 0,6÷15,0 m^3/h, darbo temperatūra 130 °C, trumpalaikė maksimali temperatūra 150°C, nominalus slėgis iki 16/25 bar, pagal EN 1434 tikslumo klasė 2 ±0,3;

Daugiafunkcinis elektros srovės, stiprio ir galios matavimo prietaisas MD 9272. Srovės stiprio matavimo paklaida matavimams iki 40 A ±1,0 %, 0,01 A, įtampos matavimui ±0,5 %, 0,01 V.

Temperatūros jutikliai (termopora panardinta) B klasė, PT1000. Matavimo ribos -200÷850 °C, tikslumas ±0,3 °C prie temperatūros 0°C;

AHLBORN duomenų fiksavimo, valdymo ir įrašymo įrenginys ALMEMO 5990-2.

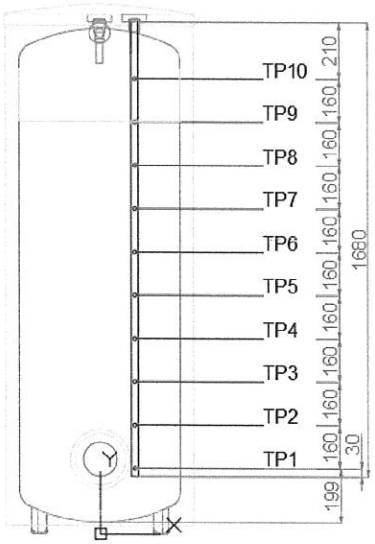
Daugiataškinis temperatūros matavimo prietaisas su 10 termoporų. Termopora (NiCr-Ni) K tipo, 2 klasė Matavimo ribos -200÷1370 °C, tikslumas ±0,05 K;

Daugiataškinis temperatūros matavimo prietaisas gaminamas pagal anksčiau naudotą tokio tipo matavimo prietaisą, pakeičiant aliuminio strypą į plastikinį PP-R 16x2,7 mm skersmens strypą ir naudojant pagamintas naujas K tipo NiCr-Ni termoporas, išdėstytas 16 cm atstumu viena nuo kitos. Pagamintas matavimo prietaisas pateiktas 5-ame paveiksle.



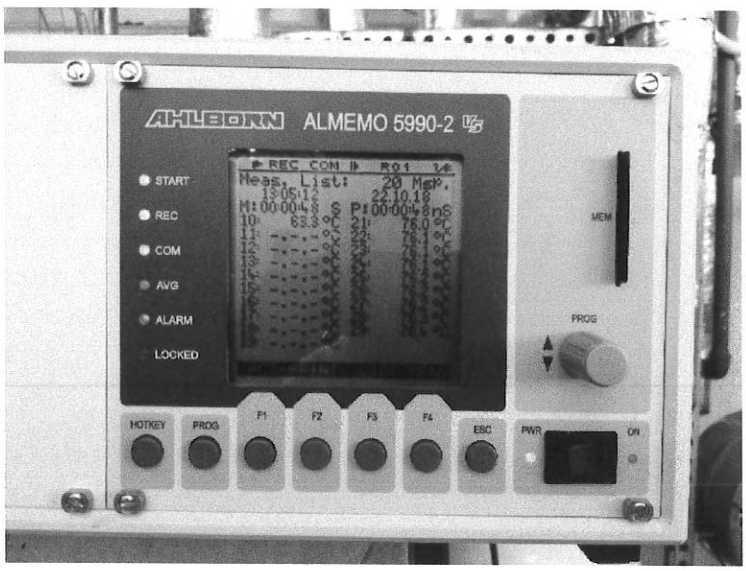
4 pav. Daugiataškinis temperatūros matavimo prietaisas (sudaryta autoriaus)

Matavimo prietaisas yra įleidžiamas į tiriamąjį objektą – akumuliacinę talpa, per jos viršutinėje dalyje esančią angą. Bendras akumuliacinės talpos su matavimo prietaisu brėžinys pateikiamas 6-ame paveiksle.



5 pav. Akumuliacinė talpa su įleistu matavimo prietaisu (sudaryta autoriaus)

Temperatūros fiksavimui skirtingose akumuliacinės talpos vietose 10 termoporų yra prijungiama prie AHLBORN duomenų fiksavimo, valdymo ir įrašymo įrenginio ALMEMO 5990-2 (7 pav.).



6 pav. Duomenų fiksavimo valdymo ir įrašymo įrenginys (sudaryta autoriaus)

Norint vizualiai stebėti, kaip temperatūros pasiskirsto talpoje, naudojamas termovizorius. Eksperimentų metu jis yra pastatomas 4 metrų atstumu nuo talpos. Specialiai šiam tikslui akumuliacinės talpos sienelės izoliacinėje medžiagoje yra išpjaunama siaura juosta, šioje vietoje

tiriamojo objekto korpusas yra nudažomas juodos spalvos matiniais dažais, kad įkaitusio paviršiaus spinduliuojami infraraudonieji spinduliai termovizoriumi būtų fiksuojami kuo tiksliau.

2.1.3. Šiluminės stratifikacijos vertinimas

Pagal atliktą literatūros apžvalgą, pasirenkami tokie vertinimo kriterijai:

- **Str skaičius**;
- **Temperatūrinis efektyvumas.**

Pirmasis pasirinktas Str skaičius. Kadangi šiluminės stratifikacijos vertinimas gali priklausyti ir nuo talpos veikimo režimo, kuris skirstomas į statinį ir dinaminį, vertinamas ir Str (stratifikacijos) kriterijus. 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, 2011b):

$$Str = \frac{\overline{(\partial T / \partial z)_t}}{\overline{(\partial T / \partial z)_{t=0}}} \tag{4}$$

Temperatūrų gradientų vidurkis bet kuriuo laiko momentu išreiškiamas:

$$\overline{\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_t} = \frac{1}{J-1} \cdot \left[\sum_{J=1}^{J-1} \frac{T_{j+1} - T_j}{\Delta z}\right] \tag{5}$$

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, 2011b):

$$\overline{\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)}_{\max} = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{(J-1)\cdot \Delta z} \tag{6}$$

Temperatūrinis efektyvumas bus vertinamas kaip santykis tarp šaltinio atiduoto energijos kiekio ir sistemos gauto energijos kiekio. Preliminarios, supaprastintos lygtys atrodytų taip:

Įkrovimo metu:

$$\eta_{Įkrovimo} = \frac{Q_{Talpos,gauta}}{Q_{Šaltinio,atiduota}} \tag{7}$$

Laikymo metu:

$$\eta_{Laikymo} = \frac{Q_{Talpoje,pabaigoje}}{Q_{Talpoje,pradžioje}} \tag{8}$$

Iškrovimo metu:

$$\eta_{Iškrovimo} = \frac{Q_{Naudotojo,gauta}}{Q_{Talpos,atiduota}} \tag{9}$$

Čia: $Q = m \cdot c_p \Delta T$, atitinkamo proceso atiduotas/gautas šilumos kiekis, W.

2.2. Skaitinis eksperimentas

Baigiamajame darbe atliekamas ir tiriamojo objekto skaitinis eksperimentas – modeliavimas. Pirmasis eksperimentas bus naudojamas sukurto skaitinio modelio validacijai atlikti, t.y. patikrinti, ar gauti modeliavimo rezultatai sutampa su atlikto natūrinio eksperimento matavimo rezultatais. Antrasis skaitinis eksperimentas – dinaminio režimo akumuliacinėje talpoje modeliavimas. Jo metu bus tiriama ir stebima, kas vyksta akumuliacinės talpos viduje, esant dinaminiam veikimo režimui. Kaip kinta stratifikacija talpoje, temperatūrinis režimas. Skaitinis modeliavimas atliekamas, naudojantis skaičiuojamosios fluidų dinamikos (SFD) modeliavimo programine įranga ANSYS Fluent.

2.2.1. ANSYS Fluent SFD paketas

ANSYS Fluent yra programinės įrangos paketas, skirtas skaičiuojamosios fluidų dinamikos uždaviniams spręsti. Patys programoje atliekami skaičiavimai yra paremti baigtinių elementų ir baigtinių tūrių skaičiavimo metodika. Metodas pradėtas naudoti deformuojamo kūno mechanikos uždaviniams spęsti, bet patobulėjus technologijoms dabar šia programa galima spręsti įvairius skysčių judėjimo, šilumos perdavimo, elektromagnetizmo ir kitus fizikos bei mechanikos uždavinius.

Ši programa, kaip ir kitos panašios programos yra paremta ta pačia metodikos procedūra. Visas sprendžiamasis uždavinys yra suskaidomas į 3 pagrindinius etapus:

- Preprocesorius;
- Procesorius;
- Postprocesorius.

Preprocesoriuje yra pirmasis uždavinio sprendimo etapas, kuriame aprašoma uždavinio geometrija - sukuriamas geometrinis objekto ar sistemos modelis, jis yra suskirstomas į diskrečias ląsteles (sukuriamas baigtinių elementų ar tūrių tinklas), aprašomos fizikinio modeliavimo priklausomybės ir kintamieji, pasirenkamas uždavinio sprendimo modelis, aprašomos kraštinės ir pradinės sąlygos, reikalingos uždavinio sprendimui. Procesorius – etapas, kuriame vyksta pats iteratyvinis matematinių lygčių, uždavinio, sprendimas, čia pasirenkamas iteracijų skaičius, vyksta modeliavimas. Postprocesoriaus etape yra pateikiami modeliavimo gauti rezultatai, kurie yra analizuojami, pasirenkamos vizualizacijos ir rezultatų pateikimo būdai.

2.2.2. Matematinis modelio aprašas

Matematinis bandomojo objekto modelis sukuriamas aprašant matematinius ryšius ir skaičiavimus, naudojamus siekiant išspręsti nagrinėjamą uždavinį. Prieš kuriant matematinį modelį reikia nustatyti kokie reiškiniai bus vertinami skaičiavimuose. Kiekvienas reiškinys aprašomas tam tikra matematine išraiška – lygtimis. Sudaromame modelyje sprendžiamos tokios lygtys: energijos lygtis, tolydumo lygtis ir judėjimo lygtis.

Pagrindinės lygtys:

Vykstantys nestacionarūs šilumos ir masės mainų procesai akumuliacinėje talpoje aprašomi tokiomis lygtimis, kurių vektorinė išraiška:

Energijos lygtis:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T = \frac{\lambda}{\rho c_p} \nabla^2 T \qquad (10)$$

Tolydumo lygtis:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = 0 \qquad (11)$$

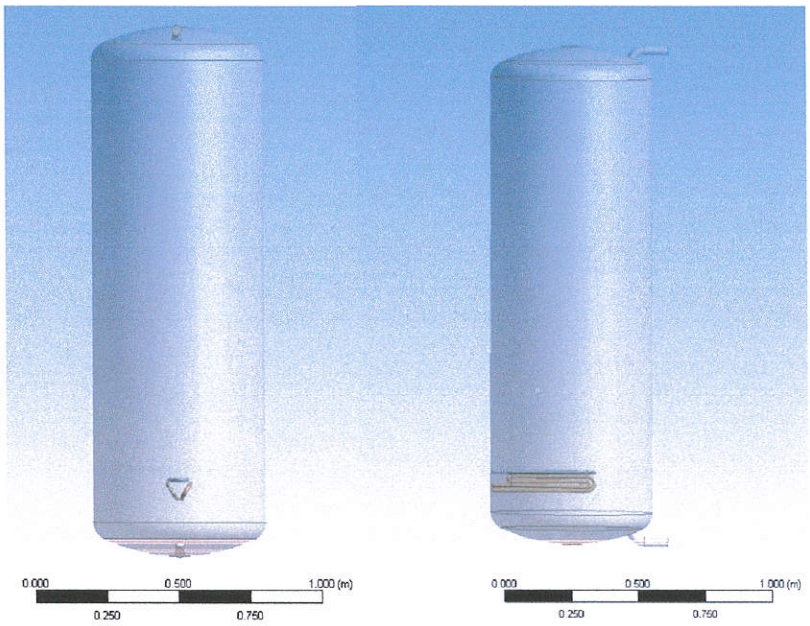
Judesio lygtis:

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\rho \vec{v} \cdot \nabla)\vec{v} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \rho \vec{g} \qquad (12)$$

Čia: $\vec{v}$ – greičio vektorius; t – laikas, s; ρ – medžiagos tankis, kg/m^3, ∇ – gradiento operatorius; ∇^2 – Laplaso operatorius; μ – kinematinė klampa, m^2/s, g – laisvojo kritimo pagreitis, m/s^2; p – slėgis, Pa.

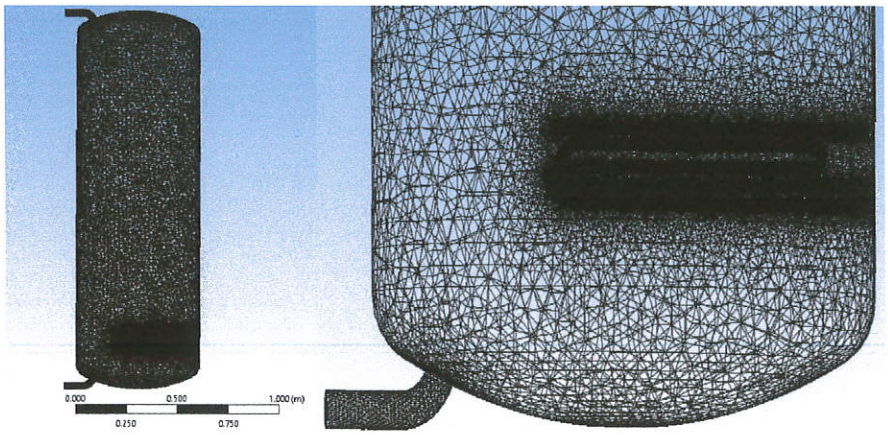
2.2.3. Sukurtas skaitinis modelis

AutoCad programine įranga sukurtas realios akumuliacinės talpos 3D modelis. Talpos apačioje sukurtas kaitinimo elementas, viršutinėje ir apatinėje dalyse numatyti fluido paėmimo ir grąžinimo atvamzdžiai tūriniam talpos nukrovimui. Geometrinis modelis įkeliamas į ANSYS Fluent programą (8 pav.), kur toliau bus modeliuojami anksčiau išvardinti procesai.



7 pav. Akumuliacinė talpa ANSYS Fluent programoje (sudaryta autoriaus)

Antras etapas baigtinių elementų tinklelio (mesh) sugeneravimas. ANSYS Fluent programoje pasirenkant ląstelių dydį, formą ir tankumą sugeneruotas tinklelis bus naudojamas skaitinio eksperimento (modeliavimo) skaičiavimuose. Jis pateiktas 9 paveiksle.



8 pav. Baigtinių elementų tinklelis (sudaryta autoriaus)

Sugeneruotas baigtinių elementų tinklelis yra nepastovaus dydžio ir tankumo. Toks sprendimas priimtas atsižvelgiant į literatūroje rastas rekomendacijas.

Pirmajame modeliavimo bandyme, įkrovimo proceso metu, kai talpa kraunama kaitinimo elementu, tinklas sutankintas prie kaitintuvo, nes būtent kaitinimo elementu energija bus perduodama talpoje esančiam fluidui. Antrojo bandymo metu, esant dinaminiam režimui, baigtinių

elementų tinklelis turi būti kuo detalesnis, nes visi procesai vyks vienu metu, todėl visi charakteringi elementai, esantys talpoje taip pat ir zonos prie sienelių, kur vyks šilumos laidumas, yra labai svarbios ir detalumas suteiks modeliavimo rezultatams tikslumo. Atsižvelgus į numatomus modeliavimo procesus tinklelis yra sutankintas ties tūrinio iškrovimo ir įkrovimo atvamzdžiais, aplink kaitinimo elementą. Taip pat vietose, kur keičiasi pati talpos geometrija – apačioje ir viršuje.

Baigtinių elementų dydžiai:

- Minimalus elemento dydis 0,001m;
- Maksimalus elemento dydis 0,025m;
- Elementų skaičius: 2319111;
- Tinklelio tipas: CFD Fluent.

3. TYRYMO REZULTATAI

Šiame skyriuje pateikti natūrinio ir skaitinio eksperimentų metu gauti rezultatai, pateikiami skaičiavimai, analizė ir vaizdinė interpretacija. Atliekamas skaitinio ir natūrinio eksperimentų palyginimas.

3.1. Eksperimentiniai atskirų procesų tyrimai

Eksperimentai atlikti pagal antrame skyriuje pateiktą metodiką. Tiriamasis baigiamojo darbo kūnas – akumuliacinė talpa - yra išbandoma atskirais įkrovimo, laikymo ir iškrovimo etapais. Nustatomas stratifikacijos skaičius ir temperatūrinis efektyvumo koeficientas atskiriems veikimo režimams.

3.1.1. Įkrovimo proceso analizė ir sąlygos

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:

$$Q_{el} = P \cdot t = U \cdot I \cdot t \tag{13}$$

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 tiekiama 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:

$$Q_{el} = (P_1 + P_2 + P_3) \cdot t = (U_1 \cdot I_1 + U_2 \cdot I_2 + U_3 \cdot I_3) \cdot t \tag{14}$$

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

Taigi, iš viso buvo perduota 26,61 kWh energijos, kai akumuliacinės talpos vidutinė temperatūra įkrovimo proceso metu pakilo nuo 23,52 °C iki 74,83 °C. Energijos kiekis, kurį gavo šilumos talpa skaičiuojama pagal 1 formulę:

$$Q_{talpos} = \frac{438,95 \cdot 4,2 \cdot (74,83 - 23,52)}{3600} = 26,276 kWh \tag{15}$$

Tada įkrovimo proceso efektyvumas apskaičiuojamas:

$$\eta_{įkrovimo} = \frac{Q_{talpos}}{Q_{el}} = \frac{26,28}{26,61} = 98,75\% \tag{16}$$

Tačiau nereikia pamiršti, kad dalis energijos buvo prarandama dėl akumuliacinės talpos šilumos mainų su aplinka. Norint atlikti tolimesnius energinio vertinimo skaičiavimus būtina paskaičiuoti, koks šilumos kiekis yra prarandamas per talpos sieneles. Šilumos srautas prarastas į aplinką skaičiuojamas pagal formulę:

$$\dot{Q}_{nuost} = U \cdot A \cdot \Delta T = U \cdot A \cdot (T_{talpoje} - T_{aplinkos}) \tag{17}$$

čia:

A – paviršiaus plotas, m^2;

U – šilumos perdavimo koeficientas, $W/m^2 \cdot K$;

ΔT – temperatūrų skirtumas tarp talpos (t_{talpos}) ir išorės ($t_{aplinkos}$) temperatūrų, K;

$\dot{Q}_{nuost}$ – prarandamas energijos srautas, kW;

Kadangi dalis šiluminės izoliacijos yra pašalinta, norint stebėti temperatūros kitimą talpoje su termovizoriumi, šilumos nuostoliai skaičiuojami kaip suma šilumos nuostolių per sienelę su šilumos izoliacija ir per vietą, kur šilumos izoliacijos nėra. Šilumos perdavimo koeficientai atitinkamai yra lygūs U_1=0,758 W/m^2·K ir U_2=14,437 W/m^2·K. O plotai yra lygūs A_1=3,516m^2 ir A_2=0,1 m^2, kur A1 – akumuliacinės talpos paviršiaus plotas, padengtas izoliacine medžiaga, A2 – akumuliacinės talpos paviršiaus plotas be izoliacijos. Tada per laiką prarandamas šilumos kiekis yra skaičiuojamas kaip suma nuostolių per sieneles kiekvieno laiko tarpu.

