



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

**Dujų sraute išpurkšto vandens sudėtinių šilumos mainų  
modeliavimas taikomuoju technologiniu aspektu**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Paulius Pustelninkas**

Projekto autorius

**prof. habil. dr. Gintautas Miliauskas**

Vadovas

---

**Kaunas, 2024**



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

# **Dujų sraute išpurkšto vandens sudėtinių šilumos mainų modeliavimas taikomuoju technologiniu aspektu**

Baigiamasis magistro projektas  
Termoinžinerija (6211EX023)

---

**Paulius Pustelninkas**

Projekto autorius

**prof. habil. dr. Gintautas Miliauskas**

Vadovas

**dr. Robertas Poškas**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2024**



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas  
Paulius Pustelninkas

## **Dujų sraute išpurkšto vandens sudėtinių šilumos mainų modeliavimas taikomuoju technologiniu aspektu**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Paulius Pustelninkas

*Patvirtinta elektroniniu būdu*



**Kauno technologijos universitetas**

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

## **Baigiamojo magistro projekto užduotis**

Išduota studentui (-ei) – Paulius Pustelninkas

### **1. Projekto tema**

„Dujų sraute išpurškto vandens sudėtinų šilumos mainų modeliavimas taikomuoju technologiniu aspektu“

*(Lietuvių kalba)*

“Modeling of the Composite Heat Transfer of a Sprayed Water in the Gas Flow from an Applied Technological Aspect”

*(Anglų kalba)*

### **2. Projekto tikslas ir uždaviniai**

Tikslas - sumodeliuoti lašelių sudėtinius šilumos ir masės mainus technologiniais vandens įpurškimo į biokuro kūryklų dūmus ir šalinamus dūmus prieš kondensacinį ekonomizerį atvejais ir įvertinti dūmų temperatūros bei vandens išpurškimo dispersiškumo įtaką lašelių faziniams virsmams ir terminei būsenai bei pateikti praktines rekomendacijas biokuro deginimo technologijai efektyvinti.

Uždaviniai:

1. išanalizuoti mokslinę ir technologinę literatūrą vandens technologinio įpurškimo tematikoje;
  - 1.1. išanalizuoti ir aprašyti vandens išpurškimo pritaikomumą ir jo technologinius atvejus biokuro deginimo įrenginiuose;
  - 1.2. atlikti vandens lašelių šilumos ir masės mainų mokslinių tyrimų apžvalgą;
  - 1.3. nustatyti kraštines šilumos ir masės mainų būdingas sąlygas pagal dūmų ir įpurškiamo vandens parametrus;
2. parengti/paaiškinti vandens lašelių fazinių virsmų dūmų sraute skaitinio tyrimo metodiką;
  - 2.1. vandens lašelių fazinių virsmų režimai ir jų matematinis modelis;
  - 2.2. lašelių fazinių virsmų modeliavimo EK programa „LAŠAS“ metodika: įvesties parametrai, išvesties terminų-energinių-fazinių virsmų parametrų grupės;
3. KTU EK programa „LAŠAS“ sumodeliuoti vandens lašelių šilumokaitą ir fazinius virsmus biokuro dūmų sraute ir apibrėžti dūmų temperatūros ir vandens išpurškimo dispersiškumo įtaką lašelių šilumos mainų procesams;
  - 3.1. ištirti spinduliavimo įtaką ŠMM abejais technologiniais išpurškimo atvejais;
  - 3.2. lašelių fazinių virsmų dėsningumai vandens įpurškimo į kūryklos dūmų srautą būdingose kraštinėse sąlygose (dūmų parametrų ir vandens temperatūros ir dispersiškumo įtaka, spinduliavimo ir slydimo poveikis lašelių terminei ir energinei būsenai);
  - 3.3. lašelių fazinių virsmų dėsningumai vandens įpurškimo į šalinamus dūmus prieš kondensacinį ekonomizerį būdingose kraštinėse sąlygose (dūmų parametrų ir vandens temperatūros ir dispersiškumo įtaka, slydimo poveikis lašelių terminei ir energinei būsenai);
4. Grafinės ir fizikinės interpretacijos rezultatus apibendrinti išvadamis ir pateikti praktines rekomendacijas.

### 3. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos

Pagal apibendrintus modeliavimo rezultatus straipsnio formoje pateikiami Mechanikos žurnalui ir Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Industrial engineering 2024“

Projekto autorius	<b>Paulius Pustelninkas</b> <i>(Vardas, Pavardė)</i>	<i>(Parašas)</i>	2024-02-19 <i>(Data)</i>
Projekto vadovas	<b>Gintautas Miliauskas</b> <i>(Vardas, Pavardė)</i>	<i>(Parašas)</i>	2024-02-19 <i>(Data)</i>
Krypties studijų programų vadovas	<b>Algimantas Balčius</b> <i>(Vardas, Pavardė)</i>	<i>(Parašas)</i>	2024-02-19 <i>(Data)</i>

Paulius Pustelninkas. Dujų sraute išpurkšto vandens sudėtinių šilumos mainų modeliavimas taikomuoju technologiniu aspektu. Magistro baigiamasis projektas vadovas prof. habil. dr. Gintautas Miliauskas; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): energijos inžinerija, inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: Vandens lašelis, faziniai virsmai, sudėtinis šildymas, kondensacija, konvekcija, pereinamasis ir pusiausviras garavimas.

Kaunas, 2024. 72 p.

## Santrauka

Baigiamajame magistro projekto darbe atlikta literatūros analizė, kurioje įsigilinta į esamą energetikos sektoriaus situaciją Lietuvoje. Apžvelgtos planuojamos strategijos, bendras atsinaujinančių energijos išteklių kaip kuro suvartojimas centralizuoto šilumos tiekimo sektoriuje, atliekinės šilumos potencialas bei jos susigrąžinimas šiluminėse jėgainėse pritaikius kondensacinių ekonomaizerių bei absorbcinių šilumos siurblių technologijas. Aptarti technologiniai vandens išpurškimo atvejai biokurą deginančiuose įrenginiuose, du atvejai pasirinkti kaip tiriamieji, vandens lašelių išpurškimas į aukštos temperatūros dūmų srautą ir į dūmų srautą prieš kondensacinį ekonomaizerį biokuro deginimo technologijai efektyvini. Abiem atvejams sumodeliuoti vandens lašelių fazinių virsmų režimų ciklai vidutinio drėgnumo dūmų sraute išpurškiant iš dūmų atgautą ir išvalytą 40°C kondensatą. Pirmasis etapas - dviejų skirtingų diametrų  $2R_0=100\ \mu\text{m}$  ir  $2R_0=400\ \mu\text{m}$  vandens lašelių išpurškimas į aukštos 800°C temperatūros dūmų srautą įvedus skystuosius katalizatorius jiems išvalyti, antrasis – tokių pačių diametrų vandens išpurškimas į 150°C temperatūros šalinamus dūmus prieš kondensacinį ekonomaizerį dūmams atvėsinti bei pridrėkinti. Remiantis šilumos srautų balanso lygtimi skaičiavimams sudarytas matematinis modelis, kuriame dėl išorinės konvekcijos ir Spoldingo šilumos pernašos parametru nežinomųjų, buvo skaičiuojamas iteraciniu metodu. KTU EK programa „LAŠAS“ skaitiškai sumodeliuoti fazinių virsmų režimais skirtingiems išpurškimo atvejams nusistatčius skirtingus disperguotų lašelių skersmenis  $2R_0=100\ \mu\text{m}$  ir  $2R_0=400\ \mu\text{m}$ . Atlikus gautų išvesties duomenų analizę grafiškai atvaizduoti patys svarbiausi parametrai bei jų pokyčiai. Atlikta lašelių terminės ir energinės būsenos, dinaminių parametru kitimo, fazinių virsmų kitimo fazinių virsmų ciklu režimuose analizė ir lašelių šilumos ir masės mainus apibrėžiančių kriterijų analizė. Skaitinio modeliavimo patogumui pasirinkta naudoti Furje Fo universalią laiko skalę, kuria naudinga laiko kitimo žingsnį skaitinėje scheme apibrėžti lašelių stambumui jautrų fazinių virsmų režimų ciklą atvaizduoti. Atlikus analizę patvirtinta, kad pagal nusistatytus įvesties duomenis fazinių virsmų režimų ciklas išliko nuoseklus. Rezultatai patvirtino jog 150°C temperatūros dūmų sraute spinduliavimo vandens lašelių terminėi būsenai nėra reikšminga. Patvirtinta, kad Stefano hidrodinaminis srautas konvekcinius šilumos ir masės pernašos procesus kondensaciniame režime stiprina, o garavimo režime silpnina. Lygiagrečiai su šiuo baigiamuoju darbu buvo atlikta ir daugiau tyrimų, kurių rezultatai buvo straipsnio formose pateikti redakcijoms. Straipsnis „Influence of Flue Gas Flow Temperature and Humidity on Heating and Evaporation of Injected Water Droplets“, kuriame tirtas lašelių ŠMM aukštos temperatūros kūryklos dūmuose esant skirtingam dūmų drėgnumui buvo pristatytas Industrial Engineering 2023 CIRCULAR ECONOMY: PRODUCTION AND CONSUMPTION konferencijoje. Antrasis straipsnis „Numerical Modelling of Phase Transformations of Water Droplets for Efficient Heat

Recovery From Biofuel Flue Gas“ pateiktas redakcijai Mechanikos žurnalui. Jame atliktas tyrimas spinduliavimo įtakai ŠMM nustatyti skirtingose dūmų temperatūrose bei pašildyto 80°C kondensato išpurškimas prieš kondensacinę ekonomaizerį. Ir trečiasis straipsnis „Modeling Of The Composite Heat Transfer Of a Sprayed Water In The Gas Flow From An Applied Technological Aspect“ pateiktas ir priimtas spaudai INDUSTRIAL ENGINEERING 2024 from Zero to Hero. Straipsnyje pristatyti skirtingų diametrų lašelių ŠMM žemos temperatūros dūmuose ir Furje skalės patogumas fazinių virsmų režimų ciklą analizėje.

Paulius Pustelninkas. Modeling of the Composite Heat Transfer of a Sprayed Water in the Gas Flow from an Applied Technological Aspect. Master's Final Degree Project / supervisor prof. habil. dr. Gintautas Miliauskas; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Energy Engineering, Engineering Studies.

Keywords: water droplets, phase change, complex heating, condensation, convection, transient and equilibrium evaporation.

Kaunas, 2024. 72 p.

### Summary

The final work of the Master's project includes a literature analysis, which looks into the current situation of the energy sector in Lithuania. The planned strategies, the overall consumption of renewable energy resources as fuel in the district heating sector, the potential of waste heat and its recovery in thermal power plants through the application of condensing economizers and absorption heat pump technologies are reviewed. Technological cases of water spraying in biofuel combustion plants are discussed, two cases are selected as test cases, water droplet spraying into the high temperature flue gas stream and into the flue gas stream upstream of the condensing economiser for the efficient use of biofuel combustion technology. For both cases, cycles of phase transformation modes of water droplets in a medium humidity flue gas stream were simulated by spraying the recovered and cleaned 40°C condensate from the flue gas. The first phase consists of spraying two water droplets of different diameters  $2R_0 = 100 \mu\text{m}$  and  $2R_0 = 400 \mu\text{m}$  into the high temperature flue gas stream of 800°C after the introduction of liquid catalysts to clean them, and the second phase consists of spraying the same water droplets of the same diameters into the 150°C removed flue gas before the condensation economiser to cool and humidify the flue gas. A mathematical model based on the heat flow balance equation was developed for the calculations, which, due to the unknowns of the external convection and Spalding heat transfer parameters, was calculated by an iterative approach. The KTU EK program "LAŠAS" numerically simulated the phase transformation modes for different spraying cases with different dispersed droplet diameters  $2R_0 = 100 \mu\text{m}$  and  $2R_0 = 400 \mu\text{m}$ . The most important parameters and their variations are graphically represented by the analysis of the obtained output data. The analysis of the thermal and energetic state of the droplets, the variation of the dynamic parameters, the variation of the phase transformations in the phase transformation cycle regimes and the analysis of the parameters defining the heat and mass transfer of the droplets have been performed. For the convenience of numerical modelling, the use of the Fourier Fo universal timescale was chosen, which is useful to define the time step in the numerical scheme to represent the droplet coarsening sensitive phase transformation regimes cycle. The analysis confirmed that the cycle of the phase transformation modes remained consistent under the set input data. The results confirmed that the temperature of 150°C in the flue gas stream is not significant for the thermal state of the radiant water droplets. It was confirmed that the Stefan hydrodynamic flow enhances the convective heat and mass transfer processes in the condensation regime and weakens them in the evaporation regime. In parallel with this thesis, more research was carried out and the results were submitted to the editors in the form of articles. The paper "Influence of Flue Gas Flow Temperature and Humidity on Heating and Evaporation of Injected Water Droplets", which



investigates the droplet HMT in high temperature flue gas at different flue gas humidity, was presented at the Industrial Engineering 2023 CIRCULAR ECONOMY: PRODUCTION AND CONSUMPTION conference. The second paper "Numerical Modelling of Phase Transformations of Water Droplets for Efficient Heat Recovery From Biofuel Flue Gas" has been submitted to the Mechanics Journal. It includes a study to determine the effect of radiation on HMT at different flue gas temperatures and the spraying of a heated 80°C condensate against a condensation economiser. And the third paper "Modelling Of The Composite Heat Transfer Of a Sprayed Water In The Gas Flow From An Applied Technological Aspect" has been submitted and accepted for publication in INDUSTRIAL ENGINEERING 2024 from Zero to Hero. The paper presents the use of different droplet diameters in low-temperature flue gas and the convenience of the Fourier scale in the analysis of phase transformation mode cycles.

# Turinys

<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>12</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>13</b>
<b>Santrumpų ir terminų sąrašas .....</b>	<b>15</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>18</b>
<b>1. Literatūros analizė.....</b>	<b>20</b>
1.1. Energetikos sektoriaus strategijos, efektyvumo didinimo galimybės .....	20
1.2. Energetikos situacija Lietuvoje .....	22
1.2.1. Atsinaujinantys energijos šaltiniai.....	23
1.3. Situacija CŠT sektoriuje .....	24
1.4. AEI CŠT sektoriuje .....	25
1.5. Atliekinės šilumos potencialas .....	27
1.5.1. Dūmų kondensaciniai ekonomizeriai .....	28
1.5.2. Absorbciniai siurbliai .....	29
1.6. Vandens dispergavimas į dūmų srautą .....	30
1.6.1. Vandens išpurškimo pritaikomumas ir jo technologiniai atvejai biokuro deginimo įrenginiuose .....	31
1.7. Technologinio tiriamojo atvejų išgryninimas ir jiems būdingų kraštinių sąlygų apibrėžimas prieš kondensacinį ekonomizerį ir į kūryklą.....	33
1.8. Vandens lašelių šilumos ir masės mainų tyrimų apžvalginė analizė.....	33
<b>2. Metodinė dalis .....</b>	<b>35</b>
2.1. MBP problematikos technologinis aktualumas ir tiriamieji atvejai .....	35
2.2. Vandens įpurškimas ir lašelių FVR ciklas.....	36
2.3. Lašelių fazinių virsmų ir judėjimo dūmų sraute modelis .....	38
2.4. Lašelio terminės ir energinės būsenos lašelių FVC režimuose modelis.....	39
2.5. Vandens lašelių FVRC skaitinio modeliavimo metodika .....	42
2.5.1. FVR ciklo iteracinis algoritmas ir skaitinė schema .....	43
2.5.2. FVR ciklo modeliavimas programa „LAŠAS“ .....	43
2.5.3. Furje Fo kriterijumi apibrėžtos universalaus laiko skalės svarba FVR ciklo modeliavimui ir rezultatų grafinė interpretacijai.....	45
<b>3. Vandens lašelių FVR ciklo biokuro dūmuose modeliavimo rezultatai.....</b>	<b>47</b>
3.1. Lašelių fazinių virsmų analizė ir FVR ciklo trukmės apibrėžimas .....	47
3.2. Lašelių FVR ciklo režimų apibrėžimas pagal modeliavimo rezultatus.....	52
3.3. Lašelių terminės ir energinės būsenos kitimo FVC režimuose analizė .....	55
3.4. Lašelių dinaminų parametru kitimo FVC režimuose analizė .....	59
3.5. Stefano hidrodinaminio srauto įtakos lašelio konvekciniams šildymui ir faziniams virsmams įvertinimas .....	61
<b>Išvados .....</b>	<b>67</b>
<b>Literatūros sąrašas .....</b>	<b>68</b>
<b>Priedai.....</b>	<b>71</b>
1 priedas. Industrial Engineering 2023 CIRCULAR ECONOMY: PRODUCTION AND CONSUMPTION Certificate .....	71

2	priedas. 2024-02-19 Pažyma dėl pateikto straipsnio „Numerical Modelling of Phase Transformations of Water Droplets for Efficient Heat Recovery from Biofuel Flue Gas“ mokslo žurnalo „Mechanika“ redakcijai. ....	72
---	---	----

## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė.</b> Biokurą deginančio katilo tipiniai nuostoliai. [14].....	28
<b>2.1 lentelė.</b> INPUT parametrai tiriamaisiais atvejais. ....	44
<b>3.1 lentelė.</b> Vandens lašelių FVC režimų kaitą apibrėžiantys laikai tiriamaisiais atvejais. ....	54
<b>3.2 lentelė.</b> $P_{\dot{S}_{MM,co}}$ parametrai $Fo_{co}$ momentu.....	54
<b>3.3 lentelė.</b> $P_{\dot{S}_{MM,r}}$ parametrai $Fo_r$ momentu.....	54
<b>3.4 lentelė.</b> $P_{\dot{S}_{MM,r}}$ parametrai $Fo_e$ momentu.....	54

## Paveikslų sąrašas

<b>1.1 pav.</b> Lietuvos energetinio sektoriaus siekiami rezultatai 2020, 2030 ir 2050 metams. [9].....	21
<b>1.2 pav.</b> Bendro energijos tiekimo raida Lietuvoje nuo 2000 m. [10] .....	23
<b>1.3 pav.</b> Energijos suvartojimas pagal kuro rūšis Lietuvoje 2021 metais (%). [11] .....	23
<b>1.4 pav.</b> Kuro sudėtis centralizuotai teikiamos šilumos gamyboje Lietuvoje. [12] .....	25
<b>1.5 pav.</b> Energijos gamyba šalies viduje, Lietuva, 2022 m. [10] .....	26
<b>1.6 pav.</b> Sunaudotas kuras Lietuvos CŠT sektoriuje 1997–2021 metais. [2].....	27
<b>1.7 pav.</b> Katilo efektyvumo priklausomybė nuo išmetamų dūmų temperatūros. [16].....	29
<b>1.8 pav.</b> Katilo efektyvumo ir nuostolių pasiskirstymo schema. [16].....	30
<b>1.9 pav.</b> AŠS potencialas biokuro katilinėse. [16] .....	30
<b>1.10 pav.</b> Lašelio energinė schema fazinių virsmų kondensaciniame režime.....	34
<b>1.11 pav.</b> Lašelio energinė schema fazinių virsmų pereinamojo garavimo režime. ....	34
<b>2.1 pav.</b> Vandens dispergavimo proceso bei dūmų ir lašelių dvifazio srauto susiformavimo principinė geometrinė interpretacija. [42] .....	36
<b>2.2 pav.</b> Skirtingo stambumo lašelių garavimo dūmų sraute dinamika konvekcinio šildymo atveju realiame laike (a) ir Furje kriterijumi išreikštoje laiko skalėje (b) [50]. $2R_0$ , $\mu\text{m}$ : (1) 50, (2) 100, (3) 150, (4) 250, (5) 500, (6) 1000; $t_d=1000^\circ\text{C}$ ; $X_{v,d}=0.25$ ; $w_d=10$ m/s; $t_{l,0}=40^\circ\text{C}$ ; $\text{Re}=20$ .....	45
<b>3.1 pav.</b> Lašelių garavimo dinamika žemos (a) ir aukštos (b)temperatūros dūmuose. $t_d$ , $^\circ\text{C}$ (1, 2) 150, (3, 4) $800^\circ\text{C}$ ; $2R_0$ , $\mu\text{m}$ : (1, 3) 100, (2, 4) 400; $X_{v,g}=0.3$ ; $w_d=10$ m/s; $t_{l,0}=40^\circ\text{C}$ ; $w_{l,0}=40$ m/s. ....	48
<b>3.2 pav.</b> Lašelių garavimo dinamika (a) ir bemačio ploto kitimas (b) dūmuose. $F_{of}$ : (1) 80,35; (2) 76,42; (3) 5,32; (4) 4,184. $\tau_f$ , s: (1) 1.312; (2) 19,97; (3) 0,087; (4) 1,084. Kraštinės ŠMM sąlygos kaip paveiksle 3.1. ....	48
<b>3.3 pav.</b> Stambaus 400 $\mu\text{m}$ skersmens lašelio bemačių $P_{f,n}$ parametų kitimas FVR cikle žemos $150^\circ\text{C}$ temperatūros (a) ir aukštos $800^\circ\text{C}$ (b) temperatūros dūmuose. Parametro $P_{f,n}$ prasmė: (1) $R/R_0$ , (2) $R^2/R_0^2$ , (3) $R^3/R_0^3$ , (4) $\rho_l R^3/(\rho_{l,0} R_0^3)$ . ....	50
<b>3.4 pav.</b> Stambaus 400 $\mu\text{m}$ skersmens lašelio $P_{f,n}$ parametų kitimas FVC pereinamajame režime žemos $150^\circ\text{C}$ temperatūros (a) ir aukštos $800^\circ\text{C}$ (b) temperatūros dūmuose. Parametro $P_{f,n}$ prasmė: (1) $R/R_0$ , (2) $R^2/R_0^2$ , (3) $R^3/R_0^3$ , (4) $\rho_l R^3/(\rho_{l,0} R_0^3)$ .....	50
<b>3.5 pav.</b> Smulkaus 100 $\mu\text{m}$ skersmens lašelio bemačių $P_{f,n}$ parametų kitimas FVR cikle žemos $150^\circ\text{C}$ temperatūros (a) ir aukštos $800^\circ\text{C}$ (b) temperatūros dūmuose. Parametro $P_{f,n}$ prasmė: (1) $R/R_0$ , (2) $R^2/R_0^2$ , (3) $R^3/R_0^3$ , (4) $\rho_l R^3/(\rho_{l,0} R_0^3)$ . ....	51
<b>3.6 pav.</b> Smulkaus 100 $\mu\text{m}$ skersmens lašelio $P_{f,n}$ parametų kitimas FVC pereinamajame režime žemos $150^\circ\text{C}$ temperatūros (a) ir aukštos $800^\circ\text{C}$ (b) temperatūros dūmuose. Parametro $P_{f,n}$ prasmė: (1) $R/R_0$ , (2) $R^2/R_0^2$ , (3) $R^3/R_0^3$ , (4) $\rho_l R^3/(\rho_{l,0} R_0^3)$ .....	51
<b>3.7 pav.</b> Garo srauto (a) ir jo tankio (b) dinamika lašelių FVR cikle. $t_d$ , $^\circ\text{C}$ (1, 2) 150, (3, 4) $800^\circ\text{C}$ ; $2R_0$ , $\mu\text{m}$ : (1, 3) 100, (2, 4) 400; $X_{v,g}=0.3$ ; $w_d=10$ m/s; $t_{l,0}=40^\circ\text{C}$ ; $w_{l,0}=40$ m/s. ....	52
<b>3.8 pav.</b> Garo srauto (a) lašelio paviršiuje ir temperatūros gradiento (b) vektorių krypties pokytis FVRC pereinamajame režime. Kraštinės ŠMM sąlygos kaip paveiksle 3.7.....	53
<b>3.9 pav.</b> Lašelių terminės būsenos kitimas $150^\circ\text{C}$ temperatūros dūmuose FVRC pradžioje (a) ir vėliau (b). Kraštinės ŠMM sąlygos kaip paveiksle 3.7. ....	55
<b>3.10 pav.</b> Lašelių terminės būsenos kitimas $800^\circ\text{C}$ temperatūros dūmuose FVRC pradžioje (a) ir vėliau (b). Kraštinės ŠMM sąlygos kaip paveiksle 3.7. ....	55
<b>3.11 pav.</b> Lašeliui suteikiamo konvekcinio (a) ir sugeriamo spinduliavimo (b) šilumos srautų kitimas FVC režimuose. Kraštinės ŠMM sąlygos kaip paveiksle 3.7.....	56