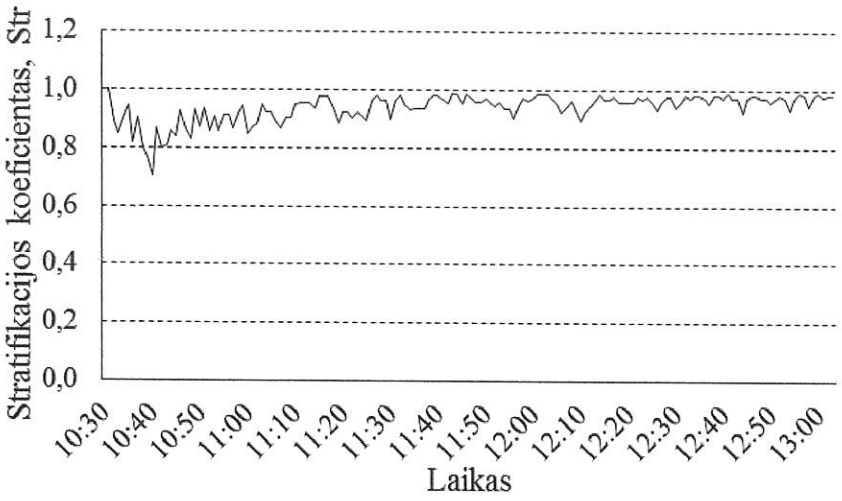
$$Q_{nuost} = \sum \dot{Q}_{nuost} \tag{18}$$

Įkrovimo metu teorinis temperatūrinis efektyvumas skaičiuojamas pagal formulę:

$$\eta_{teor.įkrovimo} = 1 - \frac{Q_{nuost}}{Q_{el}} = 1 - \frac{0,268}{26,61} = 98,99\% \tag{19}$$

Teorinis efektyvumas nuo matavimo metu gautų rezultatų grindžiamo efektyvumo skiriasi 0,25 %, todėl daroma išvada, kad matavimai ir skaičiavimai atlikti gerai.

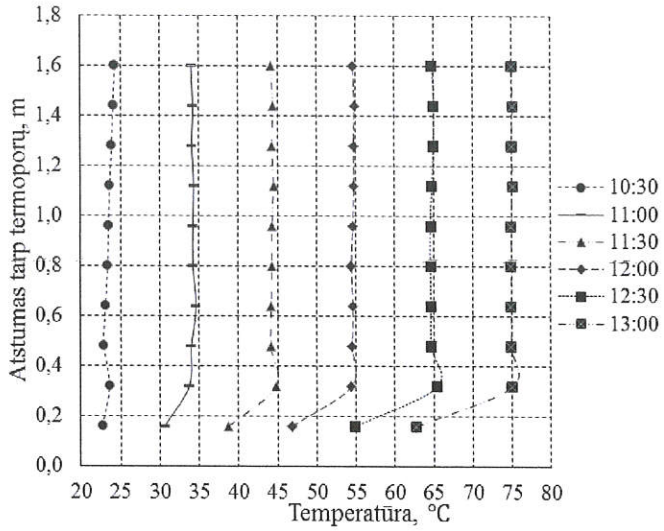
Kitas kriterijus, pasirinktas akumuliacinės talpos vertinimui įkrovimo metu vertinti, yra stratifikacijos skaičius. Idealiu atveju, kai temperatūrų pasiskirstymas talpoje yra tolygus, stratifikacijos skaičius yra lygus 1, jei talpoje temperatūrinis režimas yra nenusistovėjęs, fluidas susimaišęs ir stratifikacijos visai nėra Str skaičius bus lygus 0. Iš bandymo metu gautų duomenų šis koeficientas apskaičiuotas kiekvienam laiko žingsniui. Stratifikacijos skaičiaus kitimas laiko atžvilgiu pateikiamas 10 paveiksle.



9 pav. Stratifikacijos skaičiaus priklausomybės nuo laiko grafikas, įkrovimo procesas (sudaryta autoriaus)

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 visiškai 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 nebepasiekia maksimalios reikšmės. Vidutinis įkrovimo metu esantis stratifikacijos skaičius yra Str=0,94.

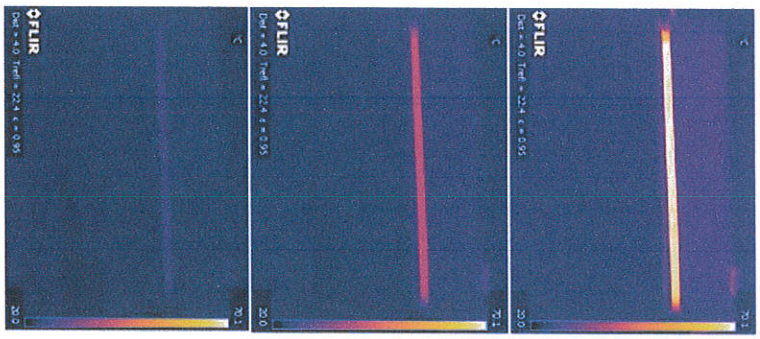
Bandymo metu vienos minutės intervalu fiksuotos temperatūros skirtingose talpos vietose, kaip parodyta 6 paveiksle. Atstumas tarp skirtingų termoporų yra 0,16 m. Kaitinant akumuliacinę talpą, laikui bėgant temperatūros atskirose sluoksniuose kyla ne vienodai. Temperatūrų pasiskirstymas talpoje įkrovimo metu, priklausomai nuo laiko pavaizduotas 11 paveiksle.



10 pav. Temperatūros pasiskirstymas talpoje įkrovimo metu priklausomai nuo termoporų padėties ir laiko (sudaryta autoriaus)

Kaip matome iš pateikto grafiko, temperatūros vykstant talpos įkrovimo procesui palaipsniui auga. Temperatūrų augimas yra tendencingas ir pastovus. Ypač 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 termovizoriumi. Nustatyti temperatūrų rėžiai yra nuo 20 °C iki 70,1 °C. Gauti rezultatai pateikiami 12 paveiksle.



a) b) c)

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

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.

Siekiant įvertinti matavimo rezultatų tikslumą skaičiuojamos paklaidos. Šilumos kiekio, sukaupto akumuliacinėje talpoje, skaičiavime (15), paklaidą duoda tik temperatūros matavimo prietaiso turima paklaida. Bendru atveju paklaida skaičiuojama:

$$\Delta Q = a \cdot \Delta x \tag{20}$$

čia:

a – konstanta, $a = \frac{m \cdot c_p}{3600} = 0,512$;

Δx – temperatūros matavimo prietaiso paklaida;

ΔQ – šilumos kiekio paklaida, kW.

$$\Delta x = \pm\sqrt{(\Delta t_1)^2 + (\Delta t_2)^2} \tag{21}$$

čia:

Δt – temperatūros matavimo prietaiso paklaida, paskaičiuojama pagal formulę:

$$\Delta t_i = 0,0075 \cdot |t_i| \tag{22}$$

Tada:

$$\Delta t_1 = 0,0075 \cdot 74,83 = 0,561$$

$$\Delta t_2 = 0,0075 \cdot 23,52 = 0,176$$

$$\Delta x = \pm\sqrt{(0,561)^2 + (0,176)^2} = \pm 0,588 \text{ K}$$

Šilumos kiekio paklaida pagal (20) apskaičiuojama:

$$\Delta Q = 0,512 \cdot 0,588 = 0,301 kWh$$

Tada akumuliacinės talpos sukauptas šilumos kiekis bus:

$$Q = 26,276 \pm 0,301 kWh$$

Skaičiuojama santykinė paklaida:

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{0,301}{26,276} = 1,15\% \tag{23}$$

Atlikus skaičiavimus santykinė matavimo metu gauta paklaida yra 1,15 %. Daroma išvada, kad temperatūros matavimo prietaisai yra pakankamai tikslūs ir jų generuojami rezultatai tinkami.

Šilumos kiekio, suteikto akumuliacinei talpai kaitinimo elementu, skaičiavime (14), paklaidą duoda elektros stiprio ir įtampos matavimo prietaiso turima paklaida. Bendru atveju paklaida skaičiuojama taip pat pagal (20). Šiuo atveju konstanta (a) yra įkrovimo laikas t. Bendra paklaidos skaičiavimo formulė atrodys taip:

$$\Delta Q_{el} = t \cdot \sqrt{(\Delta x_1)^2 + (\Delta x_2)^2 + (\Delta x_3)^2}; \tag{24}$$

$$\Delta Q_{el} = t \cdot \sqrt{\left(U_1 \cdot I_1 \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta U_1}{U_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_1}{I_1}\right)^2}\right)^2 + \left(U_2 \cdot I_2 \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta U_2}{U_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_2}{I_2}\right)^2}\right)^2 + \left(U_3 \cdot I_3 \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta U_3}{U_3}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_3}{I_3}\right)^2}\right)^2}; \tag{25}$$

čia:

t – bandymo trukmė, val.;

U_i – išmatuota elektros srovės įtampa, V;

I_i – išmatuotas elektros srovės stipris, A;

ΔQ_{el} – suteikto elektros energijos kiekio paklaida, kW;

ΔU_i – elektros srovės įtampos matavimo prietaiso paklaida;

ΔI_i – elektros srovės stiprio matavimo prietaiso paklaida.

Elektros energijos kiekio paklaida pagal (24) apskaičiuojama:

$$\Delta Q_{el} = 2,5 \cdot \sqrt{\left(229,33 \cdot 15,44 \cdot \sqrt{0,01^2 + 0,005^2}\right)^2 + \left(232,67 \cdot 15,43 \cdot \sqrt{0,01^2 + 0,005^2}\right)^2 + \left(230,33 \cdot 15,25 \cdot \sqrt{0,01^2 + 0,005^2}\right)^2} = 0,172 kWh;$$

Tada akumuliacinei talpai perduotas energijos kiekis bus:

$$Q_{el} = 26,61 \pm 0,172 kWh$$

Skaičiuojama santykinė paklaida:

$$\frac{\Delta Q_{el}}{Q_{el}} = \frac{0,172}{26,61} = 0,65\% \quad (26)$$

Atlikus skaičiavimus santykinė matavimo metu gauta paklaida yra 0,65 %. Daroma išvada, kad elektros matavimo prietaisai yra pakankamai tikslūs ir jų generuojami rezultatai tinkami eksperimentams.

Atsižvelgus į paklaidų skaičiavimo rezultatus, daroma išvada, kad matavimo įrangos tikslumas yra pakankamas ir paklaidos tolimesniuose skaičiavimuose ir bandymuose nevertinamos.

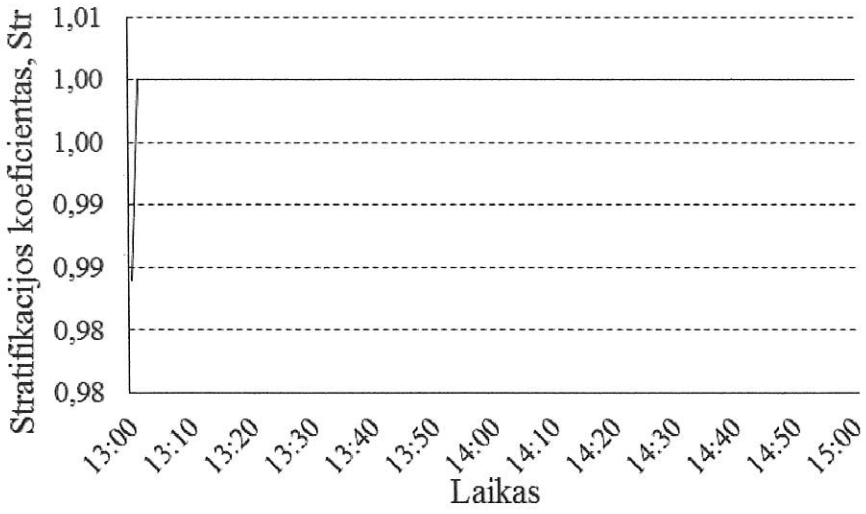
3.1.2. Laikymo proceso analizė ir sąlygos

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

Šilumos nuostoliai skaičiuojami analogiškai įkrovimo metu skaičiuotiems nuostoliams. Bandymo metu akumuliacinės talpos vertinimui pasirinkta laikymo proceso trukmė yra 2 valandos. Paskaičiuotas bendras proceso energinis efektyvumas yra:

$$\eta_{laikymo} = \frac{Q_{talpos,pradžioje} - Q_{nuostoliai}}{Q_{talpos,pradžioje}} = \frac{26,28 - 0,402}{26,28} = 98,47\% \quad (27)$$

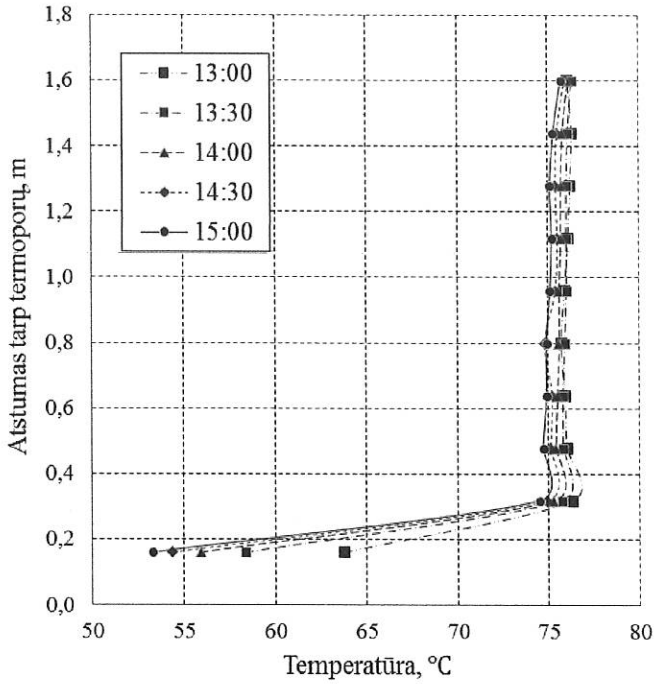
Kaip ir įkrovimo, taip ir laikymo proceso metu be temperatūrinio efektyvumo, kitas pasirinktas akumuliacinės talpos vertinimui kriterijus yra stratifikacijos skaičius – Str. Idealiu atveju, kai temperatūrų pasiskirstymas talpoje yra tolygus, stratifikacijos skaičius yra lygus 1, jei talpoje temperatūrinis režimas yra nenusistovėjęs, fluidas susimaišęs ir stratifikacijos visai nėra Str bus lygus 0. Iš bandymo metu gautų duomenų šis koeficientas paskaičiuotas kiekvienam laiko žingsniui. Stratifikacijos skaičiaus kitimas laiko atžvilgiu pateikiamas 13 paveiksle.



12 pav. Stratifikacijos skaičiaus kitimas 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 išsistratifikuoja ir Str skaičius tampa lygus 1. Vidutinis įkrovimo metu esantis stratifikacijos skaičius yra Str=1,00.

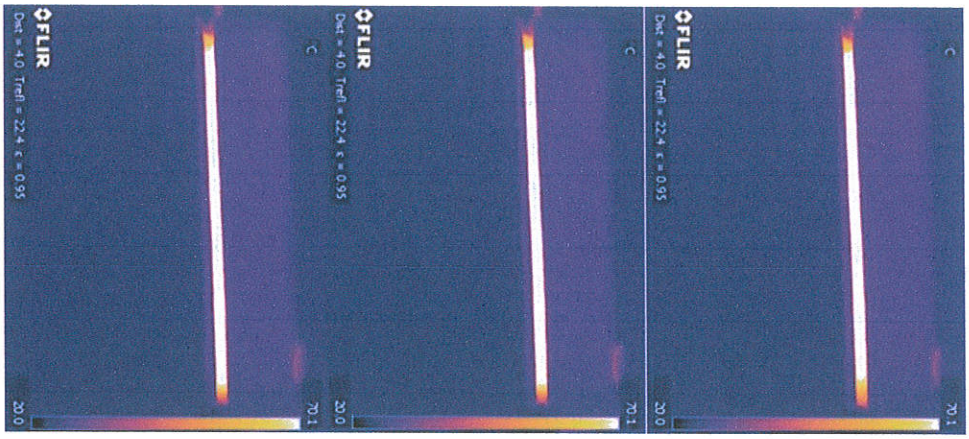
Bandymo metu, kaip ir įkrovimo proceso metu, vienos minutės intervalu fiksuotos temperatūros skirtingose talpos vietose. Temperatūrų pasiskirstymas talpoje laikymo metu, priklausomai nuo laiko pavaizduotas 14 paveiksle.



13 pav. Temperatūrų pasiskirstymas talpoje, laikymo metu, priklausomai nuo termoporų padėties ir laiko (sudaryta autoriaus)

Kaip matome iš pateikto grafiko, temperatūros vykstant talpos laikymo procesui palaipsniui krenta. Temperatūrų kritimas yra tendencingas ir pastovus. Ypač 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, po kaitinimo elementu, 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 sieneles. Apskaičiuoti šilumos nuostoliai laikymo proceso metu yra 0,4 kWh.

Procesas stebėtas termovizoriumi, kelios vizualaus temperatūrų pasiskirstymo stebėjimo nuotraukos 13:00 val. (proceso pradžia, t = 0), 14:00 val. (proceso vidurys, t = po 1 val.) ir 15:00 val. (proceso pabaiga, t = po 2 val.) pateiktos 15 paveiksle.



a) b) c)

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

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

3.1.3. Iškrovimo proceso analizė ir sąlygos

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, yra tiekiamas per šalia esantį vėdinimo įrenginio šilumokaitį, šildant į patalpą tiekiamą oro srautą, ir atvėsęs yra gražinamas atgal į akumuliacinės talpos apatinę dalį.

Bandymo metu yra fiksuojama iš talpos paimamo ir grąžinamo vandens temperatūros bei šilumnešio srauto debitas, kuris tiriamuoju laikotarpiu buvo lygus 1700 kg/h. Tada iš akumuliacinės talpos paimtas šilumos kiekis skaičiuojamas pagal formulę:

$$\dot{Q}_{iškrauta} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta t = \frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot (t_{tiekiama} - t_{grįžtama})}{3600} \quad (28)$$

čia:

$\dot{Q}_{iškrauta}$ – šilumos srautas, paimtas iš talpos, kW;

$\dot{m}$ – masinis debitas, kg/h;

Δt – temperatūrų skirtumas tarp paimamos iš talpos ($t_{tiekiama}$) ir grąžinamos į talpą ($t_{grįžtama}$) temperatūrų, K;

c_p – specifinė šiluma, kJ/(kg·K);

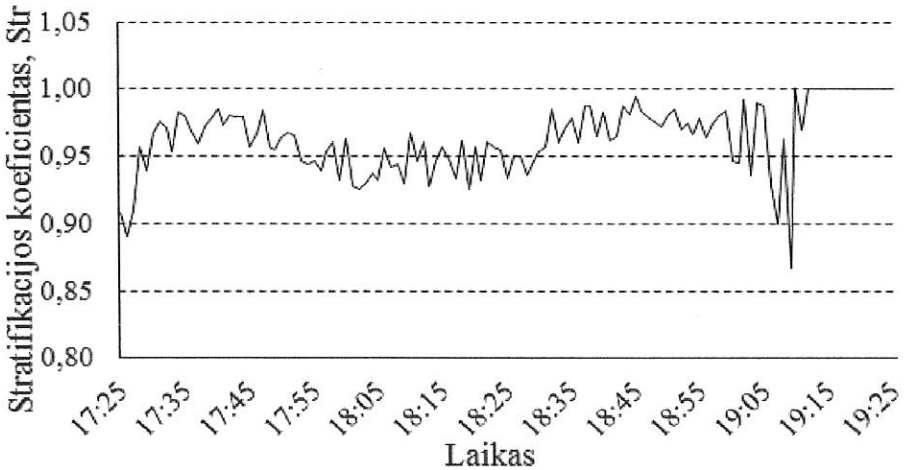
Tada per laiką paimamas šilumos kiekis yra skaičiuojamas kaip suma šilumos srautų kiekvieno laiko tarpu (matuojama kas minutę).

$$Q_{iškrauta} = \frac{\sum \dot{Q}_{iškrauta}}{60} \tag{29}$$

Visas iš talpos paimtas šilumos kiekis yra lygus 29,39 kWh. Tada talpos iškrovimo proceso efektyvumas paskaičiuojamas:

$$\eta_{iškrovimo} = \frac{Q_{iškrauta}}{Q_{talpos,pradžioje}} = \frac{29,39}{29,50} = 99,64\% \tag{30}$$

Kaip ir įkrovimo bei laikymo, taip ir iškrovimo proceso metu be energinio efektyvumo, kitas pasirinktas akumuliacinės talpos vertinimui kriterijus yra stratifikacijos skaičius. Str kitimas laiko atžvilgiu pateikiamas 16 paveiksle.