<b>3.12 pav.</b> Neizotermiškumo lašelyje dinamika FVRC pradžioje (a) ir vėliau (b). Kraštinės ŠMM sąlygos kaip paveiksle 3.7. ....	57
<b>3.13 pav.</b> Konvekcinės šilumos srauto tankio lašelyje dinamika FVRC pradžioje (a) ir vėliau (b). Kraštinės ŠMM sąlygos kaip paveiksle 3.7. ....	57
<b>3.14 pav.</b> Lašelio entalpijos dinamika FVRC pradžioje (a) ir vėliau (b). Kraštinės ŠMM sąlygos kaip paveiksle 3.7. ....	58
<b>3.15 pav.</b> Fazinių virsmų šilumos srauto tankio lašelyje dinamika FVRC pradžioje (a) ir vėliau (b). Kraštinės ŠMM sąlygos kaip paveiksle 3.7. ....	59
<b>3.16 pav.</b> Lašelių slydimo greičio kitimas FVC pereinamajame režime 150°C (a) ir 800°C (b) dūmų sraute. Kraštinės ŠMM sąlygos kaip paveiksle 3.7. ....	60
<b>3.17 pav.</b> Reinoldso kriterijaus dinamika FVC pereinamajame režime 150°C (a) ir 800°C (b) dūmų sraute. Kraštinės ŠMM sąlygos kaip paveiksle 3.7. ....	60
<b>3.18 pav.</b> Pekle $Pe_l$ kriterijus vandeniui dinamika FVC pereinamajame režime 150°C (a) ir 800°C (b) dūmų sraute Kraštinės ŠMM sąlygos kaip paveiksle 3.7. ....	61
<b>3.19 pav.</b> Efektyviojo $k_c$ parametro dinamika FVC pereinamajame režime 150°C (a) ir 800°C (b) dūmų sraute. Kraštinės ŠMM sąlygos kaip paveiksle 3.7. ....	61
<b>3.20 pav.</b> Šilumos atidavimo koeficiento (a) ir terminės varžos (b) kitimo dinamika lašelių FVR cikle. Kraštinės ŠMM sąlygos paveiksle 3.7. ....	62
<b>3.21 pav.</b> Nuselto $Nu_f$ (ištisinės linijos) ir $Nu$ (punkturai) kriterijų kitimas lašelių FVR cikle (a) bei kondensaciniame režime ir pradinėje garavimo stadijoje (b). Kraštinės ŠMM sąlygos paveiksle 3.7. ....	63
<b>3.22 pav.</b> Spoldingo šilumos pernašos parametro $B_T$ kitimas lašelių FVR cikle (a) bei kondensaciniame režime ir pradinėje garavimo stadijoje (b). Kraštinės ŠMM sąlygos paveiksle 3.7. ....	64
<b>3.23 pav.</b> . Bemačio Nuselto $Nu_n$ kriterijaus (a) ir bemačio Šervudo $Sh_n$ kriterijaus (b) dinamika lašelių FVR cikle. Kraštinės ŠMM sąlygos paveiksle 3.7. ....	64
<b>3.24 pav.</b> Šervudo $Sh_f$ (ištisinės linijos) ir $Sh$ (punkturai) kriterijų kitimas lašelių FVR cikle (a) bei kondensaciniame režime ir pradinėje pereinamojo garavimo režimo stadijoje (b). Kraštinės ŠMM sąlygos paveiksle 3.7. ....	65
<b>3.25 pav.</b> Spoldingo masės pernašos parametro $B_M$ kitimas lašelių FVR cikle (a) bei kondensaciniame režime ir pradinėje garavimo stadijoje (b). Kraštinės ŠMM sąlygos paveiksle 3.7. ....	65

## Santrumpų ir terminų sąrašas

### Santrumpos:

- AEI- atsinaujinantys energijos ištekliai;  
CŠT- centralizuotas šilumos tiekimas;  
FVC – fazinių virsmų ciklas;  
FVRC – fazinių virsmų režimų ciklas;  
KDE – kondensacinis dūmų ekonomizeris;  
NŠG – nepriklausomi šilumos gamintojai;  
VERT – valstybinė energetikos reguliavimo taryba;  
ŠMM- šilumos ir masės mainai.

### Terminai:

Fazinių virsmų režimų ciklas – nuosekliai vienas kitą keičiantys kondensacinis, pereinamojo garavimo ir pusiausviro garavimo vandens lašelio fazinių virsmų režimai.

Lašelis – išpurkšto vandens mikro tuneliui ekvivalentiškas vandens sferinis tūris.

Lašelio energiniai parametrai – tai su šilumos lašelio paviršiuje srautais susijusių parametru grupė.

Lašelio fazinių virsmų parametrai – tai su lašelio garavimo ir geometrijos dinamika susijusių parametru grupė.

Lašelio konvekcinis šildymas – lašelio šildymo režimas, kurį apibrėžia lašelio slydimo greitis dūmuose ir dūmų bei lašelio paviršiaus temperatūros skirtumas.

Lašelio skersmuo – išpurkšto vandens mikro tuneliui ekvivalentiškos sferos skersmuo.

Lašelio slydimas dūmuose – lašelio judėjimas dūmų srauto atžvilgiu, kurį apibrėžia lašelio ir dūmų greičių skirtumas.

Lašelio terminiai parametrai – tai su temperatūros lauku lašelyje susijusių parametru grupė.

Lašelio dinaminiai parametrai – tai su lašelių judėjimu dūmų sraute susijusių parametru grupė.

Pernašos procesų sąveika – kartu vykstančių sudėtinių šilumos ir masės mainų procesų tarpusavio įtaka, dėl kurios gali pakisti atskiro proceso virsmo greitis.

Stefano hidrodinaminis srautas – skysčio paviršinius fazinius virsmus visuomet lydintis hidrodinaminis srautas, kuris sustiprina difuzinį vandens garo plitimą dujų mišinyje prie lašelio.

### Žymėjimas:

$a$  – temperatūrinis koeficientas, [ $m^2/s$ ];

$a_{ef}$  – temperatūrinis koeficientas, [ $m^2/s$ ];

$a_{l,0}/R_0^2$  – laiko ir Furje skalių ryšių daugiklis, [ $s^{-1}$ ];

$B_M$  – Spoldingo masės pernašos parametras;

$B_T$  – Spoldingo šilumos pernašos parametras;

$C_l$  – lašelio pilnojo pasipriešinimo koeficientas;

$c_{p,l}$  – vandens savitoji šiluma, [ $J/(kg K)$ ];

$F_o$  – momentinis Furje kriterijus FVR cikle;  
 $F_{o_{co}}$  – kondensacinio režimo pabaigą FVR cikle apibrėžiantis Furje kriterijus;  
 $F_{o_e}$  – pereinamųjų fazinių virsmų trukmę FVR cikle ir kartu pusiausviro garavimo režimo pradžios momentą apibrėžiantis Furje kriterijus;  
 $F_{o_f}$  – lašelio FVR ciklo trukmę apibrėžiantis Furje kriterijus;  
 $F_{o_r}$  – spinduliavimo srauto įsijungimo momentą į vandens paviršinį garinimą FVR ciklo pereinamojo garavimo režime apibrėžiantis Furje kriterijus;  
 $\Delta F_o$  – universalus lašelių dispersiškumui žingsnis FVR cikle Furje skalėje apibrėžtos dūmų  $t_d$  temperatūros atveju;  
 $g_v$  – garo srautas [kg/s];  
grad  $T_R$  – temperatūros lašelyje gradientas, [K/m];  
 $h$  – entalpija, [kJ/kg];  
 $Y_{v,d}$  – vandens garo masinė dalis dūmuose;  
 $Y_{v,R}$  – vandens garo masinė dalis dujų mišinyje prie lašelio;  
 $k_c$  – konvekcinio šilumos plitimo suintensyvėjimą lašelyje dėl priverstinės vandens cirkuliacijos įvertinantis efektyviojo šilumos laidumo parametras;  
 $L$  – vandens fazinių virsmų šiluma, [J/kg],  
 $M_l$  – lašelio masė, [kg];  
 $n$  – begalinės sumos nario indeksas;  
 $Nu$  – Nuselto kriterijus;  
 $p_d$  – dūmų slėgis, [Mpa];  
 $P_{e_l}$  – Pekle kriterijus lašeliui;  
 $P_f$  – fazinių virsmų parametų grupė;  
 $P_{kr}$  – lašelių šilumos ir masės mainus apibrėžiantys kriterijų grupė;  
 $P_t$  – terminiai parametų grupė;  
 $P_q$  – energiniai parametų grupė;  
 $P_w$  – dinaminiai parametų grupė;  
 $P_0$  – dūmų srauto ir įpurkšto vandens lašelių pradiniai parametrai;  
 $Pr$  – Prandtlio kriterijus lašeliui;  
 $r$  – radialinė koordinatė, [m];  
 $R$  – sferinio lašelio spindulys, [m];  
 $Re$  – Reinoldso kriterijus;  
 $R/R_0$  – bematis lašelio skersmuo;  
 $R^2/R_0^2$  – bematis lašelio paviršiaus plotas;  
 $R^3/R_0^3$  – bematis lašelio tūris;  
 $\rho_l R^3 / (\rho_{l,0} R_0^3)$  – bematis lašelio masės kitimas;  
 $Sh$  – Šervudo kriterijus;  
 $\bar{Sh}$  – modifikuotas Šervudo kriterijus;  
 $Sc$  – Šmidto kriterijus;  
 $t_d$  – dūmų temperatūra, [°C];  
 $t_{l,0}$  – lašelio pradinė temperatūra, [°C];  
 $T_l(r, \tau)$  – lokalinės temperatūros lašelyje kitimą aprašanti nestacionariojo temperatūros lauko funkcija, [K];  
 $t_R$  – lašelio paviršiaus temperatūra, [K];  
 $t_s$  – soties būsenos temperatūra, [°C];



$t_{vd}$  – būdinga vandens garo ir dūmų mišinio prie lašelio temperatūra, [°C];  
 $V_{sk}$  - susiformuojantis mažas tūrelis, [m<sup>3</sup>];  
 $V_l$  - sferinis tūrelis, [m<sup>3</sup>];  
 $q_{c,d}$  – konvekcinės šilumos srauto į lašelį tankis, [W/m<sup>2</sup>];  
 $q_f$  – fazinių virsmų lašelio paviršiuje šilumos srauto tankis, [W/m<sup>2</sup>];  
 $q_{c,l}$  – konvekcinės šilumos srauto lašelyje tankis, [W/m<sup>2</sup>];  
 $w_l$  – lašelio momentinis greitis, [m/s];  
 $w_d$  - dūmų srauto greitis, [m/s];  
 $w_{l,0}$  – lašelių išpurškimo greitis [m/s];  
 $X_{g,d}$  yra garo tūrinė dalis dūmuose;  
 $2R_0$  – pradinis lašelio skersmuo, [μm];  
 $\mu_d$  – dūmų dinaminės klampos koeficientas, [Pa s];  
 $\nu$  – garo ir dūmų mišinio kinematinės klampos koeficientas, [m<sup>2</sup>/s];  
 $\rho_d$  – dūmų tankis, [kg/m<sup>3</sup>];  
 $\rho_l$  – lašelio vandens tankis, [kg/m<sup>3</sup>];  
 $q_{r,l}$  – lokalinio spinduliuotės srauto lašelyje tankis, [W/m<sup>2</sup>];  
 $\tau$  – laikas, [s];  
 $\lambda$  – vandens šilumos laidžio koeficientas, [W/(m K)];  
 $\alpha$  – konvekcinio šilumos atidavimo lašeliui koeficientas, [W/(m<sup>2</sup>K)].

## Įvadas

Didelė dalis energijos, reikalingos žmonių gerovei ir gamybinei veiklai, vis dar gaminama deginant iškastinį kurą. Nuo to priklauso, kokia didelė yra tarša ir kaip spartėja klimato kaita. Norint plėtoti ir modernizuoti šiuolaikines elektros ir šilumos gamybos technologijas, reikia orientuotis į aplinkai draugišką ir pasaulyje vis labiau populiarėjantį "žaliąjį kursą". Šiuo aspektu dabar svarbu plėtoti atsinaujinančiais ištekliais pagrįstas energijos gamybos technologijas [1]. Greta saulės, vėjo ir hidro energetikos pasaulyje plėtojamos ir biokuro deginimu grindžiamos energijos gamybos technologijos. Bendrame 2021 metų sunaudoto kuro balanse biomasė sudarė apie 67 procentus, o iki 2050 metų norima visiškai atsisakyti iškastinio kuro vartojimo energijos gamyboje [2]. Kaip biokuras dažnai naudojamos miško kirtimo atliekos drožlių pavidale, kurias deginant kūrykloje susidaro drėgni dūmai. Dūmų drėgnumas priklauso nuo degimo procese susidariusio vandenilio ir biokure esančio vandens kiekio, kuris degimo džiovinimo ir degimo procese išsiskiria garo būsena.

Energetikoje ir pramonės technologijose yra pritaikomas skystojo kuro ir vandens įpurškimas į dujų srautą. Disperguotas skystasis kuras dažniausia deginamas, o vandens lašelių pritaikomumas yra platus. Vandens išpurškimą kondicionuoti orą [3], aušinti aukštos temperatūros dujų srautą ir slopinti ugnies frontą [4] jau galima laikyti tradicinėmis technologijomis. Nauja disperguoto vandens pritaikomumo sritis atsiskleidė šiuolaikinėje energetikoje mažinant iškastinio kuro naudojimą ir pereinant prie energijos gamybos atsinaujinančių išteklių [5]. Vanduo purškiamas degimui tiekiamam orui drėkinti, temperatūrai kūrykloje sumažinti ir išvengti šlakavimosi procesų, degimo produktams išvalyti nuo teršalų bei atgauti fazinių virsmų šilumą iš šalinamų drėgnų dūmų [6–8].

Skysčio įpurškimo technologijų efektyvumą apibrėžia lašelių fazinių virsmų procesai. Deginant skystąjį kurą svarbu, kad lašeliai kuo greičiau išgaruotų. Vandens įpurškimo į drėgnus dūmus technologiniai atvejais yra aktualus ir lašelių kondensacinis fazinių virsmų režimas. Įpurškiant vandenį tiekiamam orui pridėkinti, degimo procesui kūrykloje sureguliuoti ir toksogenų koncentraciją dūmuose sumažinti ar juos ataušinti kondensacinis lašelių režimas yra nepageidautinas. Tačiau fazinių virsmų šilumą iš šalinamų dūmų galima atgauti tik iškondensuojant iš jų vandens garą. Todėl efektyviai ir ekologiškai draugiškai aplinkai biokuro deginimo technologijai išvystyti yra būtinas geras įpurškiamo vandens lašelių visiško fazinių virsmų režimų ciklo dėsningumo pažinimas.