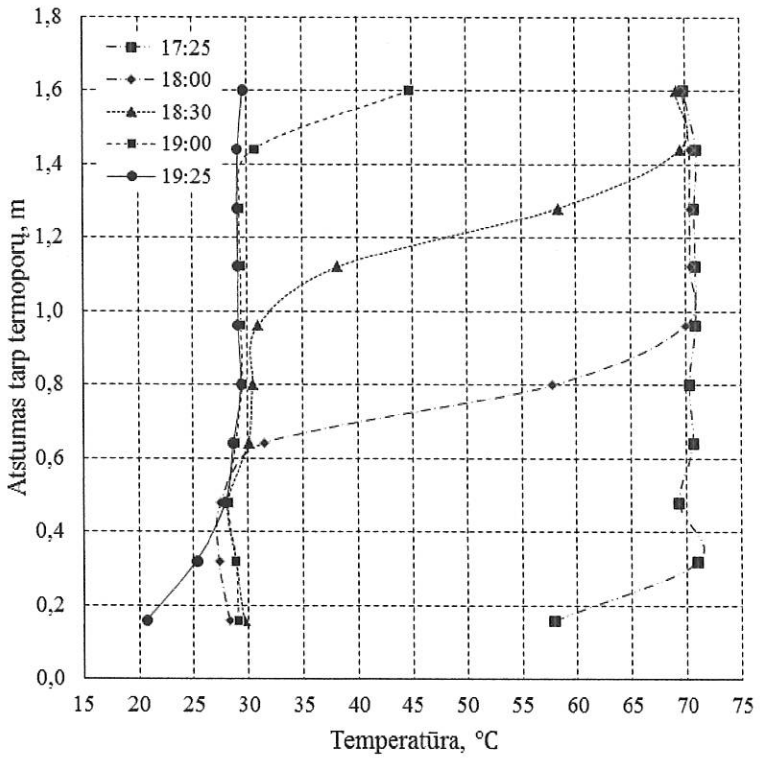


15 pav. Stratifikacijos skaičiaus kitimas iškrovimo proceso metu (sudaryta autoriaus)

Kaip matome iš grafiko, stratifikacijos skaičius iškrovimo metu svyruoja nuo 0,87 iki 1,0. Pačioje proceso pradžioje, kai iškrovimo procesas tik prasideda Str=0,91 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.

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 17 paveiksle.

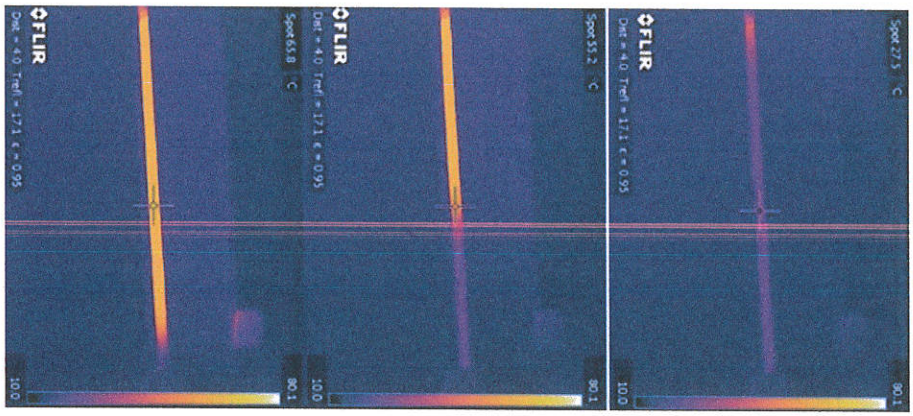


16 pav. Temperatūros pasiskirstymas talpoje, iškrovimo proceso metu (sudaryta autoriaus)

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 65 min. nuo proceso pradžios (18:30 val.) 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 karštąją ir šaltąją akumuliacinės talpos zonas.

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



a) b) c)

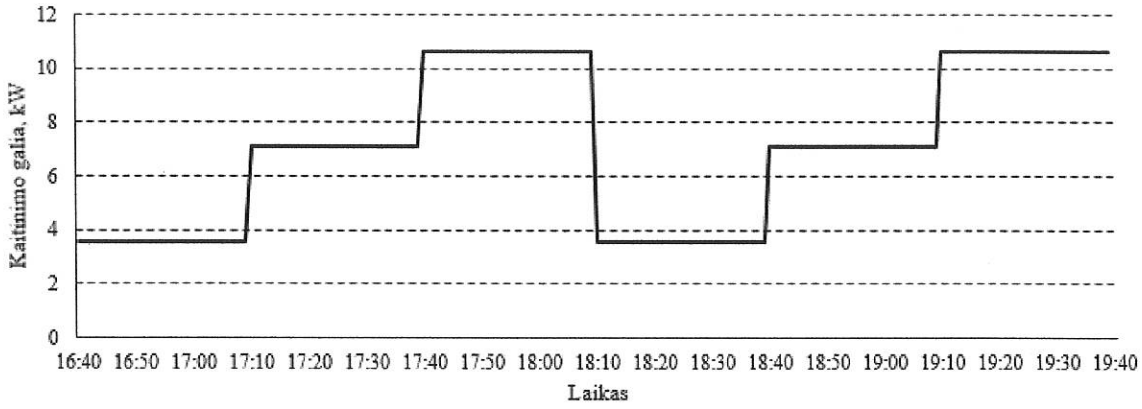
17 pav. Vizualaus vertinimo fragmentai – iškrovimo procesas, a) proceso pradžioje (t=0 val.), b) proceso viduryje (t=1 val.), c) proceso pabaigoje (t=2 val.) (sudaryta autoriaus)

Iš 18 paveiksle pateiktų termovizinių nuotraukų matome, kaip vyksta iškrovimo procesas ir kaip keičiasi temperatūros talpoje. Pirmojoje nuotraukoje (a) matome, kad temperatūrinis režimas po laikymo proceso yra nusistovėjęs, šiek tiek žemesnių parametrų šilumnešis yra talpos apačioje. Prasidėjus iškrovimo procesui nuotrauka (b) 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 nuotrauka (c), kol temperatūros susilygina ir talpa yra iškrauta.

3.1.4. Kintamos galios įkrovimo proceso analizė ir sąlygos

Siekiant imituoti natūralias sąlygas, pvz., akumuliacinės talpos įkrovimas saulės kolektorių šiluma, nagrinėjamas kintamos galios įkrovimas.

Akumuliacinės talpos įkrovimo kintama elektros galia proceso metu šilumos akumuliatorius yra kaitinamas trimis atskirais vienodos galios kaitinimo elementais – turėtas trijų fazių kaitinimo elementas valdikliu yra atskiriamas į tris atskiras dalis, naudojančias po vieną elektros fazę. Tokiu būdu gauti trys vienodos galios elektriniai tenai. Kaitinimo režimas keičiamas kas pusvalandį. Kaitinimo galios priklausomybės nuo laiko grafikas pateiktas 19 paveiksle.



18 pav. Kaitinimo galios priklausomybės nuo laiko grafikas, dinaminis įkrovimo procesas (sudaryta autoriaus)

Proceso pradžioje yra įjungiamas vienas kaitinimo elementas, po to kas pusvalandį atitinkamai yra prijungiami antrasis ir trečiasis. Vėliau šis ciklas pradedamas iš pradžių. Šiame eksperimente buvo ištirti du tokie vienas po kito einantys dinaminiai įkrovimo ciklai. Elektrinio teno perduodamas energijos kiekis nustatytas pagal (15) formulę. Kadangi elektra į kaitinimo elementus yra tiekiama trimis atskiromis fazėmis, atskirai matuoti kiekvienos fazės parametrai: srovės stipris ir įtampa. Bendras talpos įkrovimas (2 ciklai) vyko 3 valandas. Perduotas energijos kiekis skaičiuojamas kaip atskirų fazių suteikto energijos kiekio suma:

$$Q_{el} = 3,54 \cdot 0,5 \cdot 2 + (3,54 + 3,59) \cdot 0,5 \cdot 2 + (3,54 + 3,59 + 3,51) \cdot 0,5 \cdot 2 = 21,31 kWh \text{ ; (31)}$$

Taigi, iš viso buvo perduota 21,31 kWh energijos, kai akumuliacinės talpos vidutinė temperatūra per visą dinaminio įkrovimo procesą metu pakilo nuo 17,14 °C iki 56,94 °C. Energijos kiekis, kurį gavo šilumos talpa skaičiuojama pagal 1 formulę:

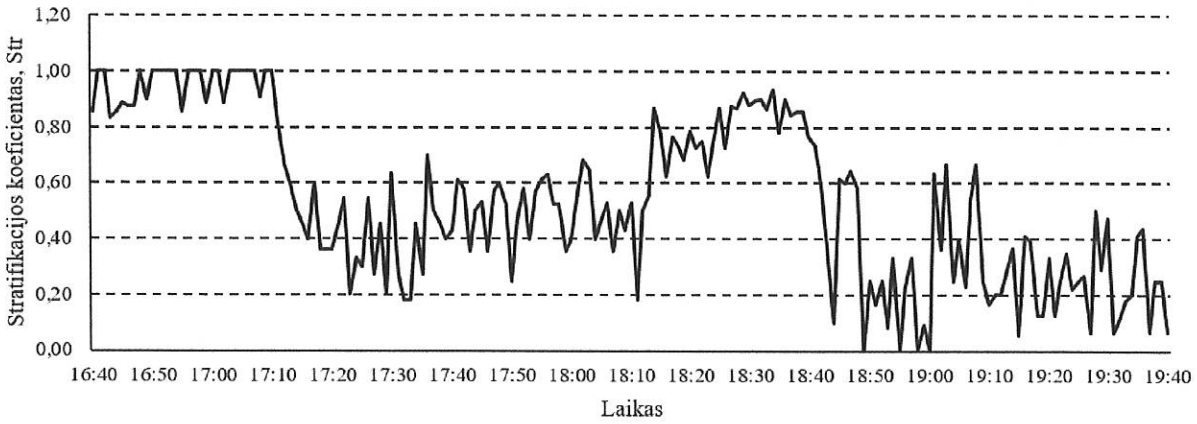
$$Q_{talpos} = \frac{438,95 \cdot 4,2 \cdot (56,86 - 17,14)}{3600} = 20,34 kWh \quad (32)$$

Tada proceso efektyvumas paskaičiuojamas:

$$\eta_{įkrovimo} = \frac{Q_{talpos}}{Q_{el}} = \frac{20,34}{21,31} = 95,44\% \quad (33)$$

Reikia pastebėti, kad toks įkrovimo proceso modifikavimas, palyginus su pradiniu įkrovimo proceso variantu (kai naudojami visi kaitinimo teno elementai – visos fazės vienu metu) pakenkė bendram proceso efektyvumui. Jis sumažėjo 3,31 %.

Dinaminio įkrovimo procesui vertinti taip pat skaičiuojamas stratifikacijos koeficientas. Iš bandymo metu gautų duomenų šis koeficientas paskaičiuotas kiekvienam laiko žingsniui. Stratifikacijos skaičiaus kitimas laiko atžvilgiu pateikiamas 20 paveiksle.

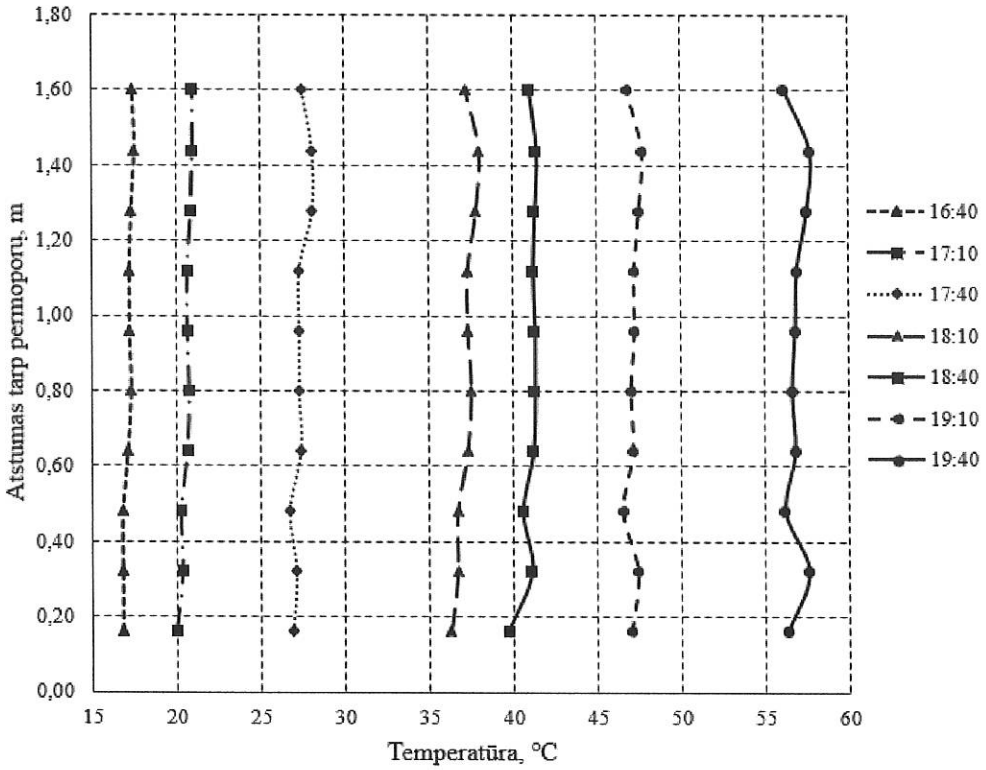


19 pav. Stratifikacijos skaičiaus priklausomybės nuo laiko grafikas, įkrovimo procesas (sudaryta autoriaus)

Kaip matome iš grafiko, stratifikacijos skaičius įkrovimo metu svyruoja nuo 0,0 iki 1,0. Pačioje proceso pradžioje, kai kaitinimas tik prasideda stratifikacijos skaičius yra aukštas, svyruoja nuo 0,8 iki 1,0 tai reiškia, kad akumuliacinė talpa yra susistratifikavusi, temperatūrinis režimas joje yra pakankamai nusistovėjęs. Praėjus 30 min., kai įsijungia antrasis kaitinimo elementas (17:10), stratifikacijos skaičius pradeda staigiai kristi žemyn. Tai rodo prasidėjusį intensyvesnį fluido maišymąsi talpoje, nusistovėjusio režimo sutrikdymą. Dar po 30 min., kai įsijungia trečiasis kaitinimo elementas (17:40) tokio kritimo nepastebime, tačiau stratifikacijos skaičius išlieka mažas, jis svyruoja tarp 0,2 ir 0,6. Tai rodo proceso nestabilumą ir nusistovėjusio proceso nebuvimą. Praėjus visam ciklui, kai t=1,5 h (18:10) antrasis ir trečiasis kaitinimo elementai išsijungia, vėl veikia tik pirmasis šildytuvas. Stratifikacijos skaičius ima didėti, temperatūrinis režimas darosi stabilesnis, tačiau kas pusvalandį įsijungiantys antrasis bei trečiasis elementai vėl sukelia proceso nestabilumus ir fluido maišymąsi talpoje, stratifikacijos skaičius nebepasiekia

maksimalios reikšmės. Vidutinis dinaminio įkrovimo metu esantis stratifikacijos skaičius yra Str=0,54, kai tuo metu, paprastojo įkrovimo proceso bandyme nustatytas vidutinis stratifikacijos skaičius yra Str=0,94. Įkrovimo dinamika sumažino akumuliacinės talpos išsisluoksniavimą per pusę.

Šio eksperimento metu, tomis pačiomis sąlygomis, kaip ir kituose bandymuose fiksuoti termoporų rodmenys skirtingose akumuliacinės talpos vietose. Temperatūrų pasiskirstymas talpoje įkrovimo metu, priklausomai nuo laiko pavaizduotas 21 paveiksle.



20 pav. Temperatūros pasiskirstymas talpoje dinaminio įkrovimo metu priklausomai nuo termoporų padėties ir laiko (sudaryta autoriaus)

Kaip matome iš pateikto grafiko, temperatūros vykstant dinaminiam talpos įkrovimo procesui auga kitaip, nei jau nagrinėtame paprastame talpos įkrovimo procese. Temperatūrų augimas taip pat yra tendencingas ir pastovus, tačiau galime pastebėti įkrovimo ciklus, skirtingos spartos temperatūros augimą. Pastebima, kada veikia vienas, du ar visi trys tenai, kada prasideda naujas ciklas.

Paveiksle 21 vaizduojamas temperatūrų pasiskirstymas kas pusvalandį. Pirmoji iš dešinės (t=0) 16:40 val. užfiksuotų reikšmių kreivė rodo proceso pradžią. Vėliau kas pusvalandį vaizduojami temperatūrų pasikeitimai kaitinant vienu, dvejais ar trimis kaitinimo elementais. Atitinkamai kaitinimo elementų skaičiui matomi skirtingi temperatūriniai šuoliai. Kai kaitinama tik vienu tenu temperatūrų skirtumas yra trigubai mažesnis, nei kaitinant trimis ir atitinkamai dvigubai mažesnis, nei veikiant dviem kaitinimo elementams.

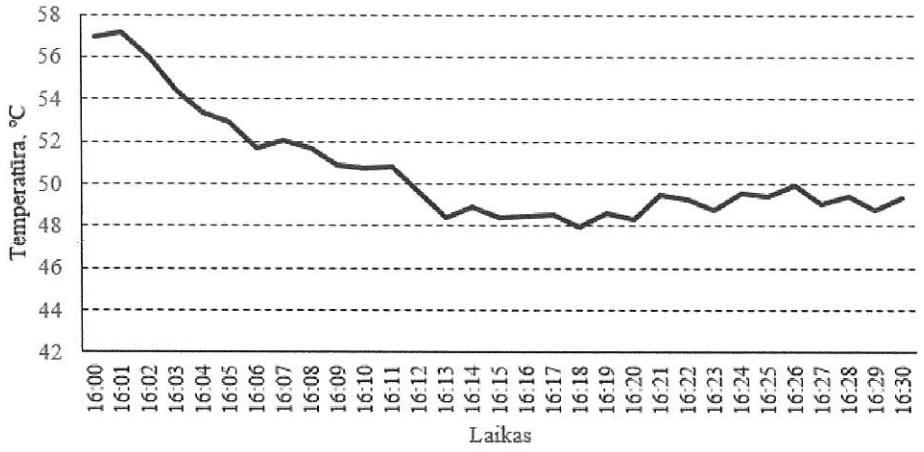
3.1.5. Dinaminio įkrovimo – iškrovimo proceso analizė ir sąlygos

Siekiant imituoti natūralias darbines akumuliacinės talpos sąlygas, pvz., akumuliacinės talpos įkrovimas saulės kolektoriais ir karšto vandens naudojimas vienu metu, nagrinėjamas dinaminis vienalaikis įkrovimo – iškrovimo procesas. Šio proceso metu, akumuliacinė talpa yra šildoma elektriniu kaitinimo elementu ir vienalaikiai vyksta šilumos nuėmimas.

Bandymo metu fiksuojamos iš talpos paimamo ir grąžinamo šilumnešio temperatūros, šilumnešio srauto debitas tiriamuoju laikotarpiu buvo lygus 1600 kg/h, taip pat, kaip ir ankstesniuose eksperimentuose, matuojamos temperatūros atskirose talpos vietose bei vykdoma elektros energijos apskaita.

Nagrinėjamo proceso trukmė yra 30 min. Eksperimento pradžioje talpoje suakumuliuota 17,05 kWh šilumos. Kaitinimo elemento suteiktas energijos kiekis, paskaičiuotas pagal (14) formulę, yra 5,40 kWh. Pagal (21) formulę apskaičiuotas iš akumuliacinės talpos paimtas šilumos kiekis yra 9,21 kWh. Įvertinti ir šilumos nuostoliai į aplinką lygūs 0,05 kWh. Taigi, bendrame balanse talpa prarado 3,86 kWh energijos.

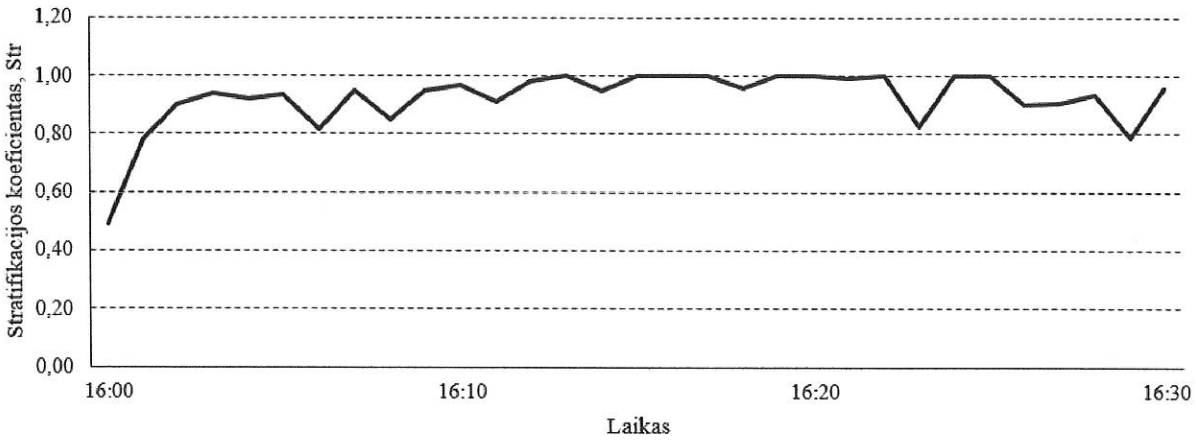
Šio proceso metu vidutinė tiriamosios talpos temperatūra nukrito nuo 56,9 °C iki 49,31 °C. Vidutinės akumuliacinės talpos temperatūros kitimas laiko atžvilgiu pavaizduotas 22 paveiksle.