Galima išskirti keturis svarbius biokuro deginimo technologijai efektyvinti pritaikomus vandens įpurškimo į dūmų srautą technologinius atvejus: 1. Vandens įpurškimas į aukštos 800°C-1100°C temperatūros kūryklos dūmų srautą kartu įvedant skystuosius katalizatorius azoto oksidų koncentracijai sumažinti; 2. Vandens įpurškimas į šalinamų 150°C-200°C temperatūros dūmų srautą prieš kondensacinį ekonomaizerį jiems ataušinti iki artimos rasos taškui temperatūros; 3. Vandens įpurškimas kontaktiniame ekonomaizeryje į  $\approx 100 \rightarrow 40^\circ\text{C}$  temperatūros dūmų srautą jiems aušinti ir garui iš jų iškondensuoti; 4. Vandens įpurškimas  $\approx 100^\circ\text{C}$  dūmų srautą virš rekuperacinio ekonomaizerio retinės termo-hidrodinaminiam pernašos procesams vamzdeliuose suaktyvinti. Kiekvienu iš šių atvejų technologinį vandens įpurškimo tikslą užtikrina vandens lašelių šilumos ir masės mainų (ŠMM) procesai, tačiau jų kraštinės sąlygos pagal lašelių šildymą ir fazinius virsmus yra savitos. Svarbu, kad sudėtiniai pernašos procesai vyktų didžiausią jų spartą užtikrinančiose kraštinėse ŠMM sąlygose. Kraštinės ŠMM sąlygas apibrėžia dūmų srauto ir įpurškto vandens lašelių pradiniai  $P_0$  parametrai. Dūmų parametrus apibrėžia vandens technologinis įpurškimo atvejis, todėl optimalias ŠMM kraštines sąlygas galima sudaryti tik tinkamai įpurškus vandenį. Tam reikia gerai žinoti dūmų ir vandens lašelių dvifaziame sraute vykstančių sudėtinių ŠMM procesų dėsningumą.

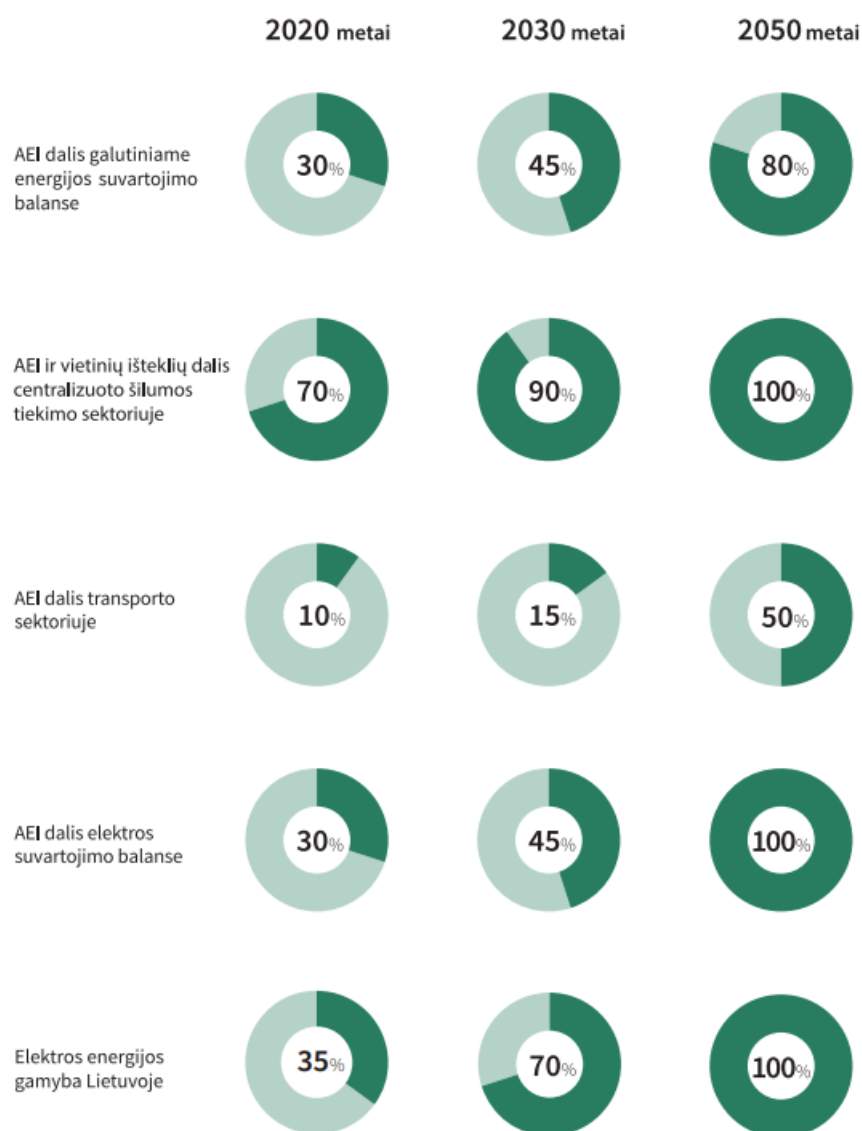
Nors vandens lašelių šilumos mainai ir faziniai virsmai pasaulyje yra plačiai tirti, tačiau poreikis jų dėsningumo gilesniam pažinimui drėgnų dūmų sraute išlieka dėl optimalaus biokuro degimo technologijos plėtojimo. Šiame baigiamojo magistro projekte toliau tęsiami tiriamieji darbai pritaikant skirtingus technologinius vandens lašelių išpurškimo būdus skirtingomis kraštinėmis sąlygomis ir atliekamos išsamios analizės gilesniam ŠMM procesų supratimui fazinių virsmų cikle. Baigiamojo magistro projekto tikslas sumodeliuoti lašelių sudėtinius šilumos ir masės mainus technologiniais vandens įpurškimo į biokuro kūryklų dūmus ir šalinamus dūmus prieš kondensacinį ekonomaizerį atvejais ir įvertinti dūmų temperatūros bei vandens išpurškimo dispersiškumo įtaką lašelių faziniams virsmams ir terminei būsenai bei pateikti praktines rekomendacijas biokuro deginimo technologijai efektyvinti. Pagrindiniai uždaviniai atlikus literatūros analizę sumodeliuoti vandens lašelių šilumokaitą ir fazinius virsmus biokuro dūmų sraute ir apibrėžti dūmų temperatūros ir vandens išpurškimo dispersiškumo įtaką lašelių šilumos mainų procesams, ištirti fazinių virsmų dėsningumus vandens įpurškimo į kūryklos dūmų srautą būdingose kraštinėse sąlygose ir lašelių fazinių virsmų dėsningumus vandens įpurškimo į šalinamus dūmus prieš kondensacinį ekonomaizerį būdingose kraštinėse sąlygose (dūmų parametrų ir vandens temperatūros ir dispersiškumo įtaka, slydimo poveikis lašelių terminei ir energinei būsenai). Rezultatus aptarti ir pateikti grafinėmis interpretacijomis.

## 1. Literatūros analizė

### 1.1. Energetikos sektoriaus strategijos, efektyvumo didinimo galimybės

Lietuvos energetikos tikslas yra užtikrinti valstybės, jos gyventojų ir verslo energetikos poreikius. Šalia žaliojo kurso normatyvų siekimo karinė situacija rytuose nepaliko kito kelio kaip tik dar sparčiau vystyti energetinės nepriklausomybės planą. Noras būti energetiškai nepriklausoma valstybe yra sudėtingas ir ilgas procesas, kuriam reikia aiškaus plano, užsibrėžtų tikslų ir strategijos kaip pasiekti norimus rezultatus. Šiame kelyje svarbu turėti energetikos sektoriaus viziją ir principus, bei strateginės kryptys, kuriomis užsibrėžiami tikslai ir uždaviniai, visa tai yra aprašyta Lietuvos Nacionalinėje energetinės nepriklausomybės strategijoje. Trumpai keturiais punktais apžvelgime kokios strategijos kryptis yra išskirtos ir kokiais būdais jas galima įgyvendinti:

- **konkurencingumo skatinimas** - efektyvaus ir ekologiško vartotojų šildymo sistemų įrengimas už prieinamą kainą, kuri užtikrintų centralizuoto šilumos tiekimo konkurencingumą su kitomis alternatyviomis šilumos tiekimo galimybėmis;
- **patikimumas** - patikimai tiekiamos energijos, kuri yra svarbi nacionaliniam saugumui, ekonomikos augimui ir visuomenės gerovei užtikrinimas. Lietuva yra svarbi šiaurės–pietų energijos koridoriaus dalis, jungiančios Suomiją ir Vidurio Europos šalis. Šalies energetinis saugumas yra užtikrinamas dalyvaujant ES energetikos infrastruktūros, rinkų ir sistemų veikloje, turint pakankamai elektros energijos generavimo šaltinių bei alternatyvių dujų tiekimo šaltinių;
- **įtakos klimato kaitai ir aplinkos oro taršai mažinimas (energijos taupymas ir žaliaji energetika)** - Energijos vartojimo efektyvumas pagerina valstybės gyventojų finansinę padėtį, didina verslo konkurencingumą, mažina išmetamų šiltnamio efektą sukeliančių dujų ir aplinkos oro taršalų kiekį bei pagerina aplinkos oro kokybę. Siekiama, kad energijos vartojimo efektyvumas ir atsinaujinantys energijos išteklių taptų kasdienės veiklos dalimi kiekvieno buitinio vartotojo, verslo ar pramonės įmonės, įsigyjančios elektrą, dujas, biokurą ar kitą kurą. Atsinaujinantys energijos išteklių yra perspektyviausias energetikos šaltinis vidaus energijos gamybai plėtoti, todėl tolesnė atsinaujinančių energijos išteklių plėtra ir energijos vartojimo efektyvumo didinimas, derinantys su aplinkos oro taršos mažinimu, bus skatinami finansinėmis ir nefinansinėmis priemonėmis;
- **šalies verslo dalyvavimas siekiant energetikos pažangos.** Lietuva siekia tapti energetikos technologijų gamintoja ir eksportuotoja, o ne importuotoja. Pastatų renovacijos programų įgyvendinimas, gamybos pramonės efektyvumo didinimas ir atsinaujinančių energijos išteklių panaudojimo skatinimas sukurs didelę rinką šioms paslaugoms ir padės kurti darbo vietas. Be to, bus galimybė vystyti inovatyvias technologijas mažinant išmetamų dujų kiekį ir aplinkos taršą bei plėtoti žmogiškuosius išteklius [9];



**1.1 pav.** Lietuvos energetinio sektoriaus siekiami rezultatai 2020, 2030 ir 2050 metams. [9]

Vykdamas šilumos ūkio srities plėtrą Lietuvoje, siekiama, kad iki 2020 metų 70 proc. visos centralizuotai tiekiamos šilumos būtų pagaminta iš atsinaujinančių ir vietinių energijos išteklių. Toliau, iki 2030 metų šis procentas turėtų siekti 90 proc., o iki 2050 metų - netgi 100 proc 1.1. pav. Be to, ne mažiau kaip 90 proc. miestuose esančių pastatų turėtų būti aprūpinti šiluma iš centralizuotai tiekiamų šilumos sistemų.

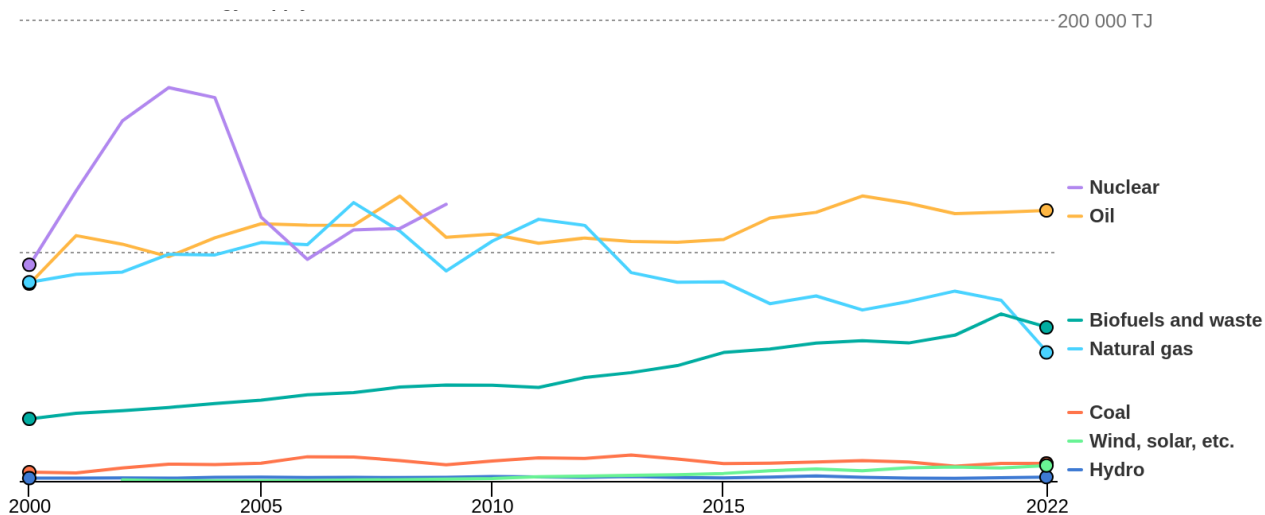
Labai svarbus faktorius energetikoje efektyvus energijos vartojimas. Efektyvus energijos vartojimas ir panaudojimas yra svarbi priemonė siekiant mažinti išmetamų šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekį, sumažinti įsiliejimą į aplinką ir taupyti išteklius. Šiems tikslams pasiekti įvairiuose sektoriuose galima taikyti šiuos veiksmus:

- pastatų energinio efektyvumo gerinimas: skatinti pastatų šilumos izoliacijos, langų ir durų keitimo bei šildymo sistemų modernizavimo programas, įdiegti efektyvias šildymo ir vėdinimo sistemas, diegti atsinaujinančių energijos šaltinių;

- transporto energetinio efektyvumo gerinimas: skatinti automobilių su mažesniu degalų sąnaudų suvartojimu pirkimą, plėtoti viešojo transporto sistemą, skatinti žmones naudoti dviračius ir pramoginius transporto priemones, auto parko elektrifikavimas, alternatyvių degalų naudojimas;
- pramonės energetinio efektyvumo gerinimas: skatinti pramonės įmones naudoti efektyvesnes bei aplinkai draugiškesnes gamybos technologijas, taikyti energijos taupymo priemones, diegti atsinaujinančių energijos šaltinių (pvz., saulės energijos) sistemas;
- žemės ūkio energetinio efektyvumo gerinimas: skatinti ūkininkus naudoti energiją taupančias technologijas, diegti atsinaujinančių energijos šaltinių, taip pat skatinti biologinių degalų gamybą;
- vartotojų švietimas ir informavimas: organizuoti nuolatinius mokymus ir informavimo kampanijas žmonėms apie energijos taupymo galimybes, skatinti gyventojus naudoti energiją taupančius prietaisus, šildymo sistemų reguliavimo būdus;
- teisinės ir ekonominės priemonės skatinti energetinį efektyvumą: tobulinti teisės aktus, kurie skatintų energijos taupymo priemones, įvesti mokesčių lengvatas ir skatinimo programas energijos taupymo iniciatyvoms [9];

## 1.2. Energetikos situacija Lietuvoje

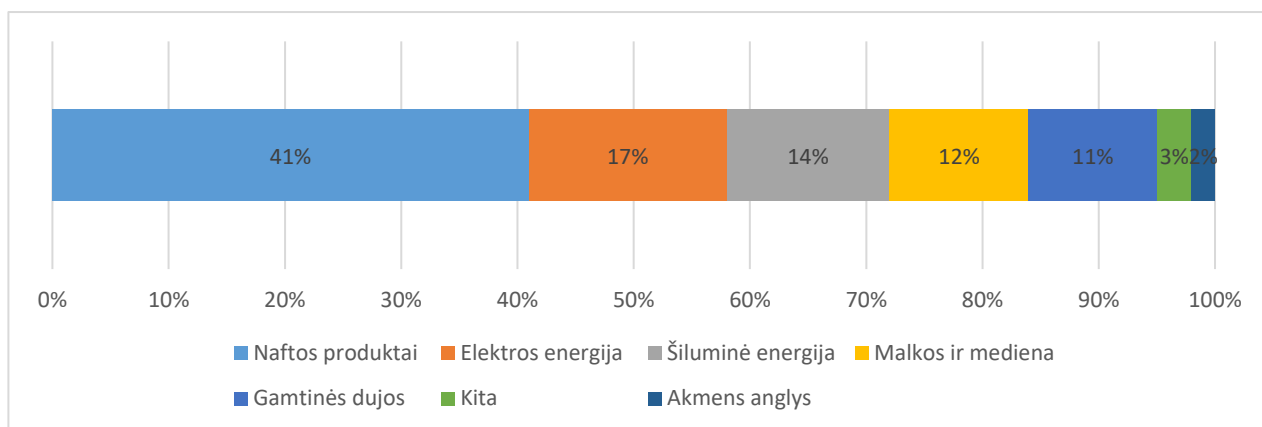
Per pastarąjį dešimtmetį Lietuvoje įvyko keletas energetikos permainų. Uždarius vienintelę atominę elektrinę, Lietuva iš gryniosios elektros energijos eksportuotojos tapo grynąja importuotoja. Lietuva importuoja didelę dalį elektros energijos poreikių, o bioenergija užima pirmaujančią vietą vidaus energijos tiekimo srityje 1.5 pav. Bet bendrame energijos suvartojimo balanse vis dar dominuoja naftos produktai 1.3pav. Iki 2030 m. Lietuva įsipareigojusi perpus sumažinti elektros energijos importą ir 70 proc. elektros energijos poreikio pasigaminti iš vietinių šaltinių. [10] Siekiant šių rezultatų svarbu išsigryninti problematiškiausias ir nuostolingiausias vietas, kurias būtų galima pagerinti ir sumažinti tiek iškastinio kuro panaudojimą energijos gamybai tiek neefektyvų energijos išnaudojimą pradedant nuo gamybos grandies ir baigiant vartotojais. 1.2 pav. pavaizduota Lietuvos energijos priklausomybės raida nuo naudojamo kuro rūšies per paskutinius 22 metus. Ryškiausi pokyčiai matomi trijose grafose, po atominės elektrinės uždarymo Lietuvoje nebuvo galimybių bei įrenginių gamintis elektros energiją, Lietuva elektros energijos sektoriuje tapo priklausoma nuo kaimyninių šalių, todėl grafike žymių pokyčių nesimato. Didžiausias pokytis matyti nuo 2011 metų, pradėjus įsirenginėti biokurą deginančius katilus, dujiniai katilai po truputėlį traukėsi į šoną ir tai puikiai atsispindi grafikuose, biokuro kreivės kilimas ir dujų vartojimo kreivės kritimas žemyn.



1.2 pav. Bendro energijos tiekimo raida Lietuvoje nuo 2000 m. [10]

### 1.2.1. Atsinaujinantys energijos šaltiniai

Atsinaujinantys energijos šaltiniai atlieka svarbų vaidmenį šilumos ir pramonės sektoriuose. Siekdamas dekarbonizacijos ir energijos taupymo tikslų, daugelis šalių skatina individualius namus ir pastatus pereiti nuo iškastinio kuro šildymo sistemų, pavyzdžiui, dujomis ar alyva kūrenamų katilų, prie tokių sistemų kaip šilumos siurbliai, kurios yra daug efektyvesnės ir gali būti maitinamos elektra iš mažai anglies dioksido į aplinką išskiriančių šaltinių. Tačiau vietovėse, kuriose šildymas priklauso nuo centralizuotų šilumos punktų arba kogeneracinių jėgainių, biokuro ir atliekų deginimas gali būti mažesnio anglies dioksido kiekio alternatyva iškastiniam kurui. Geoterminis šildymas taip pat gali užtikrinti atsinaujinančią, mažai anglies dioksido į aplinką išskiriančią šilumą, tačiau ją galima naudoti tik tam tikrose vietovėse, kuriose yra tinkama vulkaninė ar tektoninė veikla.



1.3 pav. Energijos suvartojimas pagal kuro rūšis Lietuvoje 2021 metais (%). [11]

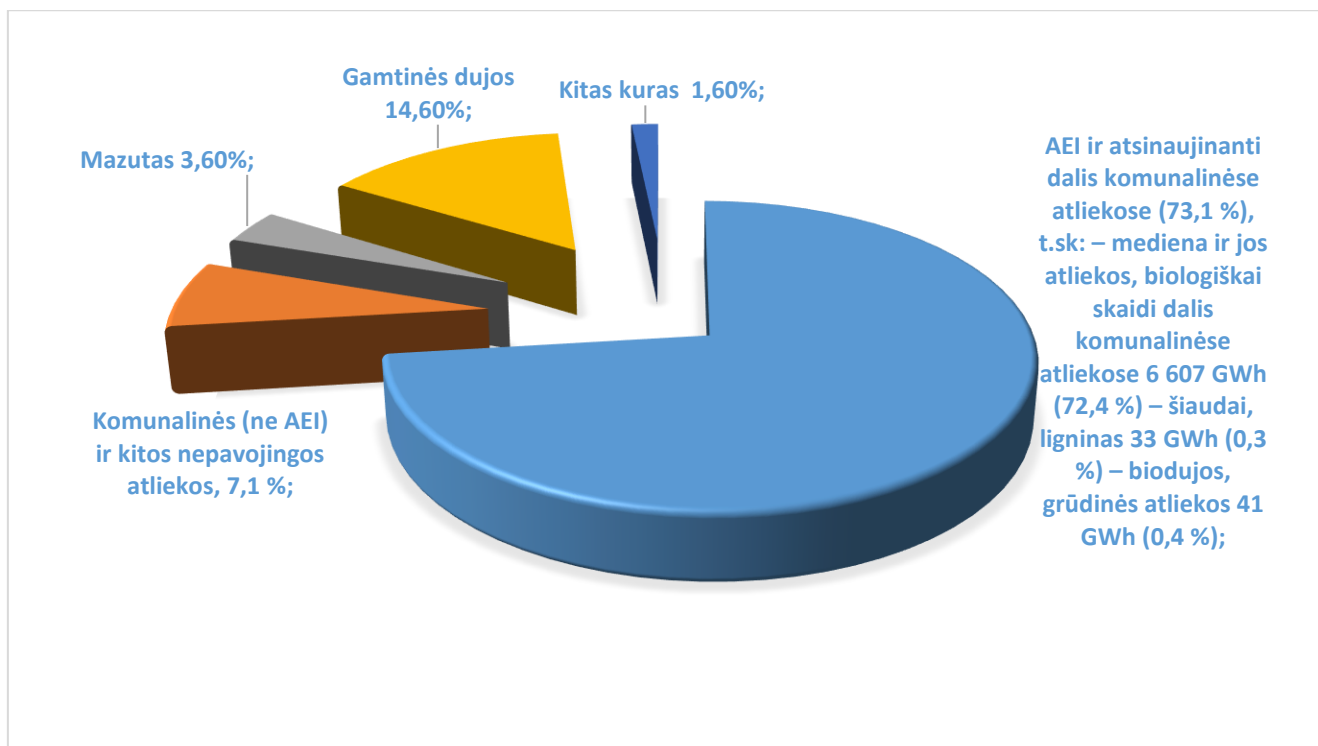
Atsinaujinantys šilumos šaltiniai mažiau įsitvirtino pramonėje, nes daugeliui svarbių pramoninių procesų, pavyzdžiui, plieno gamybai, reikia didesnės šilumos, nei galima pasiekti naudojant atsinaujinantį kurą. Šioms sritims dekarbonizuoti reikės naujų metodų ir technologijų. Atsinaujinančiųjų energijos išteklių dalis galutiniame energijos suvartojime Lietuvoje 2020 metais buvo 32%, nustatytas rodiklis buvo viršytas 2%. 2030 metams AEI suvartojimas bendrame energijos

balanse turėsime pasiekti net 45%, daugiausia pažangos tikimasi padaryti transporto sektoriuje. Plėtojant autoparko elektrifikavimo tinklą, vis daugiau žmonių renkasi elektrines transporto priemones, kurios pažangių technologijų dėka techninėmis galimybėmis nenusileidžia transporto priemonės su vidaus degimo varikliais. Plečiantis šiam tinklui lygiagrečiai didėja ir elektros poreikis kuris padengiamas įrengiant šiuolaikinius elektros generavimo šaltinius. Vieni populiariausių šiuo metu Lietuvoje yra saulės elektrinės, kurios generuoja energiją išnaudojant nieko nekainuojantį saulės šviesos šaltinį. Šiai plėtrai stiprią įtaką turėjo valstybės teikiamos paramos tiek fiziniams tiek juridiniams asmenims. Kitas besiplečiantis AEI tinklas – vėjo jėgainės. Dar prieš keletą metų buvęs gan retas vaizdinys Lietuvoje pastaruoju metu vis dažnėja, pavienės vėjo jėgainės atsiranda vis nuošalesnėse vietose, kuriose yra tinkamos sąlygos jas įrengti. Didelis pokytis šioje srityje turėtų įvykti pradėjus vykdyti jūrinio vėjo jėgainės parko Baltijos jūroje projektą, kuris išskirstytas į du etapus. Įgyvendinus pirmąją šio projekto dalį būtų įrengta 700 MW, tai yra apie 3TWh žaliosios elektros energijos, kas yra apie ketvirtadalis viso Lietuvos poreikio. Projekto duomenimis abiem projekto dalims Lietuvos elektros perdavimo tinkluose yra rezervuota apie 1,4 GW galios, kas sudarytų apie 50% viso elektros energijos poreikio [12]. Bet viskas nesiklosto taip kaip planuota, Lietuvos energetikos agentūros duomenimis jau antras šaukimas projekto įgyvendinimo pirkimui nepavyko. Būna laukti ir tikėtis, kad sprendimai bus priimti ir projektą pavyks įgyvendinti. Hidro energija Lietuvoje plėtoti sudėtinga dėl gan plokščio reljefo, šiai energijos rūšies plėtrai reikėtų didelių investicijų, kurių atsiperkamumas būtų neadekvatus finansiniu atžvilgiu.