21 pav. Vidutinės akumuliacinės talpos temperatūros priklausomybė nuo laiko, dinaminis įkrovimo - iškrovimo procesas (sudaryta autoriaus)

Kaip matome iš pateikto grafiko, proceso pradžioje fiksuojamas staigus akumuliacinės talpos vidutinės temperatūros kritimas, vėliau jis stabilizuojasi ir temperatūra yra pakankamai pastovi – svyravimas yra 2°C. Tokį staigų kritimą sąlygoja tai, kad paleidus šilumos nukrovimo kontūrą, jis yra patalpos temperatūros – vamzdyne esantis šilumnešis atvėsęs. Vėliau, vienalaikiai vykstant ir įkrovimui ir nukrovimui procesas stabilizuojasi, temperatūra svyruoja nežymiai.

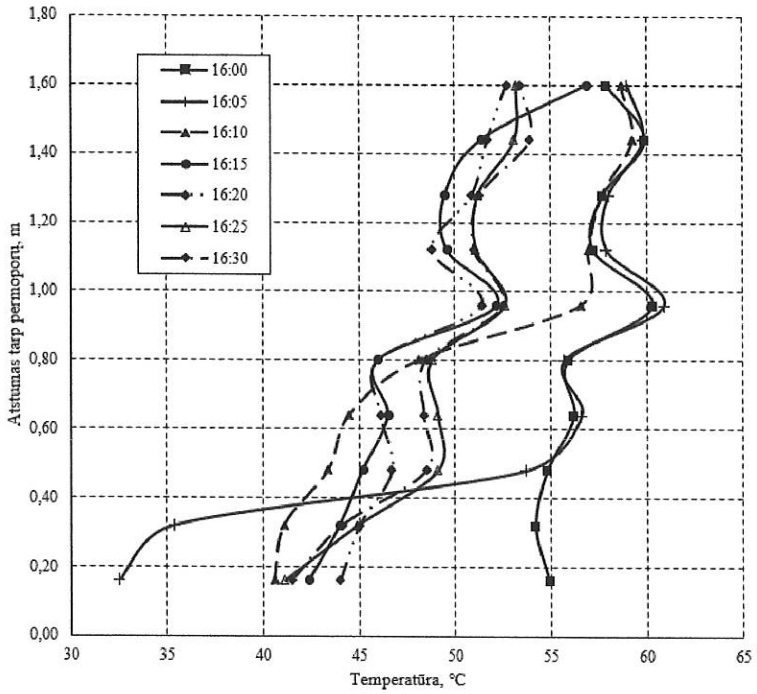
Dinaminio vienalaikio įkrovimo – iškrovimo proceso metu esančiam talpos susisluoksniavimui vertinti taip pat skaičiuojamas stratifikacijos koeficientas. Iš bandymo metu gautų duomenų šis koeficientas paskaičiuotas kiekvienam laiko žingsniui (1 min.). Stratifikacijos skaičiaus kitimas laiko atžvilgiu pateikiamas 23 paveiksle.



22 pav. Stratifikacijos skaičiaus kitimas įkrovimo – iškrovimo procesuose (sudaryta autoriaus)

Kaip matome iš pateikto grafiko, stratifikacijos proceso metu svyruoja nuo 0,49 pačioje dinaminio proceso pradžioje iki 1,0. Pačioje proceso pradžioje, kai šilumos nuėmimas tik prasideda stratifikacijos skaičius krenta žemyn. Po įkrovimo proceso susidariusi stratifikacija yra suardoma, šilumnešis talpoje susimaišo. Kadangi karštas šilumnešis yra paimamas talpos viršuje, o gražinamas į apatinę jos dalį, stratifikacija greitai susiformuoja iš naujo ir tolimesnėje proceso eigoje svyruoja nuo 0,79 iki 1,0 tai reiškia, kad akumuliacinė talpa yra susistratifikavusi, temperatūrinis režimas joje yra pakankamai nusistovėjęs ir stabilus. Vidutinis dinaminio vienalaikio įkrovimo – iškrovimo proceso metu esantis stratifikacijos skaičius yra Str=0,92, kai tuo metu, dinaminio įkrovimo metu vidutinis stratifikacijos skaičius Str=0,54. Lyginant dinaminio įkrovimo – iškrovimo proceso stratifikaciją su paprasto iškrovimo procesu, stratifikacijos skaičius sumažėja tik 4,2 %, stratifikacija ir talpos išsisluoksniavimas išlieka aukštas. Svarbu paminėti, kad būtent tokie tokie – dinaminiai procesai buityje yra dažniau sutinkami, o paruošto šilumnešio užtenka žymiai ilgiau.

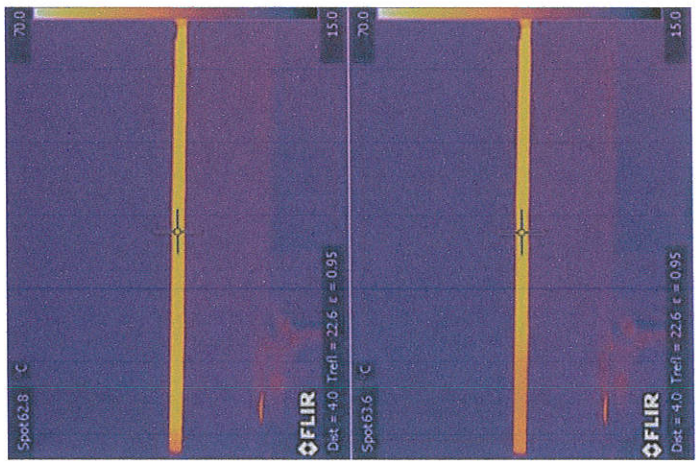
Šio eksperimento metu, tomis pačiomis sąlygomis, kaip ir kituose bandymuose fiksuoti termoporų rodmenys skirtingose akumuliacinės talpos vietose. Temperatūrų pasiskirstymas įkraunant talpą pavaizduotas 24 paveiksle.



23 pav. Temperatūros pasiskirstymas talpoje dinaminio įkrovimo – iškrovimo proceso metu, priklausomai nuo termoporų padėties ir laiko (sudaryta autoriaus)

Pateiktame grafike matome, kad laikui bėgant temperatūros atskiruose talpos sluoksniuose mažėja. Pačioje proceso pradžioje išsiskiria temperatūros talpos apačioje parodymai (16:05 val.) matomas ryškus temperatūrų skirtumas lyginant su kitų sluoksnių temperatūromis. Šis skirtumas yra sąlygotas iškrovimo proceso pradžios. Kaip ir minėta anksčiau iškrovimo kontūras yra atvėsęs, aplinkos temperatūros, todėl pradedant iškrovimą, šio kontūro fluidas patenka į talpą ir ši šalta srovė atvėsina apatinę talpos dalį. Vėliau talpos vidurinėje dalyje formuojasi temperatūrinis laiptas – termoklina. Ji formuojasi todėl, kad karštas vanduo yra paimamas iš talpos viršaus ir gražinamas atvėsęs į apatinę talpos dalį, šie srautai tarpusavyje nesimaišo ir laikui bėgant atskiria temperatūriniu laiptu karštąją ir šaltąją akumuliacinės talpos zonas. Bendras tokio vienalaikio proceso vaizdas ženkliai nesiskiria nuo paprasto iškrovimo proceso (žr. Paveikslas 17, 18:00 val.). Didžiausias ir esminis skirtumas yra tas, kad bendra akumuliacinės talpos temperatūra išlieka aukštesnė visame tūryje, o talpa nėra visiškai iškraunama, temperatūrų skirtumas tarp viršutinės ir apatinės talpos dalies yra mažesnis.

Termovizinės vizualaus vienalaikio dinaminio įkrovimo – iškrovimo proceso stebėjimo nuotraukos atitinkamai 16:00 val., 16:05 val. ir 16:10 val., 16:20 val., 16:30 val. pateikiamos 25, 26 paveiksluose. Nustatytos temperatūrų ribos šiam procesui stebėti termovizoriumi yra nuo 10 °C iki 80,1 °C.

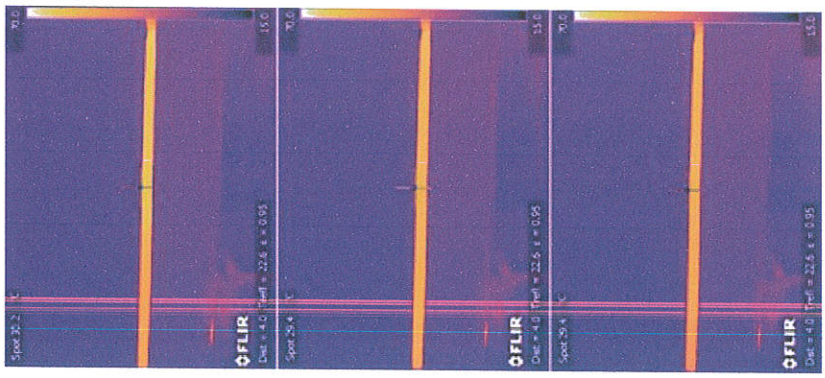


a) b)

24 pav. Vizualaus vertinimo fragmentai įkrovimo – iškrovimo procesas, a) t=0 val., b) t=5 min. (sudaryta autoriaus)

Iš 25 paveiksle pateiktų termovizinių nuotraukų matome, kaip prasideda vienalaikis įkrovimo – iškrovimo procesas ir kaip keičiasi temperatūros talpoje. Pirmojoje nuotraukoje (a)

matome, kad temperatūrinis režimas proceso pradžioje yra nusistovėjęs, šiek tiek žemesnių parametrų šilumnešis yra talpos apačioje. Prasidėjus iškrovimo procesui nuotrauka (b) matome, kaip talpos viduje pasikeičia temperatūrinis režimas, formuojasi stratifikacija, ima ryškėti temperatūrų skirtumas tarp apatinės ir viršutinės talpos dalies.



a) b) c)

25 pav. Vizualaus vertinimo fragmentai įkrovimo – iškrovimo procesas, a) t=10 min., b) t=20 min, c) t=30min. (sudaryta autoriaus)

Iš 26 paveiksle pateiktų termovizinių nuotraukų matome, kaip vyksta vienalaikis įkrovimo – iškrovimo procesas ir kaip keičiasi temperatūrinis režimas talpoje. Pirmojoje nuotraukoje (a) matomas aiškesnis, temperatūrų skirtumas tarp viršutinės ir apatinės akumuliacinės talpos dalies. Įpusėjus procesui nuotrauka (b) matome, kaip talpos viduje pasikeičia temperatūrinis režimas, susiformavęs temperatūrinis laiptas nepastebimas. Paveiksle (c) matoma proceso pabaiga temperatūrinis laiptas tarp viršutinių ir apatinių sluoksniu yra. Talpa susistratifikavusi. Nors perėjimas nėra didelis ir aiškus, jį galima pastebėti. Vizualiai jis nėra taip gerai matomas, kaip paprastame iškrovimo procese, bet čia temperatūrų skirtumas tarp viršutinės ir apatinės termoporos tėra 12 °C, kai tuo metu paprastojo iškrovimo procese – skirtumas yra apie 40 °C.

Tai pagrindžia gautus eksperimento duomenis ir darytą išvadą apie termoklinos susiformavimą iškrovimo proceso metu. Aiškiai matome, kad talpa išlieka stratifikuota, nors temperatūrų skirtumas nėra didelis išlieka aukštesnė vidutinė temperatūra.

3.2. Modeliavimo (skaitinio eksperimento) rezultatų analizė

Baigiamajame darbe atliekamas ir tiriamojo objekto skaitinis eksperimentas – modeliavimas. Pirmasis eksperimentas bus naudojamas sukurto skaitinio modelio validacijai atlikti, t.y. patikrinti, ar gauti modeliavimo rezultatai sutampa su atlikto natūrinio eksperimento matavimo rezultatais. Antrasis skaitinis eksperimentas – dinaminio režimo akumuliacinėje talpoje modeliavimas. Jo metu bus tiriama ir stebima, kas vyksta akumuliacinės talpos viduje, esant dinaminiam veikimo režimui. Skaitinis modeliavimas atliekamas, naudojantis skaičiuojamosios fluidų dinamikos (SFD) modeliavimo programine įranga ANSYS Fluent.

3.2.1. Įkrovimo proceso skaitiniai rezultatai

Akumuliacinės talpos įkrovimo proceso metu procesas modeliuojamas aprašant fluido ir pačios akumuliacinės talpos šilumines savybes bei parenkami skaičiavimo modeliai. Norint patikrinti ir palyginti modeliavimo rezultatus su natūrinio eksperimento rezultatais, modelyje aprašomos pradinės ir kraštinės sąlygos, kurios sutampa su realaus matavimo metu išmatuotomis sąlygomis.

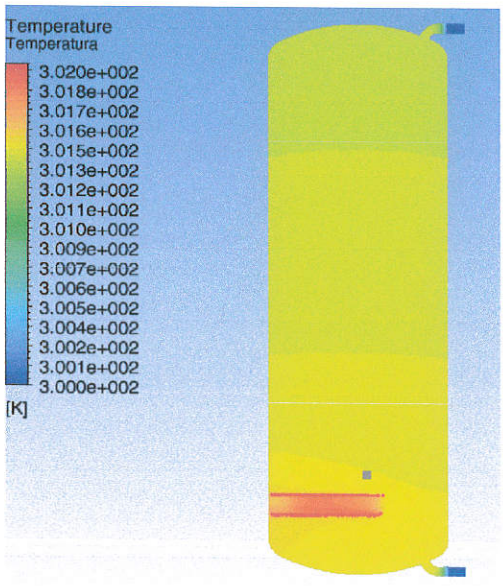
Turbulentiniams procesams talpoje įvertinti pasirinktas skaičiavimo modelis k-ε realizable. Pasirinkta akumuliacinės talpos užpildo medžiaga yra vanduo. Kaitinimo elementas – varinis vamzdis, kuriam kaip vidiniui šilumos šaltiniui priskirtas energijos kiekis yra $2{,}3 \cdot 10^7$ W/m^3.

Norint įvertinti konvekcinius šilumos mainus, iš išorės talpai sukurta izoliacinė medžiaga: 5 cm putų polisterio izoliacija, kurios šilumos perdavimo koeficientas, įvertinant konvekciją, $U = 1{,}42$ W/m^2·K.

Lauko oro temperatūra 296,15 K. Pradinė talpos užpildo temperatūra nustatyta pagal realaus eksperimento rezultatus yra lygi 296, 67 K.

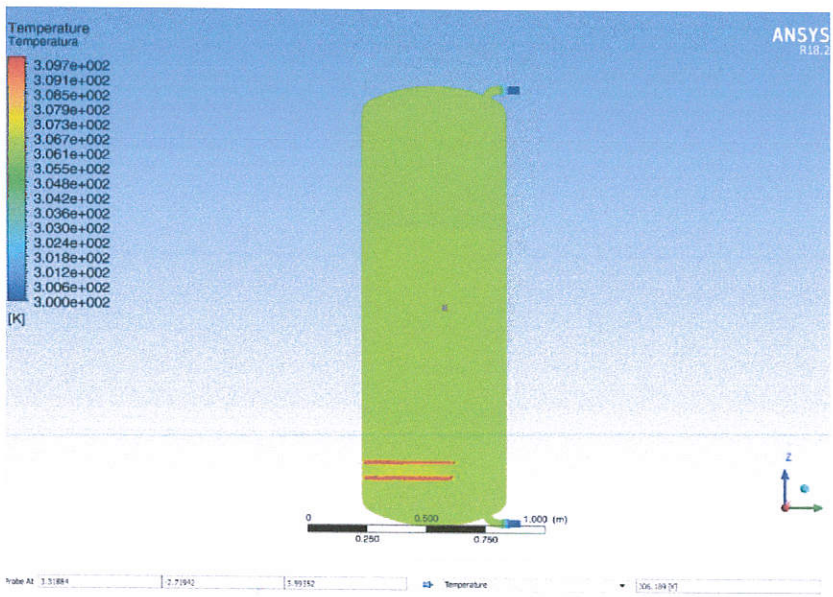
Modeliavimo metu priimtas laiko žingsnis yra 60 s. Modeliuojamo nestacionaraus proceso trukmė 0,5 val. Iteracijų skaičius vienam laiko žingsniui pasirinkta 50.

Gauti temperatūriniai rezultatai pateikiami 27 ir 28 paveiksluose.



26 pav. Akumuliacinės talpos įkrovimo procesas t=15min. (sudaryta autoriaus)

Šiame paveiksle matome, kaip kaitinimo elementu šildomas akumuliacinėje talpoje esantis fluidas dėl natūralių plūdrumo jėgų šildamas kyla į viršų. Talpa sluoksniuojasi.

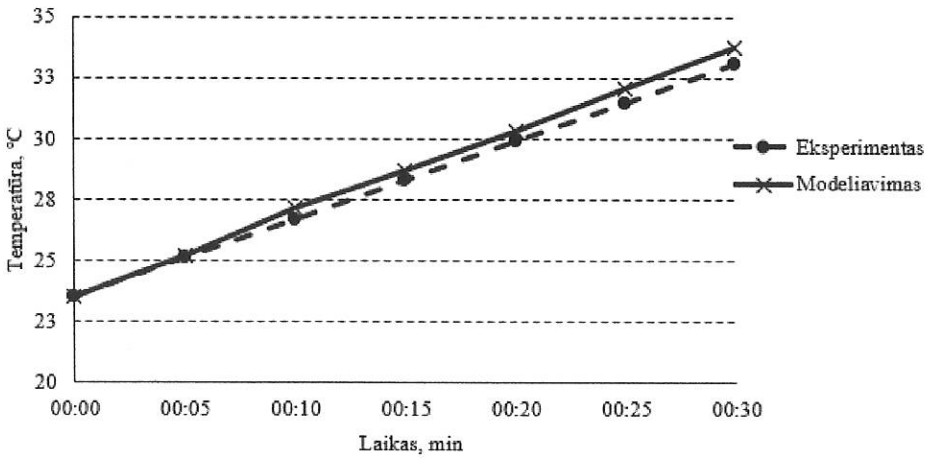


27 pav. Modeliavimo rezultatas t=30min. (sudaryta autoriaus)

28 paveiksle matome, kad visas talpos tūris kaista nuo vidinio šilumos šaltinio. Sumodeliavus procesą, vidutinė talpos temperatūra pakyla iki 306,22 K. Temperatūra kilo ir proceso pabaigoje yra pasiskirsčiusi visame talpos tūryje.

3.2.2. Natūrinio ir skaitinio įkrovimo proceso eksperimentų palyginimas

Lyginant natūrinio ir skaitinio eksperimento įkrovimo proceso rezultatus gauta, kad po 30 min. Natūrinio eksperimento metu gauta vidutinė temperatūra talpoje yra 306,94 K, tuo tarpu skaitinio modelio vidutinė talpos temperatūra skiriasi 0,72 K. Akumuliacinės talpos proceso modeliavimo rezultatai gerai sutapo su eksperimentiniais duomenimis. Kaitinamas talpoje esantis fluidas – vanduo – dėl natūralių plūdrumo jėgų kyla į viršų ir taip šyla visas talpos tūris. Vidutinės akumuliacinės talpos temperatūros kitimas įkrovimo procese, palyginantis eksperimento ir modeliavimo metu gautus rezultatus pateikiamas 29 paveiksle.



28 pav. Natūrinio ir skaitinio eksperimentų palyginimas – vidutinė talpos temperatūra įkrovimo proceso metu (sudaryta autoriaus)

Kaip matome iš grafiko, temperatūros kitimo tendencija yra panaši. Skaitinio eksperimento metu temperatūros kylimas yra šiek tiek spartesnis. Tai galima aiškinti tuo, kad natūrinio eksperimento metu, tiriamasis kūnas nėra visiškai apsaugotas nuo išorės aplinkos poveikio, taip pat yra ir matavimo bei skaičiavimų paklaidos, kurios gali sudaryti tokį nežymų skirtumą, o aprašyti visų fluidą ir talpą veikiančių sąlygų modelyje neįmanoma.