### **1.3. Situacija CŠT sektoriuje**

Šalies centralizuoto šilumos tiekimo sistema yra svarbus energetikos sektoriaus komponentas, susijęs su elektros energetikos sistema ir kitomis infrastruktūromis. Gerai išvystytos centralizuoto šilumos tiekimo sistemos veikia visuose Lietuvos miestuose, kur šiluma aprūpina didžiąją dalį pastatų gyventojų. Daugiabučiai namai sudaro didžiąją dalį šilumos vartotojų, tačiau šiluma tiekama ir biudžetinėms įstaigoms bei verslo organizacijoms. 2021 metais centralizuotai tiekiamos pagamintos iš atsinaujinančių energijos šaltinio šilumos kiekis siekė 73.1 procentus, 14.6 % šilumos buvo pagaminta deginant gamtines dujas, kogeneracinės elektrinės pagamino tik 7.1 % šilumos 1.4 pav. 2020 metams užbrėžtas tikslas buvo centralizuotame šildyme buvo 70% šilumos pagaminta iš AEI, matome, kad Lietuvoje rodikliai buvo ne tik pasiekti, bet ir viršyti.





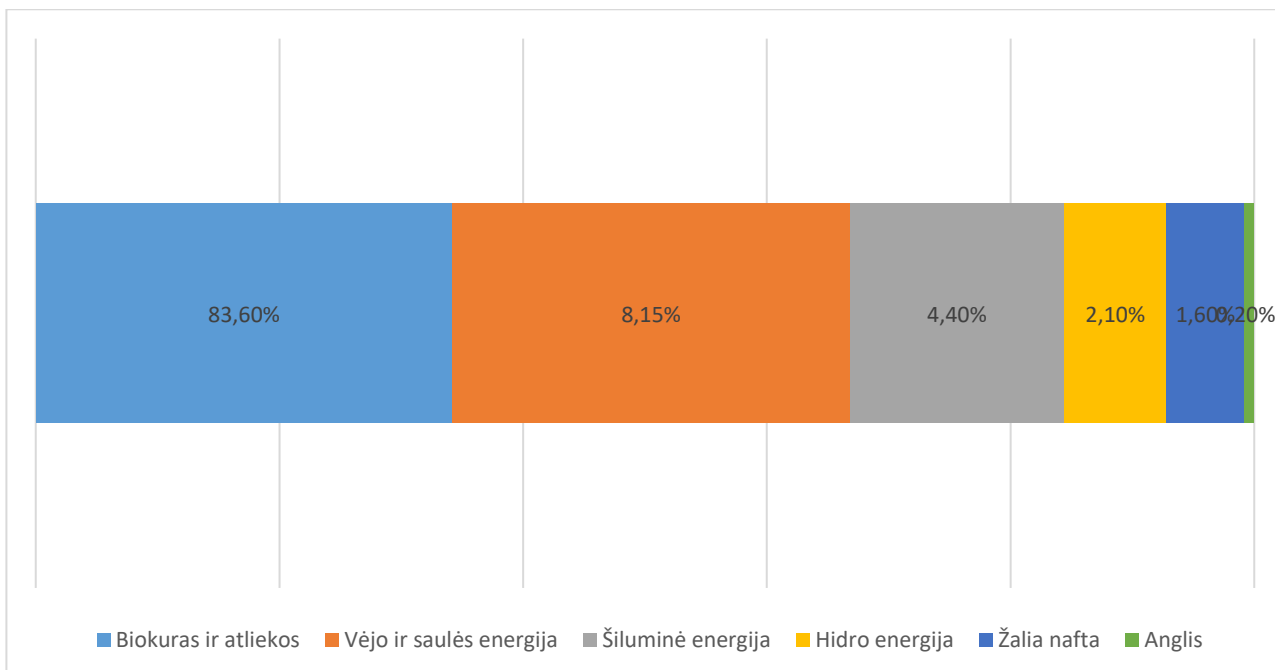
1.4 pav. Kuro sudėtis centralizuotai teikiamos šilumos gamyboje Lietuvoje. [12]

Nuo 2011 metų gamtinių dujų pakeitimas biokuru sparčiai mažino centralizuoto šilumos tiekimo kainą iki 2022 metų, kurių metų dėl vykdomų sankcijų rytų valstybėms stipriai išaugo tiek biokuro tiek gamtinių dujų kainos, kas lėmė didesnę dėmesį šilumos vartojimo efektyvumo problemos aktualumui. 2016 metais buvo pagaminta ir pateikta į tinklus 8,9 TWh šilumos energijos, o prognozuojama, kad ateityje šilumos tiekimas sistemoje bus patiekta 8,5 TWh 2030 metais ir 8,0 TWh 2050 metais [12]. 2022 metų duomenimis šiluminės energijos į tinklus buvo patiekta 8,6 TWh, šis kiekis yra labai artimas nustatytam 2030 metų normatyvui, nepaisant padidėjusio vartotojų skaičiaus. Tam įtakos turėjo vykstančios renovacijos, kurių metu seni ir neefektyviai šiluminę energiją vartojantys pastatai yra apšildomi, taip sumažinant pastato šilumos laidumo koeficientą, renovuojami šilumos punktai bei vidaus šilumos tiekimo sistemos įrengiant modernius ir efektyvesnius įrenginius leidžiančius pastato suvartojamos šilumos kiekį sumažinti iki 40%. Šiluminiai nuostoliai stipriai mažinami rekonstruojant šilumos tiekimo vamzdynus, kurių senos izoliacijos yra praradusios izoliacines savybes. Žinoma reikia įvertinti ir buvusią klimato situaciją, kuri taip pat turėjo didelę įtaką mažesniai šilumos suvartojimui. 2021 metais žiemos sezono vidutinė lauko oro temperatūra buvo  $-1,3^{\circ}\text{C}$ , o 2022 metais  $+0,5^{\circ}\text{C}$ , tai beveik  $2^{\circ}\text{C}$  [12] skirtumas, šis skirtumas turėjo ryškią įtaką bendram šilumos poreikiui.

#### 1.4. AEI CŠT sektoriuje

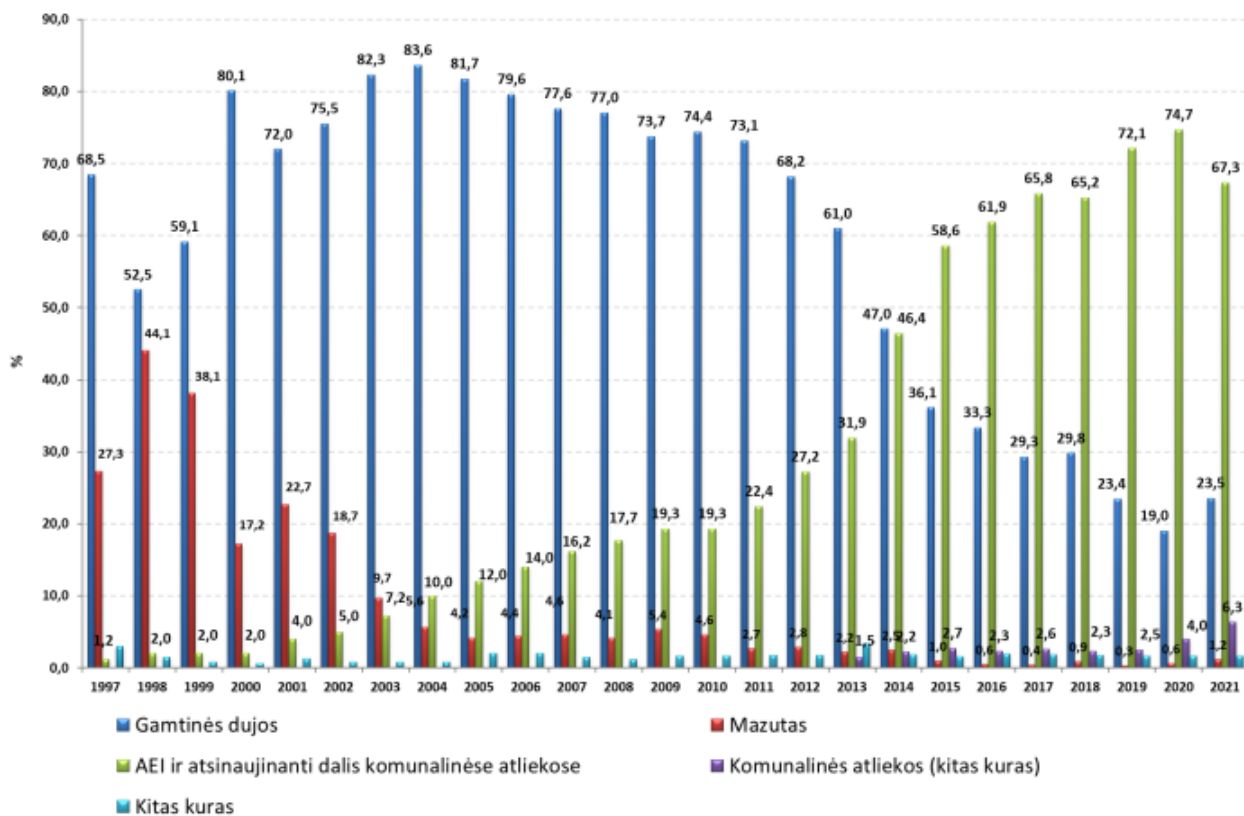
AEI dalis CŠT sektoriuje stipriai augti pradėjo nuo 2014 metų, pradėjus senus dujas deginančius katilus keisti naujais biokuro katilais. Nuo 2014 metų AEI suvartojamo kuro dalis nuo 46,4% pakilo iki 74,7% 1.6 pav., o gamtinių dujų sunaudojimas proporcingai krito žemyn nuo 47% iki 19%. Žvelgiant į grafiką 1.6 pav. 2021 metais AEI sunaudoto kuro dalis bendrame rodiklyje krito iki 67,3%, o dujų sunaudojimas kilo 23,5%. Šiam pokyčiui daugiausiai įtakos turėjo ypač šalti orai šildymo

sezono metu, kuriuo vidutinė lauko temperatūra buvo 4 laipsniais aukštesnė negu 2020 metais, todėl dengiant pikinius poreikius buvo deginamas iškastinis kuras ir taip mušamas AEI sunaudoto kiekio vidurkis. Prie itin šalto šildymo sezono prisidėjo ir nepriklausomų šilumos gamintojų (NŠG) deginančių biokurą gedimai, ko pasekoje teko kūrenti dujinius, dyzelinius arba mazutą naudojančius katilus nepertraukiamai šiluminės energijos gamybai. Tai parodė, kad būtina ir plėtoti AEI naudojančius įrenginius nepaisant jau esančių „gražių“ skaičių grafikuose. Iki 2030 metų AEI užsibrėžtas rodiklis yra 90 %, vertinant, kad nuo 2024 metų Lietuvoje yra 3 buitines atliekas deginančios katilinės, kurių bendra šiluminė galia yra 195 MW ir užima apie 8% visos galios procentinę dalį, pikams padengti reikės ieškoti alternatyvių ir aplinkai draugiškų įrenginių, kadangi dujų suvartojimas turės būti visiškai minimalus.



1.5 pav. Energijos gamyba šalies viduje, Lietuva, 2022 m. [10]

Šiems skaičiams pasiekti svarbu plėtoti biokuro katilinių tinklą mažuosiuose Lietuvos miestuose, tobulinti šilumos kaupimo technologijas, kurias panaudojus būtų galima gamintis energiją ne sezono metu, kuomet biokuro kaina yra ženkliai žemesnė arba šildymo sezono metu pilnai apkrauti biokurą deginančias katilines ir perteklinę energiją kaupti akumuliacinėse talpose iš kurių energija būtų paimama pikų metu. Taip pat reikia didžiosiose miesto katilinėse plėtoti absorbcinių siurblių įrengimus, kurie nors ir yra brangūs, bet labai efektyvūs ir greitai atsiperkantys.



1.6 pav. Sunaudotas kuras Lietuvos CŠT sektoriuje 1997–2021 metais. [2]

## 1.5. Atliekinės šilumos potencialas

Šiluminės jėgainės – sritis, kurioje neišnaudotas šiluminės energijos potencialas yra vienas didžiausių. Jėgainėse vykstančių šilumos gamybos procesų metu prarandama šiluma, kuri potencialiai gali būti surenkama ir panaudojama pakartotinai. Biokurą deginančios jėgainės vandens šildymo katilo šilumos nuostoliai sudaro 14-16% ir yra skirstomi 5 skiltis:

- išeinantys degimo produktai (q<sub>2</sub>);
- cheminis nesudegimas (q<sub>3</sub>);
- mechaninis nesudegimas (q<sub>4</sub>);
- nuo karštų paviršių (q<sub>5</sub>);
- su pelenais (q<sub>6</sub>);

**1.2.1 lentelė.** Biokurą deginančio katilo tipiniai nuostoliai. [14]

Šilumos nuostoliai	Tipinė reikšmė
q1. Katilo naudingai atleidžiamos šilumos dalis	84 - 86 proc.
q2. Šilumos nuostoliai dėl išeinančių degimo produktų	10 - 20 proc.
q3. Šilumos nuostoliai dėl cheminio nesudegimo	0,2 - 0,5 proc.
q4. Šilumos nuostoliai dėl mechaninio nesudegimo	>0,5 proc.
q5. Šilumos nuostoliai nuo karštų paviršių	2,0 - 3,5 proc.
q6. Šilumos nuostoliai su šalinamais pelenais	0,02 – 0,1 proc.

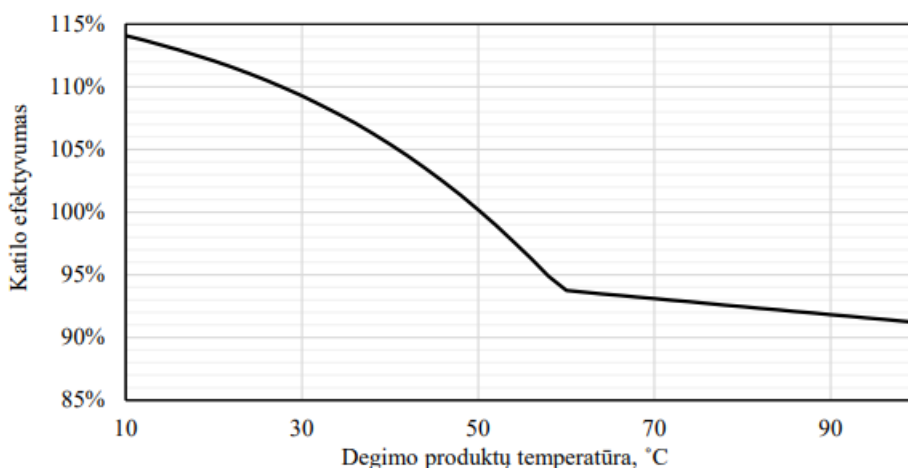
Iš 1 lentelės matome, kad reikšmingiausi biokuro katilo nuostolių dalis yra dėl išeinančių degimo produktų (q2). Šie nuostoliai susidaro dėl biokuro drėgnumo, kuris Lietuvos ūkiuose siekia apie 40%, tad reikia nemažai energijos panaudojama drėgmei išgarinti. Skaičiuojant procentaliai, šių nuostolių dalis katiluose sudaro apie 84% visų patiriamų. Šių nuostolių išvengti beveik neįmanoma, kadangi kuro džiovinimo kaštai būtų dideli ir būtų būtina turėti įdiegtas vandens išpurškimo sistemas aukščiausiam liepsnos taškui slopinti. Tačiau šiuos nuostolius kompensuoti puikiai padeda kondensaciniai ekonomaizeriai.

### **1.5.1. Dūmų kondensaciniai ekonomaizeriai**

Vandens išpurškimas yra efektyvus būdas įvairiose pramonės šakose pašalinti šilumą iš dūmų, tuo pačiu sumažinant šilumos nuostolius ir didinant sistemų energijos naudojimo efektyvumą. Vandens išpurškimo metodas yra pagrįstas vandens garų absorbcija ir kondensacijos reakcijomis, kurios įvyksta dūmų kanaluose. Vandens išpurškimo ekonomaizerių technologija gali būti pritaikyta šilumos atgavimo sistemoms, kurios naudojamos biokuro katilinėse. Šiose sistemose vandens išpurškimas padeda sumažinti dūmų temperatūrą, padidinti šilumos atgavimą ir pagerinti katilinės šiluminį efektyvumą. Taip pat vandens išpurškimo metodas leidžia sumažinti išmetamų teršalų kiekį ir pagerinti oro kokybę. [15]

Vis dėlto reikia atkreipti dėmesį į vandens išpurškimo proceso saugumą ir aplinkosaugos reikalavimus. Būtina užtikrinti, kad naudojamas vanduo būtų švarus ir tinkamai apdorotas, siekiant išvengti kenksmingų medžiagų išmetimo į aplinką. Be to, reikia atsižvelgti į reguliavimo sistemas, kurios kontroliuotų vandens ir dūmų santykį, siekiant maksimizuoti šilumos atgavimą ir našumą. Taikant vandens išpurškimo technologiją iš susikondensavusių dūmų pavyksta susigrąžinti netik didžiąją dalį vandens, bet ir surenkama šiluminė energija, kuri gali pašildyti iš tinklų grįžtantį termofikacinį vandenį iki 8 C laipsnių. Jose išgaruojant biokuro drėgmei ir degant vandeniliui yra generuojami aukšto drėgnumo dūmai, kuriuose vandens garo tūrinė dedamoji gali siekti net 40

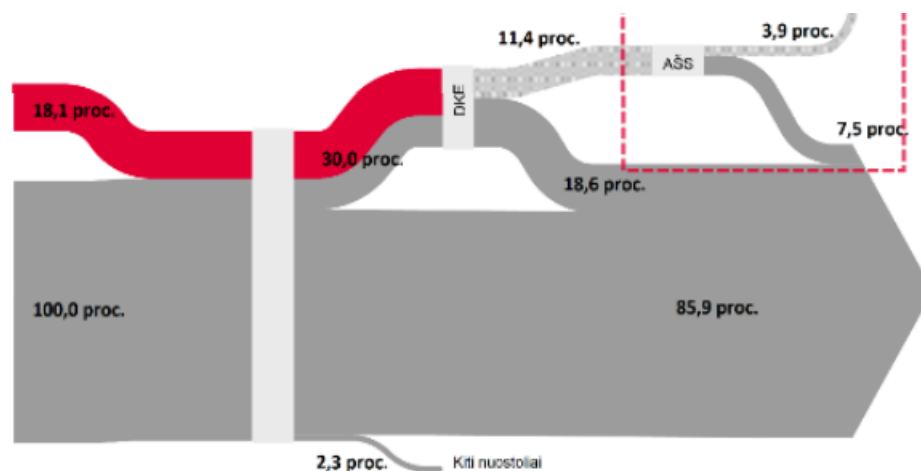
procentų. Todėl iš šalinamų į atmosferą dūmų kondensaciniame ekonomizeryje susigražinama vandens garo fazinių virsmų šiluma ir dūmai ataušinami bei išvalomi nuo dar juose likusių mikro kietųjų dalelių. Vandens šildymo katile atidirbusių dūmų temperatūra nukrenta iki 150-180 C laipsnių, drėgnumas lieka nepasikeitęs, tad turime sąlyginai aukštos temperatūros dūmus, kuriuos šalinti į aplinką būtų neracionalu. Tam dūmai nukreipiami į kondensacinį ekonomizerį, kuris jau tapo neatsiejama katilinių dalis. Šių įrenginių dėka dalis nuostolių (vandens garai) atgaunami pritaikius vandens išpurškimo technologiją kondensaciniame dūmų ekonomizeriuose. Šiame procese naudojamas grįžtamas šilumos tiekimo vanduo, kuris yra sąlyginai žemos temperatūros (apie 42 °C), kuris KDE pašyla iki 46-48 °C ir vėliau tiekimo tinklais keliauja į vandens šildymo katilą, kuriame jau sunaudojama mažiau energijos norint pasiekti reikiamus parametrus. Vienas svarbiausių ir daugiausiai įtakos darančių procesų vandens lašelių faziniai virsmai dūmų trakte. Vanduo pasižymi aukšta slapta garavimo šiluma, todėl keičiantis vandens agregatinei būsenai iš dujinės (vandens garai) į skystą (lašeliai) išsiskiria didelis šilumos kiekis, kuri surenkama KDE pagalba. Šių įrenginių pagalba atvėsinant degimo produktus ir jų šilumą panaudojant pašildyti žemos temperatūros grįžtamą termofikacinį vandenį katilo naudingumo koeficientą galima pasiekti daugiau negu 100%, kuo giliau atvėsiname dūmus ir surenkame atliekinę šiluminę energiją, tuo aukštesnį katilo naudingumo koeficientą galime pasiekti 1.7 pav.. Remiantis pateikiamais VERT duomenimis (šilumos generavimo techninių rodiklių suvestinės ataskaitos) , šiuo metu Lietuvoje bendra įrengtų ir veikiančių KDE galia yra 281 MW.



1.7 pav. Katilo efektyvumo priklausomybė nuo išmetamų dūmų temperatūros. [16]

### 1.5.2. Absorbciniai siurbliai

Kaip ir DKE taip ir absorbciniai siurbliai yra skirti surinkti atliekinę šiluminę energiją iš išmetamų dūmų, tik šis įrenginys dūmus gali ataušinti dar giliau ir dar labiau pakelti katilinės efektyvumą. Katilinėse su įrengtais DKE degimo produktai išleidimui į atmosferą paruošiami apie 45 °C, su tokiais rodikliais žiūrint į 1.7 pav. katilo efektyvumas siekia apie 103 procentus, tačiau greta KDE įsirengus absorbcinį siurblį ir degimo produktus ataušinant iki 20 °C, teoriškai katilo efektyvumas siektų net apie 112 procentų.



1.8 pav. Katilo efektyvumo ir nuostolių pasiskirstymo schema. [16]

Šiuo metu šią absorbcinių šilumos siurblių (AŠS) technologiją yra įsidięę ir sėkmingai naudoja Kauno, Klaipėdos, Panevėžio ir Jurbarko CŠT tinklus aptarnaujančios katilinės. Šilumos tiekėjai teigia, jog įsirengus AŠS katilų efektyvumai padidėjo net apie 7,5 proc. VERT atliktų tyrimų duomenimis iš realiosios praktikos šiuos įrenginius tikslingiausia įsirengti biokurą deginančiose katilinėse, kurių galia siekia min. 16 MW. Pasitelkdama pateiktais VERT ir Baltpool duomenimis Lietuvos respublikos energetikos ministerija atliko tyrimą, kuriose Lietuvoje dirbančiose biokuro katilinėse būtų tikslinga įrengti AŠS. Darytos prielaidos buvo, jog katilinių galia nemažesnė 16 MW, finansiniu atsiperkamumo aspektu buvo vertinama, kad katilinė veiks vidutiniškai 45 proc. nominalios galios bei į paskutinių metų faktiškai pagamintus šilumos kiekius. 1.9 pav. pateikiami potencialūs šilumos gamintojai, kuriems būtų naudinga įsirengti AŠS.

Šilumos gamintojas	Savivaldybė	Šiluminė galia, MW	AŠS potencialas, MW
UAB „Danpower Baltic Pakalniškių“	Vilniaus m. sav.	25,0	1,8
UAB "Pramonės energija"	Klaipėdos m. sav.	24,8	1,7
UAB "Danpower Baltic Biruliškių"	Kauno m. sav.	24,3	1,7
UAB "Danpower Baltic Biruliškių"	Kauno m. sav.	24,3	1,7
UAB „Danpower Baltic Paneriškių“	Vilniaus m. sav.	24,3	1,7
UAB „Danpower Baltic Paneriškių“	Vilniaus m. sav.	24,3	1,7
UAB "Forest Investment"	Vilniaus m. sav.	24,3	1,7
UAB "Forest Investment"	Vilniaus m. sav.	24,3	1,7
UAB „Danpower Baltic Zietelos“	Vilniaus m. sav.	23,8	1,7
AB "Ignitis gamyba"	Elektrėnų sav.	20,0	1,4
AB "Ignitis gamyba"	Elektrėnų sav.	20,0	1,4
UAB „Danpower Baltic Taika“	Kauno m. sav.	20,0	1,4
UAB "Aldec General"	Kauno m. sav.	20,0	1,4
UAB "Biokuro energija"	Panevėžio m. sav.	20,0	1,4
UAB "Litesko" fil. "Marijampolės šiluma"	Marijampolės sav.	16,0	1,1
<b>Iš viso:</b>		<b>335,4</b>	<b>23,5</b>

1.9 pav. AŠS potencialas biokuro katilinėse. [16]

## 1.6. Vandens dispergavimas į dūmų srautą

Vienas svarbiausių aspektų šilumos susigrąžinimui iš dūmų yra vandens lašelių išpurškimo technologija. Svarbu gerai suprasti vykstančius šilumokaitos procesus ir parinkti teisingą vandens lašelių išpurškimo būdą norint pasiekti geriausio galimo rezultato. Vandens lašeliai gali būti išpurškiami skirtingų diametrų, per dideli lašeliai, gali pilnai neišgaruoti, prasidėti koalescencija ir

nusisėsti ant metalinių konstrukcijų, kas yra nepageidautinas reiškinys galintis sukelti koroziją, taip pat svarbus išpurškiamų lašelių greitis, nuo kurio priklauso pernašos procesų efektyvumas.