Todėl daroma išvada, kad modeliavimo rezultatai gerai sutampa su eksperimento rezultatais. Temperatūros pasiskirstymas skaitinio modelio rezultatuose yra vienodas visame tūryje, o eksperimento metu temperatūros labiau pasiskirsto talpoje. Tačiau iš esmės proceso eiga ir galutinis rezultatas sutampa, todėl toliau yra modeliuojamas dinaminis procesas.

3.2.3. Dinaminio režimo modeliavimo rezultatai

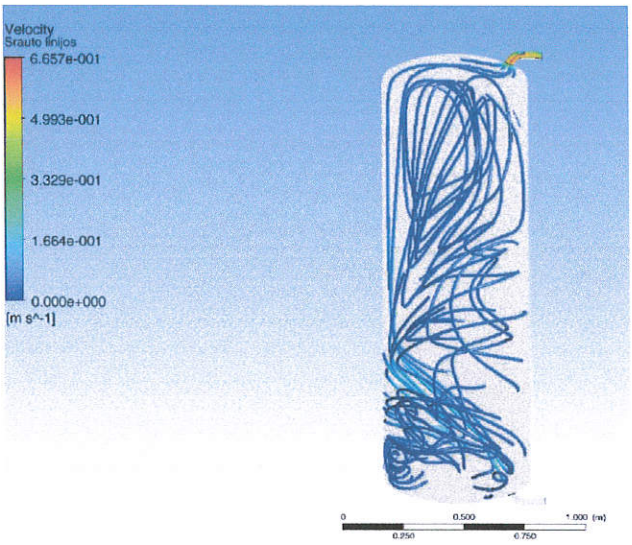
Dinaminis talpos veikimas nagrinėjamas norint labiau įsigilinti ir išsiaiškinti, kas vyksta talpoje, esant ne įprastam jos veikimui, o kai pagrindiniai procesai (įkrovimas, iškrovimas) veikia vienu metu. Būtent toks talpų veikimo režimas šiandienos inžinerinėse sistemose yra sutinkamas dažniau, į pastatus vis labiau integruojant atsinaujinančius energijos šaltinius. Akumuliacinės talpos dinaminio vienalaikio įkrovimo – iškrovimo proceso metu, procesas taip pat kaip ir įkrovimo procesas modeliuojamas aprašant fluido ir pačios akumuliacinės talpos šilumines savybes bei parenkant skaičiavimo modelius.

Šiam nestacionariam procesui modeliuoti, pasirinktas turbulentinis skaičiavimo modelis k-ε standart. Kaip ir įkrovimo proceso modeliavimui, kaip akumuliacinės talpos užpildo medžiaga pasirenkamas vanduo. Kaitinimo elementas – varinis vamzdis, kuriam kaip vidiniui šilumos šaltiniui priskirtas energijos kiekis yra $2{,}26 \cdot 10^7$ W/m^3.

Talpos šilumos nuostoliams įvertinti pasirinkta tokia pati šiluminė izoliacija kaip ir įkrovimo proceso modelyje. Išorės oro temperatūra 293,15 K.

Pradinė talpos vidutinė temperatūra yra 330,05 K. Užduodama grįžtamo iš šilumos nuėmimo kontūro fluido temperatūra yra 303,15 K. Akumuliacinės talpos modelio nukrovimo debitas priimamas kaip vidutinis nukrovimo debitas pagal atliktą eksperimentą ir yra 0,44 kg/s.

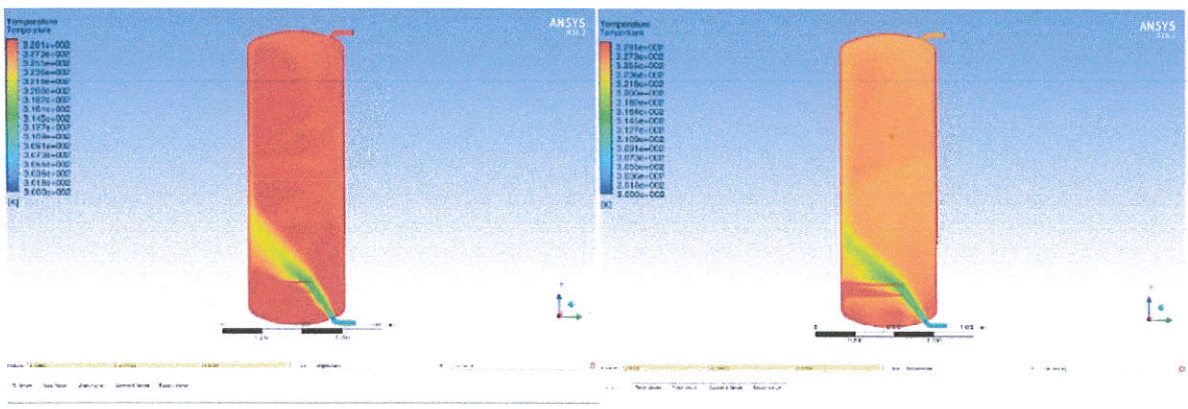
Modeliavimo metu priimtas laiko žingsnis yra 60 s. Analizuojamo proceso trukmė 0,5 val. Iteracijų skaičius vienam laiko žingsniui yra 50. Gauti modeliavimo rezultatai, vizualiai perteikiantys proceso metu vykstantį temperatūros pasiskirstymą ir fluido judėjimą, pateikiami 30 ir 31 paveiksle.



29 pav. Srauto judėjimo linijos akumuliacinėje talpoje t=15min. (sudaryta autoriaus)

Kaip matome iš paveikslo, į talpą patekęs fluidas, dėl įtekėjimo greičio atsimuša į talpos sienelę. Tuomet sukasi bei kyla į viršų ir sukuria sūkurius bei maišymąsi visoje talpoje. Bendras fluido srautas sukasi laikrodžio rodyklės kryptimi – kyla iš viršaus į apačia, sukasi į dešinę pusę ir leidžiasi žemyn. Natūralu, kad kuo įtekančio srauto greitis didesnis, tuo greičiau vyksta šis procesas, jis intensyvesnis, turbulentinis ir sūkuringas srautas ardo stratifikaciją talpoje.

Norint išanalizuoti, kaip vyksta temperatūrinis pasiskirstymas talpoje, 31 paveiksle pateikti modeliavimo rezultatai, nusakantys temperatūrinį režimą tiriamajame objekte. Paveikslas 31 a) atspindi temperatūrinį režimą pačioje proceso pradžioje, kai t=1min., o b) parodo, kaip kinta temperatūra laikui bėgant.

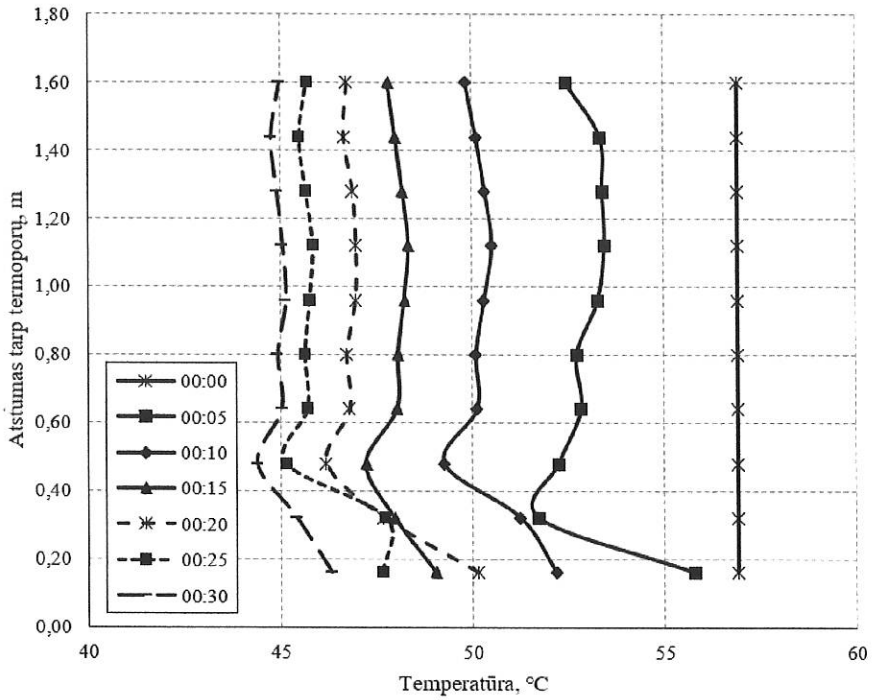


a) b)

30 pav. Temperatūros pasiskirstymas talpoje, a) t=1 min., b) t=5min. (sudaryta autoriaus)

Iš 31 paveikslo matome, kad kaip ir srauto judėjimą nusakančios srauto linijos, taip ir temperatūrinis pjūvis rodo, jog į talpą patekęs šaltesnis fluidas, dėl įtekėjimo greičio atsimušęs į talpos sienelę kyla į viršų ir sukuria sūkurius bei maišymąsi talpoje. Kadangi karštas fluidas paimamas iš talpos viršaus, o atvėsęs gražinamas į apatinę jos dalį, temperatūra talpoje palaipsniui mažėja.

Detalesnis temperatūros kitimas viso proceso metu pateiktas 32 paveiksle. Čia, norint nustatyti, kaip kinta temperatūra visame talpos tūryje, kaip ir natūrinio eksperimento metu, pamatuotos temperatūros 10-yje skirtingų talpos taškų vertikalėje. Temperatūros fiksuotos kas 5 minutes. Bendra modeliuoto proceso trukmė yra 30 minučių.

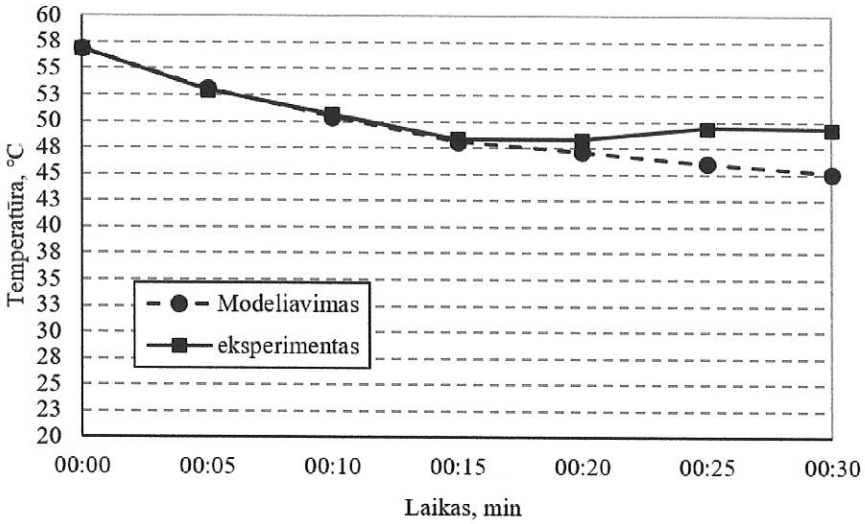


31 pav. Temperatūros kitimas akumuliacinės talpos modelyje, priklausomai nuo proceso laiko (sudaryta autoriaus)

Iš pateikto grafiko matome, kad bendra temperatūros kitimo tendencija išlieka panaši viso proceso metu, akumuliacinės talpos temperatūra mažėja visuose sluoksniuose. Aiškiai matoma vieta, kur šaltas fluidas įteka į talpą, čia temperatūra yra mažesnė. Taip pat pastebėtina, kad įtekėjusi vėsesnio fluido srovė sudaro tarsi barjerą virš kaitinimo elemento, kuris neleidžia karštam fluidui tekėti į viršų, todėl temperatūra akumuliacinės talpos apačioje yra aukštesnė. Skirtingai, nei dinaminio veikimo režimo natūrinio eksperimento metu, stratifikacijos nesimato. To priežastys toliau bus aprašomos sekančiame skyriuje.

3.2.4. Natūrinio ir skaitinio dinaminio proceso eksperimentų palyginimas

Norint patikrinti skaitinio modelio rezultatų tikslumą, atliekamas skaitinio ir natūrinio eksperimento rezultatų palyginimas. Bendrai temperatūros kitimo tendencijos palyginimui skaičiuojama vidutinė akumuliacinės talpos temperatūra kiekvienam modeliuotam laiko žingsniui. Pradinė temperatūra abiejuose bandymuose yra vienoda – 56,90 °C. Natūrinio eksperimento metu gauta vidutinė temperatūra talpoje praėjus tam pačiam laiko tarpui (30 min.) yra 49,31 °C. Iš skaitinio modelių rezultatų gauta temperatūra yra 45,09 °C. Taigi, vidutinės talpos temperatūros sumažėjimas skiriasi 4,22 °C. Vidutinės tiriamojo objekto temperatūros kitimo, priklausomai nuo laiko, grafikas, palyginantis eksperimento ir modeliavimo metu gautus rezultatus pateikiamas 33 paveiksle.



32 pav. Natūrinio ir skaitinio eksperimentų palyginimas – vidutinė talpos temperatūra dinaminio įkrovimo - iškrovimo proceso metu (sudaryta autoriaus)

Kaip matome iš grafiko, temperatūros kitimo tendencija yra panaši. Pirmoje proceso pusėje jis yra visai vienodas, vėliau atsiranda temperatūrų skirtumas. Skaitinio eksperimento metu temperatūros kritimas nuo proceso vidurio tampa intensyvesnis.

Tokius nesutapimus galėjo sąlygoti keli veiksniai. Pirmiausia, natūrinio eksperimento metu iš nukrovimo kontūro grįžtanti temperatūra nėra pastovi viso proceso metu. Kadangi šilumos nuėmimas vyksta per realaus vėdinimo įrenginio oras – vanduo šilumokaitį, o nukrovimo kontūro fluido debitas yra pastovus, grįžtanti į talpą temperatūra nuolat kinta. Tuo tarpu skaitiniam eksperimentui priimama prielaida, kad grįžtama į akumuliacinę talpą temperatūra yra pastovi ir

lygi 30°C. Taip pat, gautiems skirtumams įtakos turi ir tai, kad realaus tiriamojo objekto viduje yra du spiralės formos šilumokaičiai, kurie stabdo tiesioginio srauto patekimą į išėjimą iš talpos ir veikia kaip vietinė kliūtis, paskirstanti įtekėjimo srovę tolygiau ir neleidžianti jai taip maišyti fluido talpoje. Tuo tarpu skaitiniame eksperimente šie šilumokaičiai nėra detalizuojami dėl ribotų skaičiavimo ir kompiuterinių resursų. Norint detalizuoti juos, baigtinių elementų skaičius labai išauga ir apsunkina skaičiavimus, o kadangi šie šilumokaičiai eksperimento metu nenaudojami, nuspręsta jų nedetalizuoti. Būtent todėl realaus eksperimento metu galime matyti susidarančios stratifikacijos reiškinį, o modeliavimo rezultatuose jo nepastebime.

Norint palyginti gautus rezultatus, apskaičiuota skaitinio ir natūrinio eksperimentų vidutinės akumuliacinės talpos temperatūros kitimo santykinė paklaida. Palyginus viso proceso temperatūrų skirtumus gautas nesąryšis yra 2,75 %.

Gautų rezultatų suminis nesąryšis nėra didelis, ir bendras energijos balansas tenkinamas, paklaida 2,75%. Todėl nuspręsta turimą modelį naudoti toliau ir panagrinėti, kaip tokios vertikalios akumuliacinės talpos, be vidinių šilumokaičių, dinaminio veikimo režimas kinta priklausomai nuo iškrovimo debito.

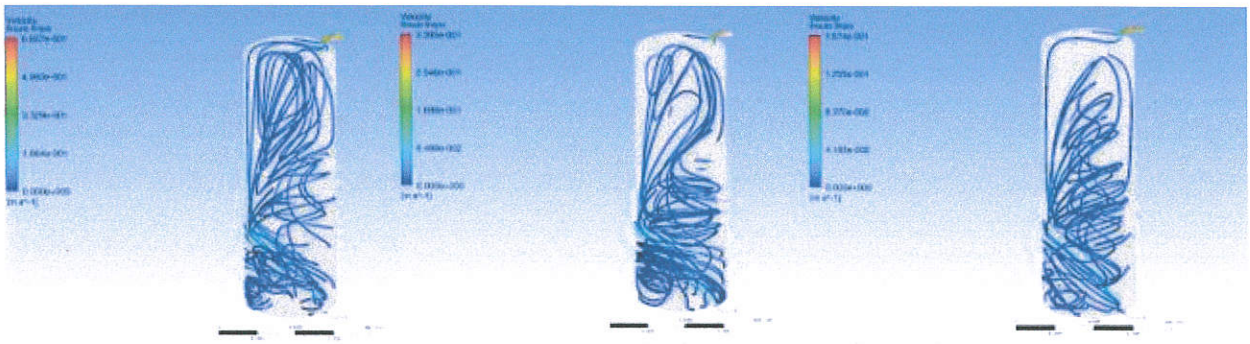
3.2.5. Debito įtakos tyrimas vykstant dinaminiam akumuliacinės talpos veikimui

Siekiant palyginti skirtingo debito įtaką talpos veikimo režimui, kuriami trys atskiri skaičiavimo modeliai su skirtingais įtekėjimo ir ištekėjimo debitais.

Pats skaitinis modelis sudaromas priimant tas pačias prielaidas ir pradines sąlygas kaip ir jau aprašyto dinaminio vienalaikio įkrovimo – iškrovimo modelio. Pasirinktas tas pats baigtinio elementų tinklelio tipas, elementų skaičius, jo sutankinimo vietos. Taip pat sprendimo tipas – k-ε turbulentinis skaičiavimo modelis. Tačiau priimti skirtingi debitai.

Pradinė talpos vidutinė temperatūra yra 330,05 K. Užduodama grįžtamo iš šilumos nuėmimo kontūro fluido temperatūra yra 303,15 K. Nagrinėjami ir analizuojami trys skirtingi variantai. Pirmasis – kai iškrovimo kontūro debitas yra jau nagrinėtasis 0,44 kg/s, antrasis – 0,22 kg/s ir trečiasis – 0,11 kg/s. Laiko žingsnis yra 60 s. Analizuojamo proceso trukmė 0,5 val. Iteracijų skaičius vienam laiko žingsniui yra 50.

Gauti modeliavimo rezultatai, vizualiai perteikiantys proceso metu vykstančias judėjimo tendencijas kiekviename iš atvejų, pateikiami 34 paveiksle.



33 pav. Srauto judėjimas skirtinguose modeliuose, t=15 min. a) q=0,44 kg/s, b) q=0,22 kg/s, c) q=0,11 kg/s (sudaryta autoriaus)

Kaip matome iš paveikslo, kiekvienu atveju į talpą patekęs fluidas, dėl įtekėjimo greičio atsimuša į talpos sienelę. Tuomet, priklausomai nuo įtekėjimo debito, o kartu ir greičio sukasi bei kyla į viršų arba apačią ir sukuria sūkurius bei maišymąsi visoje talpoje.

Pirmuoju variantu a) pagrindinis fluido srautas sukasi laikrodžio rodyklės kryptimi — kyla iš viršaus į apačia, sukasi į dešinę pusę ir leidžiasi žemyn. Kita, mažesnė srauto dalis susidūrusi su talpos sienele leidžiasi žemyn ir sukasi po kaitinimo elementu.

Antruoju variantu b) didesni srauto judėjimai pastebimi talpos viduryje. Kaip ir pirmuoju variantu dalis srauto kyla į viršų, dalis leidžiasi žemyn, tačiau čia didžiausias maišymasis pastebimas talpos apatinėje ir vidurinėje dalyse.

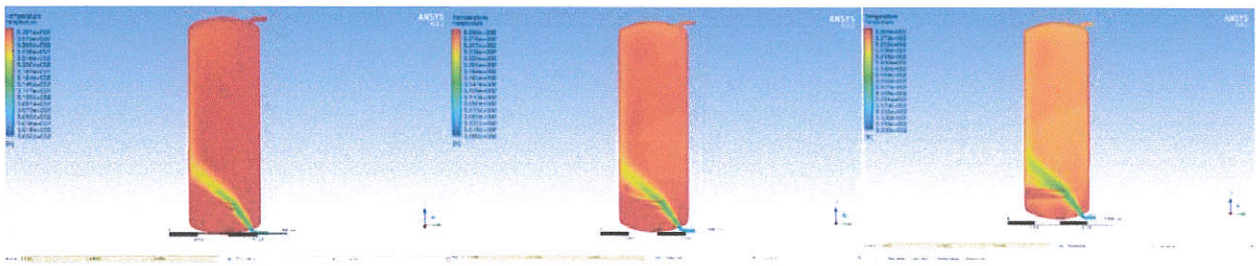
Trečiasis variantas c) dar pakeičia srauto judėjimo trajektoriją. Įtekėjęs mažesniu greičiu pagrindinis srautas juda nebe taip staiga ir koncentruojasi vidurinėje talpos dalyje. Kaip ir pirmuoju variantu dalis srauto kyla į viršų, dalis leidžiasi žemyn, tačiau po kaitinimo elementu pastebimas mažesnis judėjimas, nei variante b), susidarę sūkuriai yra labiau vienodi visame tūryje, yra platesni, judėjimo greitis mažesnis.

Taigi, mažėjant įtekančio srauto debitui, o kartu ir įtekėjimo greičiui, pastebimi fluido judėjimo talpoje skirtumai. Kuo didesnis įtekėjimo greitis, tuo susidarę sūkuriai yra didesni ir apima visą talpos tūrį, kuris tarsi visas sukasi ratu srauto judėjimo kryptimi. Mažėjant debitui,

mažėja ir sūkuriai, srautas juda ta pačia kryptimi, tačiau labiau pasiskirsto ir į apatinę jos dalį, sūkuriai tampa nuožulnesni ir labiau ima suktis apie akumuliacinės talpos vertikalę. Kai įtekėjimo debitas yra mažiausias, bendra srauto judėjimo ratu tendencija išlieka, tačiau sumažėja sūkurių apatinėje dalyje, po kaitinimo elementu, srautas patenka virš kaitinimo elemento, o jo sukeliami sūkuriai sunkiau išjudina zoną po tenu, judėjimas talpoje yra mažesnis, didžiausi sūkuriai pastebimi vidurinėje jos dalyje.

Norint išanalizuoti, kaip vyksta temperatūrinis pasiskirstymas talpoje, 35, 36, 37 paveiksle pateikti modeliavimo rezultatai, nusakantys temperatūrinį režimą visuose modeliuose skirtingais laiko momentais: proceso pradžioje, kai t=5 min, viduryje, kai t=15 min ir pabaigoje, kai t=30min.

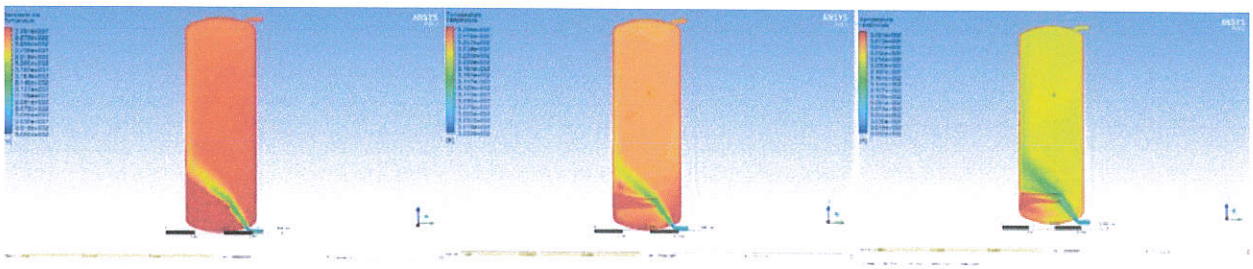
Pačioje pradžioje visi modeliai atrodo vienodai, skiriasi tik įtekėjimo srovės dydis. Šis ir kiti laiko momentai, nedetalizuoti ir pateikiami priede 1.



a) b) c)

34 pav. Temperatūros pasiskirstymas talpoje, kai t=5min. a) q=0,11 kg/s, b) q=0,22 kg/s, c) q=0,44 kg/s (sudaryta autoriaus)

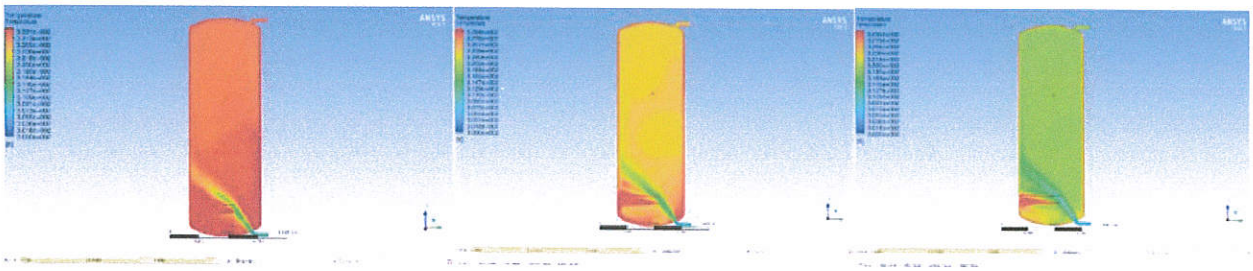
Iš 35 paveikslo matome, kad kaip ir srauto judėjimą nusakančios srauto linijos, taip ir temperatūrinis pjūvis rodo, jog į talpą patekęs šaltesnis fluidas, dėl įtekėjimo greičio atsimušęs į talpos sienelę kyla į viršų ir sukuria sūkurius bei maišymąsi talpoje. Kadangi karštas fluidas paimamas iš talpos viršaus, o atvėsęs gražinamas į apatinę jos dalį, temperatūra talpoje palaipsniui mažėja. Kuo didesnis įtekėjimo debitas, tuo sūkuriai aiškiau matosi ir temperatūros mažėjimas greitesnis.



a) b) c)

35 pav. Temperatūros pasiskirstymas talpoje, kai t=15min. a) q=0,11 kg/s, b) q=0,22 kg/s, c) q=0,44 kg/s(sudaryta autoriaus)

Proceso viduryje matome išryškėjusius skirtumus tarp skirtingų modelių. Paveiksle a) matomas nedidelis sūkurių susidarymas, o apatinė zona yra atskirta šalta srove, fluido srauto sukeliami sūkuriai ne išjudina, o blokuoja nuo kaitinimo elemento šylančio fluido tekėjimą į talpos viršutinę dalį. Tokia situacija buvo pastebėta ir srauto judėjimo paveiksle 34. Vidutinė talpos temperatūra visuose modeliuose mažėja, kuo didesnis nukrovimo debitas, tuo mažesnė likusi vidutinė talpos temperatūra.



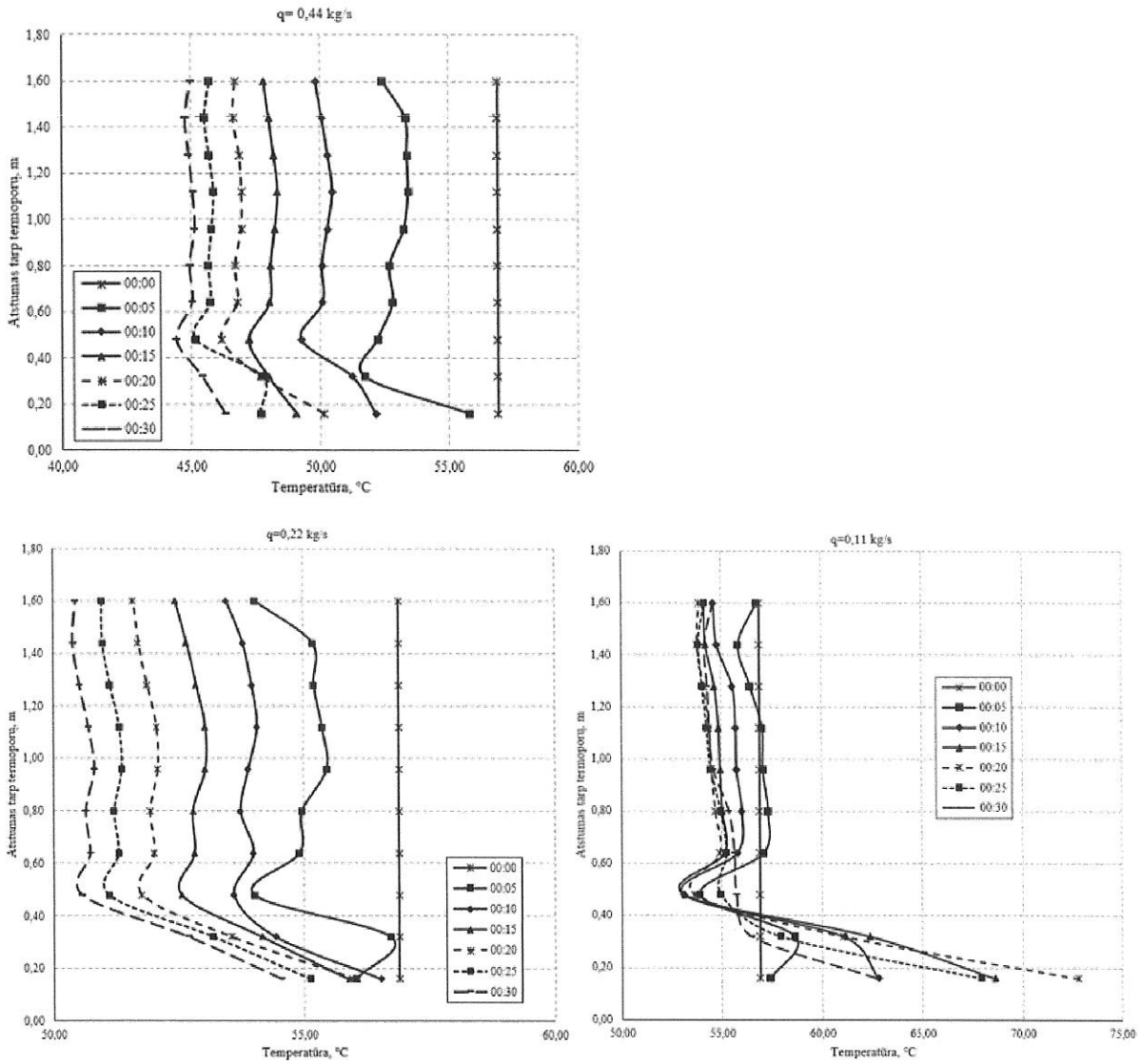
a) b) c)

36 pav. Temperatūros pasiskirstymas talpoje, kai t=30min. a) q=0,11 kg/s, b) q=0,22 kg/s, c) q=0,44 kg/s (sudaryta autoriaus)

Proceso pabaigoje matome, kad talpa c), kurios nukrovimo debitas yra didžiausias yra daugiausiai nukrauta, b) – mažiau, o a) – mažiausiai. Rezultatai patvirtina nustatytus srauto judėjimo tendencingumus. Paveiksle a) matoma karštoji zona, kai dėl per mažo srauto greičio blokuojamas nuo kaitinimo elemento šylančio fluido tekėjimas aukštyn.

Detalesnis temperatūros kitimas visų proceso metu pateiktas 38 paveiksle. Čia, norint nustatyti, kaip kinta temperatūra visame talpos tūryje, kaip ir natūrinio eksperimento metu,

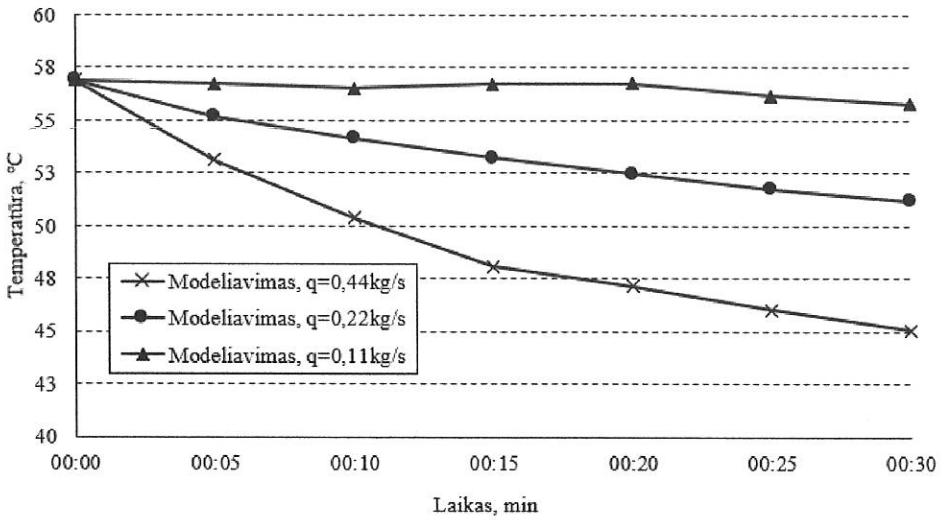
pamatuotos temperatūros 10-yje skirtingų talpos taškų vertikalėje. Temperatūros fiksuotos kas 5 minutes.



37 pav. Temperatūros kitimas akumuliacinės talpos modeliuose, priklausomai nuo proceso laiko (sudaryta autoriaus)

Iš pateiktų grafikų matome, kad bendra temperatūros kitimo tendencija išlieka panaši visų procesų metu, akumuliacinės talpos temperatūra mažėja visuose sluoksniuose. Išsiskiria tik trečiasis modelis, kai debitas yra 0,11 kg/s. Čia apatinės zonos temperatūrų atotrūkis yra labai ryškus, dar kartą patvirtinta, kad įtekantis fluidas ne išjudina, o atvirkščiai – blokuoja nuo kaitinimo elemento kylantį karštesnį fluidą ir stumia jį žemyn. Kiekvienu atveju aiškiai matoma vieta, kur šaltas fluidas įteka į talpą, čia temperatūra yra mažesnė. Stratifikacija nepastebima.

Visų trijų modelių palyginimui 39 paveiksle pateikiamas vidutinių akumuliacinės talpos temperatūrų kitimas, priklausomai nuo laiko.



38 pav. Skaitinių eksperimentų palyginimas. Vidutinė talpos temperatūra dinaminio įkrovimo - iškrovimo proceso metu, esant skirtingiems debitams (sudaryta autoriaus)

Iš šio grafiko matome, kaip kinta vidutinės akumuliacinės talpos temperatūros kiekviename iš modelių. Kuo didesnis nukrovimo debitas, tuo temperatūros sumažėjimas yra atitinkamai didesnis. Iš gautų rezultatų kreivių galime spręsti ir planuoti, kokiam laiko tarpui užteks talpoje suakumuliuotos energijos kiekio, priklausomai nuo jos iškrovimo debito.

Išanalizavus visų skaitinių modelių rezultatus: srautų judėjimus talpoje, temperatūrinio režimo kitimą, vidutinės temperatūros elgseną, galima teigti, kad akumuliacinės talpos dinaminiam įkrovimo – iškrovimo režimui nukrovimo debitas turi didelę įtaką. Nuo jo priklauso srautų judėjimas talpoje, sūkurių ir srovių susidarymas. Kuo įtekančio ir ištekančio fluido debitas didesnis, tuo talpos viduje esantis vanduo daugiau susimaišęs. Pastebėta, kad kai ties įtekėjimo ar ištekėjimo atvamzdžiais nėra jokių kreipiančiųjų menčių ar vietinių kliūčių, stratifikacijos reiškinio nematome, vadinasi, talpoje esantis fluidas maišosi ir energijos akumuliatorius neišnaudoja viso potencialo. Todėl tokį modelį reikia tobulinti, numatyti kreipiančiąsias, vietines kliūtis ar įtekančio fluido difuzorių, kad įtekantis srautas patektų į talpos apačia kuo labiau išsklaidytas, kuo žemiau ir žemiau vidinio šilumos šaltinio. Tada akumuliacinės talpos temperatūrinis režimas bus stabilesnis, srautas taip nesimaišys ir nesuardys stratifikacijos.

IŠVADOS/REKOMENDACIJOS

Atlikta literatūros apžvalga akumuliacinių talpų tyrimo tematika atskleidė, kad norint vertinti tokių objektų veikimą turi būti aiškiai pasirinkti vertinimo kriterijai, nusakantys stratifikaciją, fluido pasiskirstymą talpoje ir efektyvumą. Atsižvelgiant į galimus įvairius talpos veikimo vertinimo kriterijus, analizei pasirinktas stratifikacijos skaičius (Str). Apžvelgti užsienio ir Lietuvos autorių darbai parodė, kad skaitinio modeliavimo metu svarbu teisingai apsirašyti pradines ir kraštines sąlygas, aprašyti fizikines talpos ir jos fluido medžiagų savybes, talpos geometriją, atsakingai sudaryti diskretųjį tinklą. Pastarąjį svarbu sutankinti prie charakteringų talpos vietų: talpos įkrovimo, iškrovimo atvamzdžių, sienelių, šilumokaičių, kaitinimo elementų. Tai lemia modeliavimo rezultatų tikslumą.

Naudojant autoriaus sukonstruotą daugiataškį temperatūros matavimo prietaisą, eksperimentiniai tyrimai su 470 l vertikalia akumuliacine talpa leido nustatyti statinių ir dinaminių procesų efektyvumo vertes, Str kitimą esant įprastiniam jos veikimui:

- Įkrovimo proceso metu akumuliacinės talpos efektyvumas siekia 98,75 %, visas jos tūris šyla tolygiai. Str skaičius svyruoja nuo 0,7 iki 1,0 vidutinis Str=0,94.
- Laikymo proceso metu akumuliacinės talpos efektyvumas siekia 98,47 %, pastebimas nežymus temperatūrų mažėjimas dėl šilumos nuostolių į aplinką, talpa „išsisluoksniuoja“, Str skaičius kinta nuo 0,98 iki 1,0 vidutinis Str artimas 1,0. Šio proceso metu stratifikacija yra geriausia.
- Iškrovimo proceso metu akumuliacinės talpos efektyvumas siekia 99,64 %, termoklina juda vertikaliai aukštyn. Str skaičius svyruoja nuo 0,87 iki 1,0 vidutinis Str=0,96.
- Dinaminio įkrovimo proceso metu, kai talpa šildoma periodiškai kintama galia, veikimo efektyvumas siekia 95,44 %, lyginant su paprasto įkrovimo procesu jis sumažėjo 3,31 %. Vidutinis proceso stratifikacijos skaičius Str=0,54, todėl lyginant su paprasto įkrovimo procesu jis sumažėjo dvigubai. Įkrovimo dinamika sumažino akumuliacinės talpos išsisluoksniavimą ir efektyvumą, sukėlė netvarkingą fluido maišymąsi talpoje.
- Vidutinis vienalaikio dinaminio įkrovimo – iškrovimo proceso metu esantis Str skaičius sudaro 0,92, kai tuo metu dinaminio įkrovimo metu vidutinis Str=0,54. Lyginant dinaminio įkrovimo – iškrovimo proceso stratifikaciją su paprasto iškrovimo procesu stratifikacijos skaičius sumažėja tik 4,2 %, stratifikacija, talpos išsisluoksniavimas išlieka

aukštas. Tačiau tokie dinaminiai procesai buityje yra dažniau sutinkami, o paruošto šilumnešio užtenka žymiai ilgiau, todėl būtina ir toliau nagrinėti tokius veikimo režimus.

Padarytos atskirų procesų termovizinės nuotraukos leido pagrįsti eksperimento metu gautų rezultatų teisingumą ir padėjo vizualiai vertinti temperatūrinį režimą talpoje bei termoklinos judėjimą.

Naudojant ANSYS Fluent skaičiuojamosios fluidų dinamikos paketą, sudarytas ir validuotas akumuliacinės talpos veikimo modelis. Gautų rezultatų suminis nesąryšis atsiradęs dėl modelio geometrijos supaprastinimo nėra didelis, ir bendras energijos balansas tenkinamas, paklaida 2,75 %. Šis modelis gali būti taikomas vertikalių akumuliacinių talpų, be vidinių šilumokaičių, įvairiems dinaminių veikimo režimų tyrimams.

Gauti rezultatai parodė, kad priklausomai nuo talpos iškrovimo debito, temperatūrinis režimas ir srautų judėjimas talpoje smarkiai keičiasi. Kuo didesnis debitas, tuo greičiau talpa iškraunama, o jos temperatūrinis režimas labiau sutrikdytas – fluidas susimaišęs. Gauti modeliavimo rezultatai parodė, jog norint efektyviai naudoti vertikalias ritinio formos akumuliacines talpas, būtina atsižvelgti į konstrukcines priemones, siekiant sumažinti įtekančio srauto įtaką bendram talpos veikimo režimui. Tai leistų pasiekti stabilesnį temperatūrinį režimą talpoje ir ji bus geriau stratifikuota.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

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 .

Baeten B., Confrey T., Pecceu S., Rogiers F., Helsen L. 2016. A validated model for mixing and buoyancy in stratified hot water storage tanks for use in building energy simulations, *Applied Energy* 172: 217–229. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.03.118 .

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 .

Castell A., Medrano M., Solé C., Cabeza L.F. 2010. Dimensionless numbers used to characterize stratification in water tanks for discharging at low flow rates, *Renewable Energy* 35(10): 2192–2199. DOI: 10.1016/j.renene.2010.03.020 .

Dincer I., Rosen M.A. 2013. *Exergy Analysis of Thermal Energy Storage Systems*. DOI: 10.1016/B978-0-08-097089-9.00009-7 .

Fan J., Furbo S., Yue H. 2015. Development of a Hot Water Tank Simulation Program with Improved Prediction of Thermal Stratification in the Tank, *Energy Procedia* 70: 193–202. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.02.115 .

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 .

González I., Pérez-Segarra C.D., Lehmkuhl O., Torras S., Oliva A. 2016. Thermo-mechanical parametric analysis of packed-bed thermocline energy storage tanks, *Applied Energy* 179: 1106–1122. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.06.124 .

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 .

Hasnain S.M. 1998. Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques, *Energy Conversion and Management* 39(11): 1127–1138. DOI: 10.1016/S0196-8904(98)00025-9 .

Ievers S., Lin W. 2009. Numerical simulation of three-dimensional flow dynamics in a hot water storage tank, *Applied Energy* 86(12): 2604–2614. DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.04.010 .

Ismail K.A.R., Leal J.F.B., Zanardi M.A. 1997. Models Of Liquid Storage Tanks, *Energy* 22(8): 805–815.

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 .

Li G. 2016. Sensible heat thermal storage energy and exergy performance evaluations, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 53: 897–923. DOI: 10.1016/j.rser.2015.09.006 .

Moncho-Esteve I.J., Gasque M., González-Altozano P., Palau-Salvador G. 2017. Simple inlet devices and their influence on thermal stratification in a hot water storage tank, *Energy and Buildings* 150: 625–638. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.06.012 .

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 .

Njoku H.O., Ekechukwu O. V., Onyegegbu S.O. 2016. Comparison of energy, exergy and entropy generation-based criteria for evaluating stratified thermal store performances, *Energy and Buildings* 124: 141–152. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.04.062 .

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 .

Shin M.-S., Kim H.-S., Jang D.-S., Lee S.-N., Lee Y.-S., Yoon H.-G. 2004. Numerical and experimental study on the design of a stratified thermal storage system, *Applied Thermal Engineering* 24(1): 17–27. DOI: 10.1016/S1359-4311(03)00242-4 .

Streckienė G. 2011a. *Kogeneracin ė s j ė gain ė s šilumos akumuliacin ė s talpos veikimo režim ų tyrimai.*

Streckienė G. 2011b. *Kogeneracinės jėgainės šilumos akumuliacinės talpos veikimo režimų tyrimai.*

Tatsidjodoung P., Le Pierrès N., Luo L. 2013. A review of potential materials for thermal energy storage in building applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 18: 327–349. DOI: 10.1016/j.rser.2012.10.025 .

Torío H., Angelotti A., Schmidt D. 2009. Exergy analysis of renewable energy-based climatisation systems for buildings: A critical view, *Energy and Buildings* 41(3): 248–271. DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.10.006 .

V.Martinaitis 2007. *Termodinaminė analizė*, Vilnius: Technika.

Wang Z., Zhang H., Dou B., Huang H., Wu W., Wang Z. 2017. Experimental and numerical research of thermal stratification with a novel inlet in a dynamic hot water storage tank, *Renewable Energy* 111: 353–371. DOI: 10.1016/j.renene.2017.04.007 .

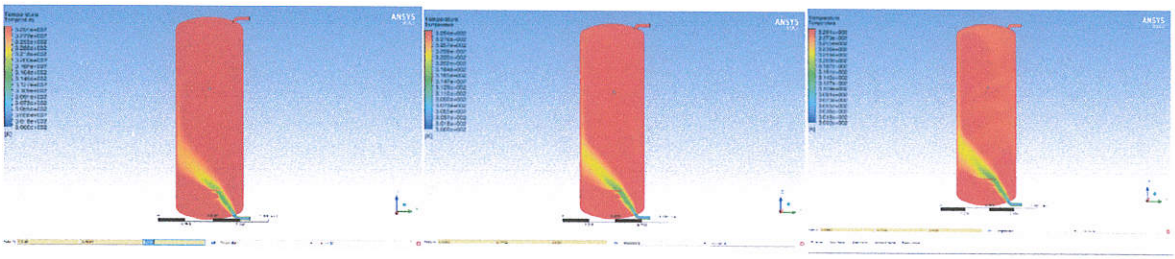
Wang Z., Zhang H., Dou B., Huang H., Zhang G. 2017. The thermal stratification characteristics affected by a novel equalizer in a dynamic hot water storage tank, *Applied Thermal Engineering* 126: 1006–1016. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.06.045 .

Yaïci W., Ghorab M., Entchev E., Hayden S. 2013. Three-dimensional unsteady CFD simulations of a thermal storage tank performance for optimum design, *Applied Thermal Engineering* 60(1–2): 152–163. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.07.001 .

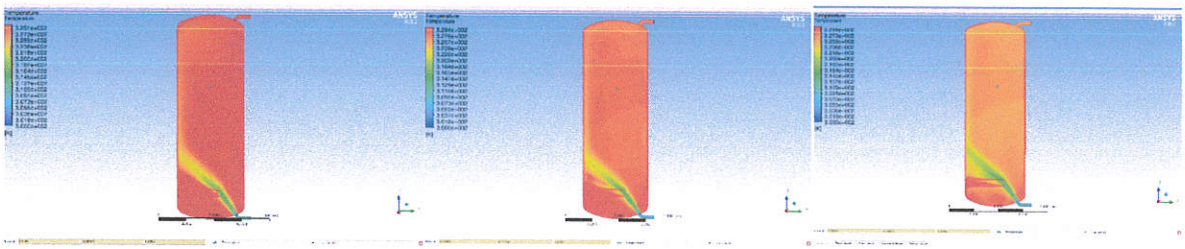
Yang Z., Chen H., Wang L., Sheng Y., Wang Y. 2016. Comparative study of the influences of different water tank shapes on thermal energy storage capacity and thermal stratification,

Renewable Energy 85: 31–44. DOI: 10.1016/j.renene.2015.06.016 .

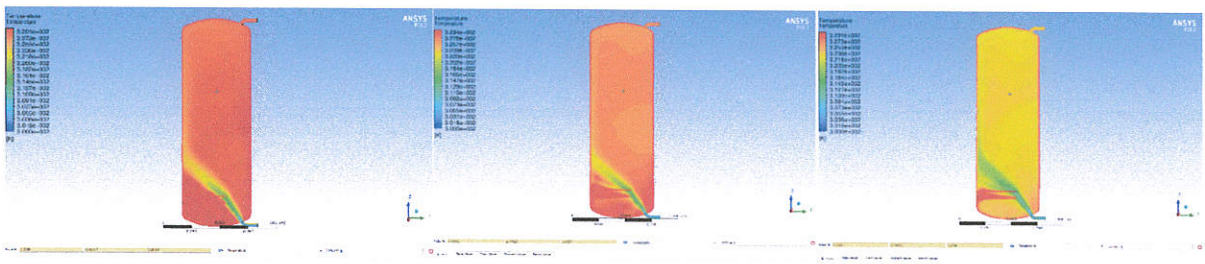
Priedas nr.1 Skirtingų CFD modelių rezultatų palyginimas.



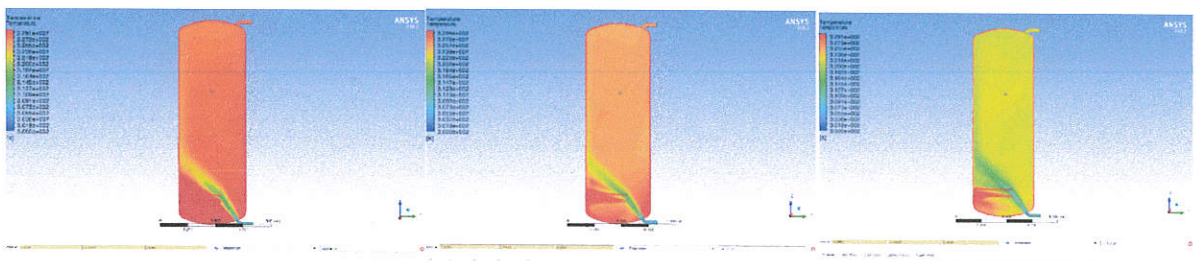
T=1 min., q=0,22 kg/s T=1 min., q=0,22 kg/s T=1 min., q=0.44kg/s



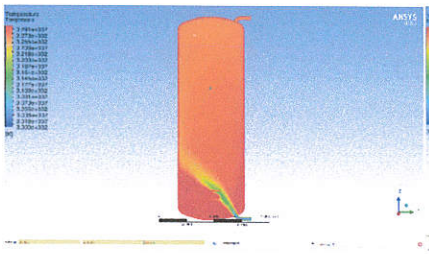
T=5 min., q=0,22 kg/s T=5 min., q=0,22 kg/s T=5 min., q=0.44kg/s



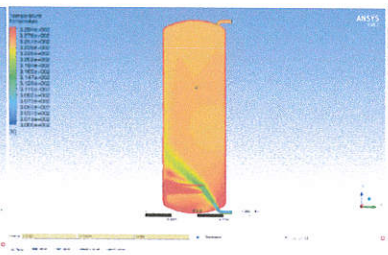
T=10 min., q=0,22 kg/s T=10 min., q=0,22 kg/s T=10 min., q=0.44kg/s



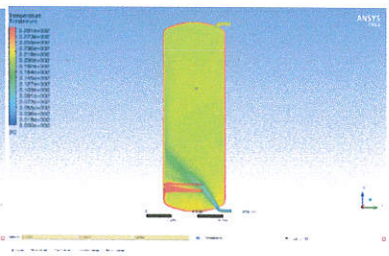
T=15 min., q=0,22 kg/s T=15 min., q=0,22 kg/s T=15 min., q=0.44kg/s



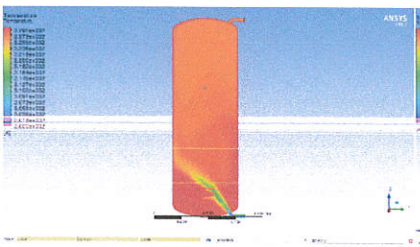
T=20 min., q=0,22 kg/s



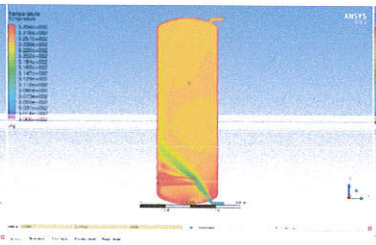
T=20 min., q=0,22 kg/s



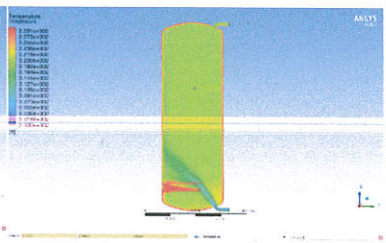
T=20 min., q=0.44kg/s



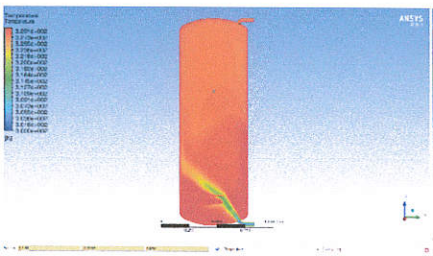
T=25 min., q=0,22 kg/s



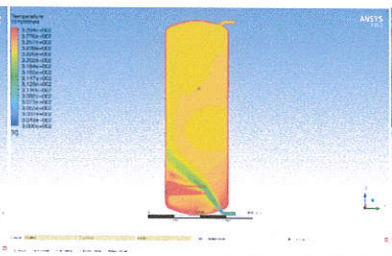
T=25 min., q=0,22 kg/s



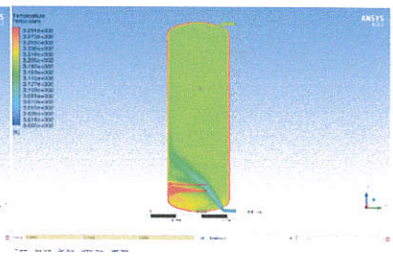
T=25 min., q=0.44kg/s



T=30 min., q=0,22 kg/s



T=30 min., q=0,22 kg/s



T=30 min., q=0.44kg/s

22-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis" teminė konferencija
Proceedings of the 22 th Conference for Junior Researchers „Science – Future of Lithuania"

PASTATŲ ENERGETIKA / BUILDING ENERGETICS

2019 m. balandžio 25 d. Vilnius
25 April, Vilnius, Lithuania
http://jmk.pinzs.vgtu.lt

ISSN 2029-7157
eISSN 2029-7149
ISBN 978-609-457-936-3
eISBN 978-609-457-935-6

http://dx.doi.org/10.3846/pinzs.2019.00

AKUMULIACINĖS KARŠTO VANDENS TALPOS VEIKIMO REŽIMŲ VERTINIMAS

Tomas Kropas[1], Giedrė Streckienė[2]

[1]magistrantas, Vilniaus Gedimino technikos universitetas
[2]docentas, Vilniaus Gedimino technikos universitetas
el. p. [1]tomas.kropas@stud.vgtu.lt; [2]giedre.streckienė@vgtu.lt

Anotacija. Šilumos akumuliavimo technologijų svarba iškyla vis dažniau naudojant atsinaujinančius energijos šaltinius. Tačiau dažnai tokių šaltinių generuojama energija laiko atžvilgiu nesutampa su sistemos ar vartotojo poreikiu. Tai skatina tobulinti ir tirti įvairias energijos akumuliavimo technologijas. 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 išsamiau šiluminės startifikacijos pobūdį bei temperatūros pasiskirstymą talpoje, iš eksperimentų duomenų apskaičiuojami stratifikaciją apibūdinantys skaičiai. Atlikta skaitinė ir grafinė gautų rezultatų interpretacija. Gauti rezultatai palyginti su termovizinėmis nuotraukomis.

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

Įvadas

Šiais laikais sparčiai auga energijos poreikiai pastatuose, pramonėje ir kasdieniniame mūsų gyvenime. Įvairių formų energijos gamybai sparčiai augant 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 CO_2 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 akumuliatorius.

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 ištekliai 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 šiluminės energijos 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 arba specifinę šilumą nėra pagrįstas fazių virsmų reiškiniu. Čia vykstant šilumos absorbcijos procesui, pakyla akumuliacinėje talpoje naudojamos medžiagos temperatūra (Alva et al. 2018). Būtent šio tipo šilumos akumuliatoriai 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.

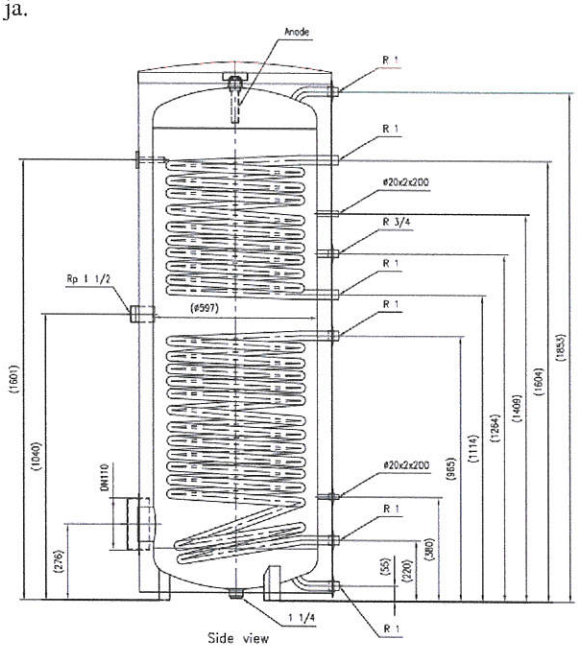
© 2019 Tomas Kropas, Giedrė Streckienė. Leidėjas VGTU leidykla „Technika". Šis straipsnis yra atvirosios prieigos straipsnis, turintis Kūrybinių bendrijų (Creative Commons) licenciją (CC BY 4.0), kuri leidžia neribotą straipsnio ar jo dalių panaudą su privaloma sąlyga nurodyti autorių ir pirminį šaltinį.

Taip pat tai prisideda prie tokių akumuliavimo 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 ir nuotrauka pateikta (1, 2 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.



2 pav. Tiriamojo objekto nuotrauka

Yra išskiriami trys pagrindiniai akumuliacinės talpos veikimo režimai:

- Įkrovimas;
- Laikymas;
- Iškrovimas.

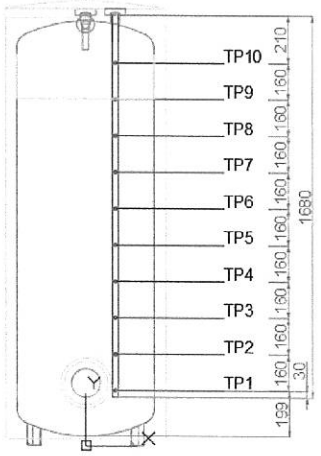
Daug autorių nagrinėja akumuliacinių talpų veikimą ir efektyvumą būtent šiais atskirais etapais arba keliais iš jų (Jack et al. 2009; Streckienė 2011a; Nash et al. 2017). Šiame straipsnyje visi šie režimai bus nagrinėjami atskirai siekiant nustatyti kiekvieno jų efektyvumą bei ypatybes.

Norint nustatyti temperatūros pasiskirstymą talpoje naudojamas matavimo prietaisas su 10 K tipo NiCr-Ni termoporų, išsidėsčiusių išilgai plastikinio PP-R 16x2,7 mm strypo kas 16 cm (3 pav.). Tai leidžia stebėti, kaip temperatūra pasiskirsto visame talpos tūryje bet kuriuo eksperimento laiko momentu.



3 pav. Daugiataškinis temperatūros matavimo prietaisas

Matavimo prietaisas yra įleidžiamas į tiriamąjį objektą – akumuliacinę talpa, per jos viršutinėje dalyje esančią angą. Bendras akumuliacinės talpos su matavimo prietaisu brėžinys pateikiamas (4 pav.).



4 pav. Akumuliacinės talpos su įleistu temperatūros matavimo prietaisu brėžinys

Temperatūros fiksavimui skirtingose akumuliacinės talpos vietose 10 termoporų yra prijungiama 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. Specialiai šiam tikslui akumuliacinės talpos sienelės izoliacinėje medžiagoje yra išpjaunama siaura juosta, šioje vietoje tiriamojo objekto korpusas yra nudažomas juodos spalvos matiniais dažais, kad įkaitusio 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 2011b).

$$Str = \frac{\overline{(\partial T / \partial z)_t}}{(\partial T / \partial z)_{i=0}} \qquad (1)$$

Temperatūrų gradientų vidurkis bet kuriuo laiko momentu išreiškiamas:

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

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 2011b):

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

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

Rezultatai ir jų aptarimas

Tiriamasis baigiamojo darbo kūnas – 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:

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

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 tiekiama trimis fazėmis, atskirai matuoti kiekvienos fazės paramet-

rai: srovės stipris ir įtampa. Talpos įkrovimas vyko 2,5 valandos. Bendras perduotas energijos kiekis skaičiuojamas kaip atskirų fazių suteikto energijos kiekio suma:

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

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

Taigi, iš viso buvo perduota 26,61 kWh energijos, kai akumuliacinės talpos vidutinė temperatūra įkrovimo proceso metu pakilo nuo 23,52°C iki 74,83°C. Energijos kiekis, kurį gavo šilumos talpa skaičiuojama pagal (3) formulę:

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

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

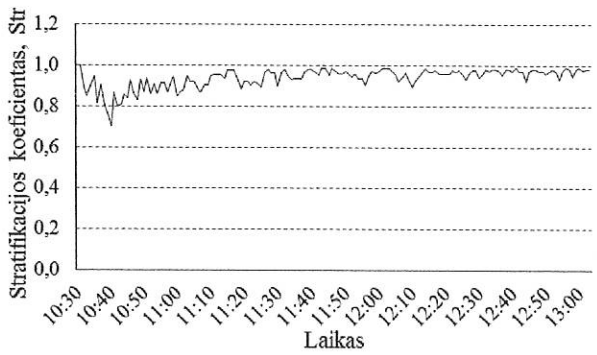
$$Q_{talpos} = \frac{438,95 \cdot 4,2 \cdot (74,83 - 23,52)}{3600} = 26,276 kWh$$

Tada įkrovimo proceso efektyvumas paskaičiuojamas:

$$\eta_{įkrovimo} = \frac{Q_{talpos}}{Q_{el}} \qquad (7)$$

Apskaičiuotas įkrovimo proceso efektyvumas buvo 98,75 %.

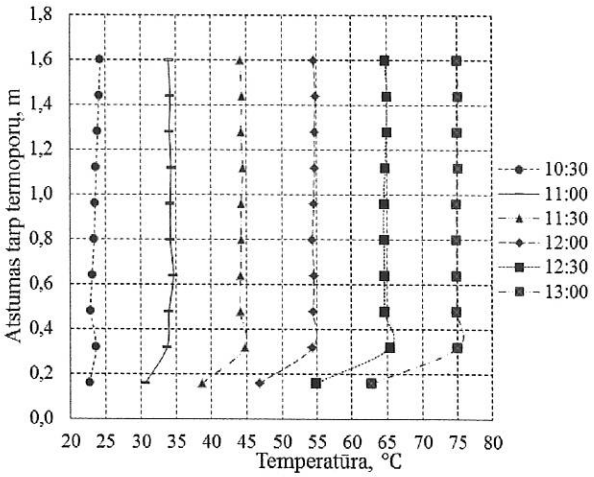
Kitas naudojamas kriterijus, vertinantis įkrovimo procesą yra stratifikacijos skaičius. Idealiu atveju, kai temperatūrų pasiskirstymas talpoje yra tolygus, stratifikacijos skaičius yra lygus 1, jei talpoje temperatūrinis režimas yra nenusistovėjęs, fluidas susimaišęs ir stratifikacijos visai nėra Str skaičius bus lygus 0. Iš bandymo metu gautų duomenų šis koeficientas paskaičiuotas kiekvienam laiko žingsniui. Stratifikacijos skaičiaus kitimas laiko atžvilgiu pateikiamas (5 pav.)



5 pav. Str skaičiaus priklausomybės nuo laiko grafikas įkrovimo proceso metu

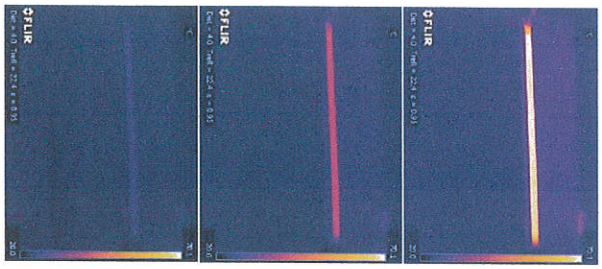
Kaip matome iš grafiko, stratifikacijos skaičius įkrovimo metu svyruoja nuo 0,7 iki 1,0. Pačioje proceso pradžioje, kai kaitinimas tik prasideda Str = 1, tai reiškia, kad akumuliacinė talpa yra pilnai susistratifikavusi, temperatūrinis režimas joje yra nusistovėjęs. Vėliau, vykstant talpos įkrovimo procesui,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

Bandymo 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 (6 pav.).



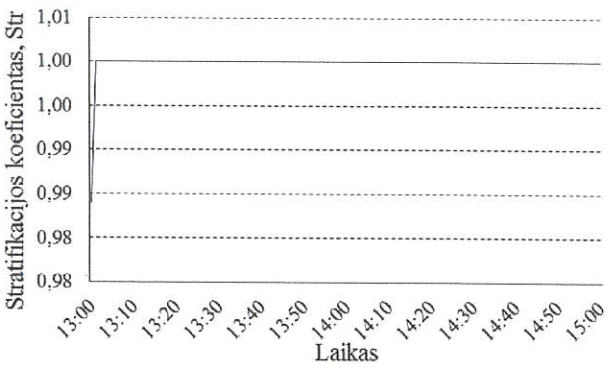
6 pav. Temperatūros pasiskirstymas talpoje, įkrovimo metu

Kaip matome iš pateikto grafiko, temperatūros vykstant talpos įkrovimo procesui palaipsniui auga. Temperatūrų augimas yra tendencingas ir pastovus. Ypač 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 termovizoriumi. Gauti rezultatai pateikiami (7 pav.).



a) b) c)

7 pav. Vizualaus vertinimo fragmentai, įkrovimo procesas, a) – proceso pradžioje, b) – proceso viduryje, c) – proceso pabaigoje



8 pav. Str skaičiaus priklausomybės nuo laiko grafikas laikymo proceso metu

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.

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

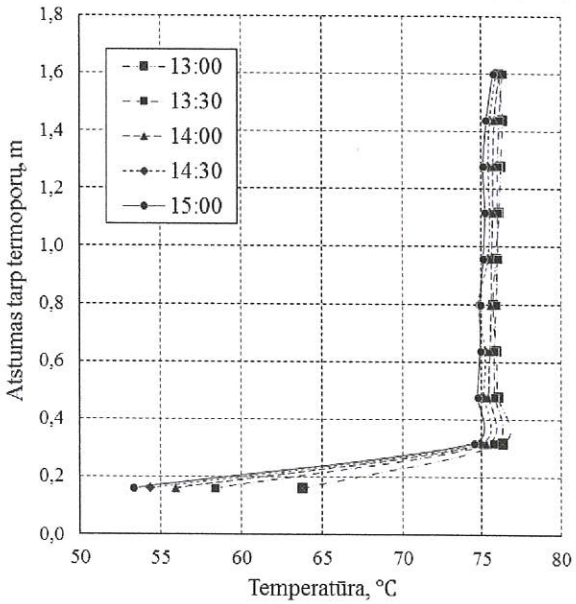
Šilumos nuostoliai skaičiuojami analogiškai įkrovimo metu skaičiuotiems nuostoliams. Gautas prarastos energijos kiekis yra 0,402 kWh. Bandymo metu akumuliacinės talpos vertinimui pasirinkta laikymo proceso trukmė yra 2 valandos. Bendras proceso efektyvumas, laikymo režimo metu, skaičiuojamas pagal formulę (8):

$$\eta_{laikymo} = \frac{Q_{talpos,\,pradžioje} - Q_{nuostoliai}}{Q_{talpos,\,pradžioje}} = \frac{26,28 - 0,402}{26,28} = 98,47\% \quad (8)$$

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 (8 pav.).

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 išsistratifikuoja ir Str skaičius tampa lygus 1. Vidutinis įkrovimo metu esantis stratifikacijos skaičius yra Str=1,00.

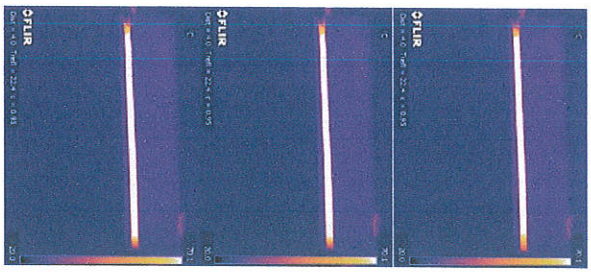
Bandymo metu, kaip ir įkrovimo proceso metu, vienos minutės intervalu fiksuotos temperatūros skirtingose talpos vietose. Temperatūrų pasiskirstymas talpoje laikymo metu, priklausomai nuo laiko pavaizduotas (9 pav.)



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

Kaip matome iš pateikto grafiko, temperatūros vykstant talpos laikymo procesui palaipsniui krenta. Temperatūrų kritimas yra tendencingas ir pastovus. Ypač 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 sieneles.

Procesas stebėtas termovizoriumi, kelios vizualaus temperatūrų pasiskirstymo stebėjimo nuotraukos 13:00 val., 14:00 val. ir 15:00 val. pateiktos (10 pav.).



a) b) c)

10 pav. Vizualaus vertinimo fragmentai – laikymo procesas, a) – proceso pradžioje, b) – proceso viduryje, c) – proceso pabaigoje

Gautos nuotraukos atspindi laikymo proceso metu gautus rezultatus. 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, yra tiekiamas per šalia esantį vėdinimo įrenginio šilumokaitį, šildant į patalpą tiekiamą oro srautą, ir atvėsęs yra gražinamas atgal į akumuliacinės talpos apatinę dalį.

Bandymo metu yra matuojamos iš talpos paimamo ir grąžinamo vandens temperatūros bei šilumnešio srauto debitas, kuris tiriamuoju laikotarpiu buvo lygus 1700 kg/h. Tada iš akumuliacinės talpos paimtas šilumos kiekis skaičiuojamas pagal formulę (9):

$$\dot{Q}_{iškrauta} = \frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta t}{3600} \qquad (9)$$

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

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

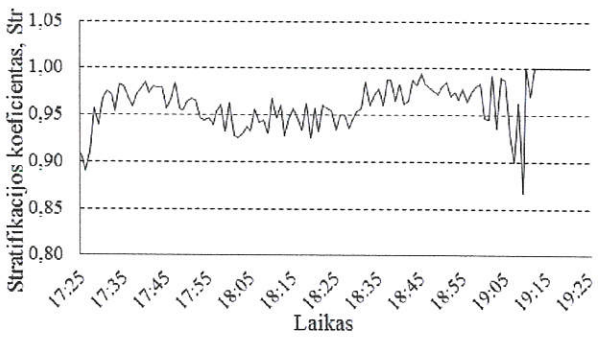
$$Q_{iškrauta} = \frac{\sum \dot{Q}_{iškrauta}}{60} \qquad (10)$$

Visas iš talpos paimtas šilumos kiekis yra lygus 29,39 kWh. Nustatomas talpos iškrovimo proceso efektyvumas:

$$\eta_{iškrovimo} = \frac{Q_{iškrauta}}{Q_{talpos,\ pradžioje}} \qquad (11)$$

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 11 paveiksle.

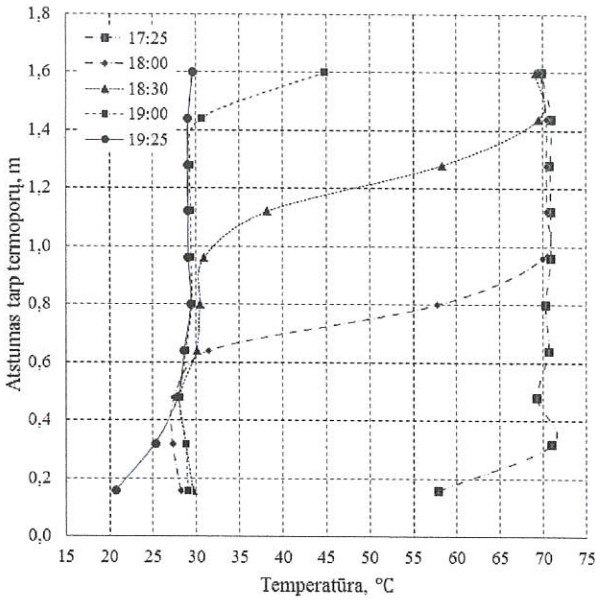


11 pav. Str skaičiaus kitimas, iškrovimo proceso metu

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.

Bandymo metu, kaip kitų nagrinėtų procesų metu, vienos minutės intervalu fiksuotos temperatūros skirtin-

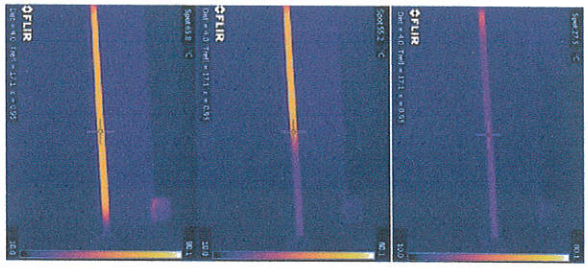
gose talpos vietose. Temperatūrų pasiskirstymas talpoje iškrovimo proceso metu, priklausomai nuo laiko pavaizduotas (12 pav.).



12 pav. Temperatūros pasiskirstymas talpoje iškrovimo proceso metu

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 (18:00 val. 18:30 val.) 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 karštąją ir šaltąją akumuliacinės talpos zonas.

Termovizinės iškrovimo proceso nuotraukos atitinkamai 17:30 val., 18:00 val. ir 19:00 val. pateikiamos (13 pav.).



a) b) c)

13 pav. Vizualaus vertinimo fragmentai, laikymo procesas, a) – proceso pradžioje, b) – proceso viduryje, c) – proceso pabaigoje

Iš (13 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 paveikslas) 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. Eksperimentų 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. Susi-

formuoja temperatūrinis barjeras „termoklina“, esantis talpos apačioje.

3. Išnagrinėjus akumuliacinės talpos iškrovimo procesą, gautas jo efektyvumas yra 99,64%. Beveik visa talpoje akumuliuota 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 rengiant straipsnį ir 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 the development of renewable energy transformation technologies. However, often the energy generated by such sources over time does not match the needs of the system or the user. This situation enhances new investigations of various accumulation technologies and their application.. 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 to photos of thermovision.

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Karšto vandens akumuliacinės talpos eksperimentinis įkrovimo proceso tyrimas

Tomas Kropas, magistrantas
Dr. Giedrė Streckienė

Konferencija „Šilumos energetika ir technologijos – 2019"
2019 m. sausio 31 d., Kaunas

1

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Akumuliacinių talpų naudojimas:

- Plačiai naudojamos pastato inžinerinėse sistemose šildymui ar/ir karštam vandeniui ruošti;
- Naudojamos kartu su AEI užtikrina sistemos stabilumą ir patikimumą;
- Naudojamos, norint išlyginti sistemos energijos šaltinio poreikio svyravimus;
- Naudojamos akumuliuoti energijos perteklių sistemoje;

2

2

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Tyrimo tikslas

Ištirti akumuliacinės karšto vandens talpos įkrovimo procesą bei nustatyti šiluminę stratifikaciją ir efektyvumą.

3

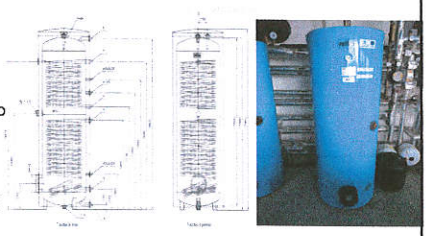
3

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Tyrimo objektas:

Vertikalios formos cilindrinė akumuliacinė talpa, naudojama šildymo ir/ar karšto vandens sistemose.

- Aukštis - 1,961 m;
- Tūris - 470 l;
- Maksimali darbinė temperatūra - 95°C;
- Maksimali šilumokaičio temperatūra - 110°C;
- Maksimalus darbinis slėgis - 10 bar;
- Izoliacija - 50mm putų poliuretanas.



4

4

Matavimo įranga ir sąlygos:

- Daugiafunkcinis elektros srovės, stiprio ir galios matavimo prietaisas MD 9272;
- Daugiataškinis temperatūros matavimo prietaisas su 10 termoporų. Termopora (NiCr-Ni) K tipo. Matavimo ribos -200÷1370 °C.
- AHLBORN duomenų fiksavimo, valdymo ir įrašymo įrenginys ALMEMO 5990-2;
- Termovizorius

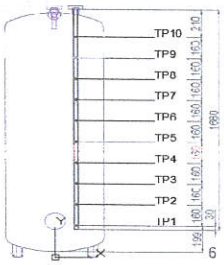
5

5

Matavimo įranga ir sąlygos:

- Naudojamos K tipo NiCr-Ni termoporos;
- Atstumas tarp termoporų 160 mm;
- Termoporų skaičius – 10.





6

6

Tyrimo metodika Stratifikacijos skaičius

- Statinio režimo metu: $Str = \dfrac{\overline{(\partial T / \partial z)_t}}{(\partial T / \partial z)_{t=0}}$
  - Temperatūros gradientų vidurkis bet kuriuo laiko momentu:

$$\overline{\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_t} = \frac{1}{J-1} \cdot \left[\sum_{J=1}^{J-1}\left(\frac{T_{J+1} - T_J}{\Delta z}\right)\right]$$

- Dinaminio režimo metu: $Str = \dfrac{\overline{(\partial T / \partial z)_t}}{(\partial T / \partial z)_{\max}}$
  - Didžiausias vidutinis temperatūros gradientas įkrovimo ar iškrovimo metu:

$$\overline{\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)}_{\max} = \frac{T_{\max} - T_{in}}{(J-1) \cdot \Delta z}$$

7

7

Efektyvumo vertinimas

- Įkrovimo proceso efektyvumas skaičiuojamas:

$$\eta_{įkrovimo} = \frac{Q_{talpos}}{Q_{el}} \text{ arba } \eta_{teor.įkrovimo} = 1 - \frac{Q_{nuost}}{Q_{el}}$$

- Talpai suteiktas energijos kiekis:

$$Q_{el} = P \cdot t = U \cdot I \cdot t$$

$$Q_{el} = (P_1 + P_2 + P_3) \cdot t = (U_1 \cdot I_1 + U_2 \cdot I_2 + U_3 \cdot I_3) \cdot t$$

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

- Energijos kiekis, kurį gavo šilumos talpa:

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

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

8

8

Efektyvumo vertinimas

- Nuostoliai per talpos sieneles:

$$\dot{Q}_{nuost} = u \cdot A \cdot \Delta T = u \cdot A \cdot (T_{talpoje} - T_{aplinkos})$$

$$Q_{nuost} = \sum \dot{Q}_{nuost} = 0{,}268 \text{ kWh}$$

- Apskaičiuotas įkrovimo proceso efektyvumas:

$$\eta_{įkrovimo} = \frac{Q_{talpos}}{Q_{el}} = \frac{26{,}28}{26{,}61} = 98{,}75\%$$

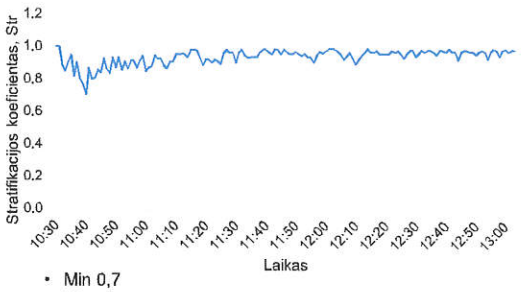
$$\eta_{teor.įkrovimo.} = 1 - \frac{Q_{nuost}}{Q_{el}} = 1 - \frac{0{,}268}{26{,}61} = 98{,}99\%$$

- Skirtumas 0,25%, todėl daroma išvada, kad matavimai ir skaičiavimai atlikti gerai.

9

9

Stratifikacijos skaičiaus kitimas įkrovimo metu

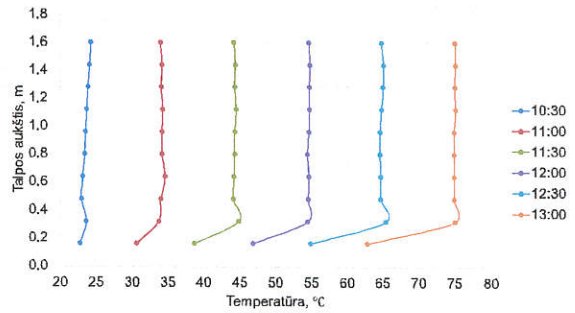


- Min 0,7
- Max 1,0
- Vid. 0,94

10

10

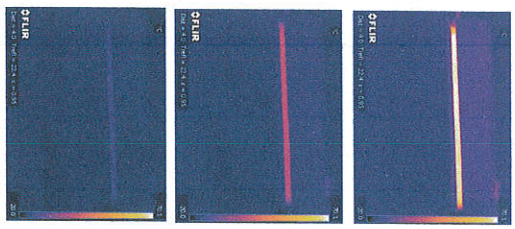
Temperatūros pasiskirstymas talpoje įkrovimo proceso metu



11

11

Termovizinės įkrovimo proceso nuotraukos



Proceso pradžia t=0 h | Proceso vidurys t=1 h | Proceso pabaiga t=2,5 h

12

12

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Išvados

- Proceso efektyvumas siekia 98,75 %;
- Stratifikacijos skaičius svyruoja nuo 0,7 iki 1,0;
- Vidutinis proceso stratifikacijos skaičius 0,94 tai reiškia, kad vykstant talpos įkrovimui, stratifikacija talpoje yra sutrikdoma, bet išlieka gana aukšta;
- Įkraunant talpą, visas jos tūris šyla tolygiai;
- Gautos termovizijos nuotraukos patvirtina eksperimento metu gautus temperatūrų kitimo rezultatus.
- Tyrimo rezultatai gali būti naudojami skaitinių modelių testavimui.

13

13

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Ačiū už dėmesį

14

14