Skysčio įpurškimo technologijų efektyvumą apibrėžia lašelių fazinių virsmų procesai. Deginant skystąjį kurą svarbu, kad lašeliai kuo greičiau išgaruotų. Vandens įpurškimo į drėgnus dūmus technologiniai atvejais yra aktualus ir lašelių kondensacinis fazinių virsmų režimas. Įpurškiant vandenį tiekiamam orui pridėkinti, degimo procesui kūrykloje sureguliuoti ir toksogenų koncentraciją dūmuose sumažinti ar juos ataušinti kondensacinis lašelių režimas yra nepageidautinas. Tačiau fazinių virsmų šilumą iš šalinamų dūmų galima atgauti tik išskondensuojant iš jų vandens garą. Todėl efektyviai ir ekologiškai draugiškai aplinkai biokuro deginimo technologijai išvystyti yra būtinas geras įpurškiamo vandens lašelių visiško fazinių virsmų režimų ciklo dėsningumo pažinimas.

$$\tau \equiv 0 \rightarrow \tau_{ko} \rightarrow \tau_e \rightarrow \tau_f. \quad (1.1)$$

Lašelių fazinių virsmų pradžia sutapatinama su vandens įpurškimu ( $\tau = 0$ ), o pabaiga apibrėžiama su lašelių išgaravimu ( $\tau = \tau_f$ ). Šis  $\tau \equiv 0 \rightarrow \tau_f$  laikotarpis apibrėžia biokuro dūmų sraute įpurškto vandens lašelių fazinių virsmų trukmę ir apima kondensacinį  $\tau \equiv 0 \rightarrow \tau_{ko}$ , pereinamojo garavimo  $\tau \equiv \tau_{ko} \rightarrow \tau_e$  ir pusiausviro  $\tau \equiv \tau_e \rightarrow \tau_f$ . Lašelių kondensacinis režimas vyksta įpurškiant vandenį, kurio temperatūra yra žemesnės už rasos taško  $t_{dp}$  temperatūrą. Pereinamojo garavimo režime lašeliai pašyla iki pusiausviro garavimui būdingos  $t_e$  temperatūros. Pusiausviro garavimo metu visa lašeliams suteikta šiluma garina vandenį.

Esant lašelių fazinių virsmų režimams vyksta intensyvi sudėtinių pernašos procesų sąveika [17], kurią apibrėžia skirtingi faktoriai. Lašelių slydimo dujų sraute suintensyvina konvecinį šildymą ir sukelia priverstinę skysčio cirkuliaciją juose [18]. Fazinius virsmus visuomet lydintis Stefano hidrodinaminis srautas silpnina lašelių konvecinį šildymą, tačiau spartina jų garavimą [19]. Pusskaidriame vandenyje sugeriamas spinduliuotės srautas veikia lašelių šilumą ir suformuoja juose neigiamo gradiento temperatūros lauką [20]. Šių faktorių visuma apibrėžia vandens lašelių terminės ir energinės būsenos kitimą bei fazinių virsmų dinamiką. Biokuro deginimo technologijoje kaip tradicinius galima įvardinti vandens įpurškimo į kūryklos dūmų srautą ir kondensaciniame ekonomiaizeryje atvejus. Perspektyvus vandens įpurškimas į šalinamų dūmų srautą dar prieš kondensacinį ekonomiaizerį siekiant dūmus ataušinti iki artimos rasos taško temperatūros ir užtikrinti efektyvų fazinių virsmų šilumos atgavimą. Kiekvienu vandens įpurškimo atveju lašelių šilumos ir masės mainų kraštinės sąlygos yra skirtingos. Todėl pernašos procesų sąveiką apibrėžiančių faktorių įtaka taip pat kinta. Į tai būtina atsižvelgti parenkant vandens įpurškimo režimus, kad užtikrinti efektyvią biokuro deginimo technologiją. Lašelių fazinių virsmų skaitinis modeliavimas sudėtinio konvecinio - spinduliuotės šildymo atveju yra labai imlus mašininio skaičiavimo laikui dėl poreikio atsižvelgti į spektrinį spinduliuotės sugėrimą pusskaidriame vandenyje [20,21].

### **1.6.1. Vandens išpurškimo pritaikomumas ir jo technologiniai atvejai biokuro deginimo įrenginiuose**

Iškastinio kuro suvartojimo ir išmetamų teršalų išmetimui į aplinką mažinimui gamyboje svarbu skirti daugiau dėmesio AEI technologijų diegimui. Šiluminės energijos gavyboje iškastinį kurą puikiai keičia biokurą deginantys įrenginiai, tik kitaip nei kiti iškastiniai kurai, biokuras yra gan drėgnas. Kuro degimo metu dalis energijos skiriama drėgmei išgarinti, taip kūrykloje susidaro garas, taip pat garai atsiranda degimo procese iš kuro sudėties išsiskyrus vandeniliui. Iš kūryklos ištekamųjų dūmų

temperatūra svyruoja nuo 800°C iki 1100°C, o drėgnumas pagal vandens garo tūrinę dalį ( $X_v$ ) jų dujų mišinyje gali siekti iki 0.4 ir daugiau. Technologiniuose procesuose vandens šildymo katiluose iš dūmų atgaunant šilumą jų drėgnumas nepasikeičia, dūmai būna tik atvėsinti iki 150 – 200 °C. Išmesti į aplinką nevalytus ir tokios temperatūros dūmus turinčius daug šiluminio potencialo nebūtų racionalus sprendimas. Taip pat dūmuose didelė tūrinė dalis yra garas, kurį iškondensavus atgaunamas netik vanduo, bet fazinių virsmų šilumą. Šiam procesui svarbus technologinis vandens išpurškimo panaudojimas, bet pradėk nuo pradžių ir aptarkime visus galimus vandens lašelių išpurškimus biokurą deginančiuose įrenginiuose. Galima išskirti keturis svarbius vandens įpurškimo į dūmų srautą technologinius atvejus:

1. vandens įpurškimas į aukštos 800°C-1100°C temperatūros kūryklos dūmų srautą kartu įvedant skystuosius katalizatorius azoto oksidų koncentracijai sumažinti. Pirmuoju vandens įpurškimo technologiniu atveju svarbus kuo spartesnis lašelių išgaravimas, kad išvengtų nepageidaujamos juodųjų metalų sienelių korozijos vandens lašelių kontakto su jomis atveju. Dėl aukštos temperatūros dūmų ir įkaitusių suodžių padengtų sienelių spinduliavimo vyksta sudėtinis konvekcinis-radiacinis lašelių šildymas ir vyrauja pusiausviro garavimo fazinių virsmų režimas;
2. Antruoju vandens įpurškimo atveju dūmai įteka į spalvotų metalų šilumokaitį, todėl lašelių pilnas išgaravimas nėra būtinas. Taip pat vyksta sudėtinis konvekcinis-spindulinis lašelių šildymas, tačiau dėl ženkliai žemesnės dūmų temperatūros spinduliavimo įtaka silpnesnė ir vyrauja šilumos konvekcija;
3. Vandens įpurškimas į šalinamų 150°C-200°C temperatūros dūmų srautą prieš kondensacinį ekonomaizerį. Iš vandens šildymo katilo ir sausų valymo įrenginių ištekančių degimo produktų temperatūra yra daug aukštesnė už rasos taško temperatūrą. Todėl dūmus naudinga prieš kondensacinį ekonomaizerį ataušinti iki artimos rasos taškui temperatūros, kad garo kondensacijos procesas šilumokaityje prasidėtų kuo greičiau. Išpurškus į dūmus surinktą ir technologiškai išvalytą 40°C kondensatą jie papildomai yra pridrekinami, didėjant dūmų drėgnumui didėja rasos taško temperatūra, kuri gali pasiekti arti 80°C ir tai palanku vandeniui pašildyti šilumokaityje iki aukštesnės temperatūros. Šiame išpurškimo procese svarbus kuo intensyvesnis įpurškiamo vandens išgarinimas, tačiau reikalavimas lašeliams išgaruoti pilnai nėra keliamas, kadangi pačiame kondensaciniame ekonomaizeryje taip pat dar purškiamas vanduo. Čia vandens įpurškimo tikslas priklauso nuo kondensacinio ekonomaizerio tipo. Įtekančių dūmų ataušinimas iki artimos rasos taškui temperatūros dar prieš rekuperacinį ekonomaizerį šiuo atveju yra ypatingai svarbus, kadangi įrenginio vamzdeliai yra brangūs (pagaminti iš spalvotų metalų). Todėl dalis ekonomaizerio sekcijos skirta tik dūmų ataušinimui iki rasos taško temperatūros ir tuo pačiu suvėlinti garo fazinių virsmų atgavimą iš dūmų yra ypač neefektyvu, kadangi bereikalingai iššaukia dideles papildomas investicijas. O tai stabdo kondensacinių technologijų diegimą plačiame mažo našumo katilinių tinkle. Vandens išpurškimo prieš KDE ir jame atvejais spinduliavimo įtaką galima paneigti, todėl lašeliai šildomi konvekcija;
4. Vandens įpurškimas kontaktiniame ekonomaizeryje į  $\approx 100 \rightarrow 40^\circ\text{C}$  temperatūros dūmų srautą jiems aušinti ir garui iš jų iškondensuoti. Vandens įpurškimas  $\approx 100^\circ\text{C}$  dūmų srautą virš rekuperacinio ekonomaizerio retinės termohidrodinaminiamis pernašos procesams vamzdeliuose suaktyvinti. Kiekvienu iš šių atvejų technologinį vandens įpurškimo tikslą



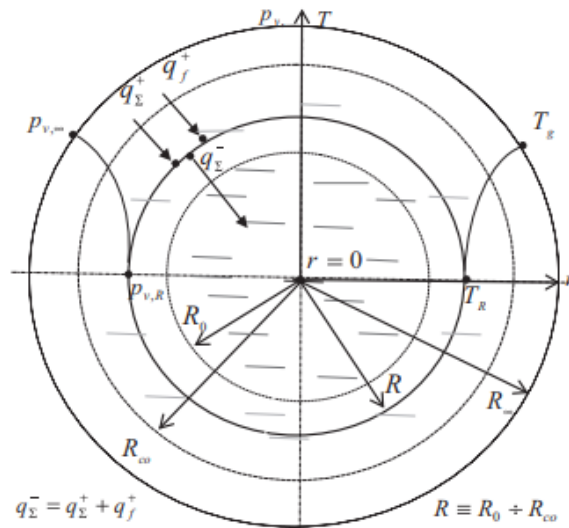
užtikrina vandens lašelių šilumos ir masės mainų (ŠMM) procesai, tačiau jų kraštinės sąlygos pagal lašelių šildymą ir fazinius virsmus yra savitos. Kontaktiniame ekonomizaizeryje yra pageidautinas tik kondensacinis fazinių virsmų režimas, todėl tenka kontroliuoti, kad vandens lašeliai nepašiltų virš rasos taško temperatūros. Tuo tarpu rekuperacinio kondensacinio ekonomizaizerio atveju yra pageidautina, kad lašelių išgaravimas virš retinės būtų neženklus.

### **1.7. Technologinio tiriamojo atveju išgryninimas ir jiems būdingų kraštinių sąlygų apibrėžimas prieš kondensacinį ekonomizaizerį ir į kūryklą**

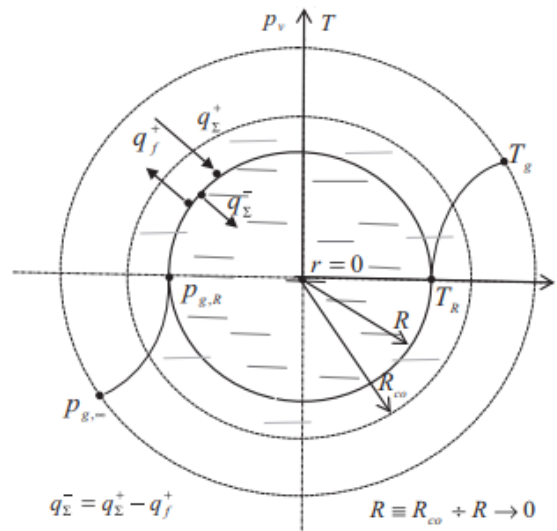
Šio darbo tikslas yra apibrėžti vykstančių pernašos procesus turimą technologinį kondensatą išpurškus prieš ekonomizaizerį. Parinkus būdingas realias kraštines sąlygas, programa „LAŠAS“ susimodeliuoti apsibrėžtą situaciją bei atlikti rezultatų apiforminimą grafinėmis išraiškomis. Konkretus lašelio fazinių virsmų atvejis šioje programoje apibrėžiamas parinkus septynis įvesties (INPUT) parametrus: Oro srauto temperatūrą  $t_d$  [°C], vandens garo tūrine  $X_{g,d}$  dalimi išreikštą drėgnumą, tekėjimo  $w_d$  [m/s] greitį ir  $p_d$  [MPa] slėgį, vandens lašelio  $t_{l,0}$  [°C] temperatūrą, pradinį  $2R$  [μm] skersmenį ir pradinį lašelių išpurškimo greitį  $w_{l,0}$  [m/s]. Iškeliamam darbo tikslui pasiekti sumodeliuoti 40°C temperatūros, dviejų skirtingų pradinių skersmenų  $2R=(1)$  150 ir  $(2)$  400 μm vandens lašelių trys fazinių virsmų režimų  $\tau=0 \rightarrow \tau_f$  ciklai (1.1), jiems šylant 800°C ir 150°C temperatūros aukšto ( $X_v=0.3$ ) drėgnumo 10 m/s greičiu tekančiame oro sraute, kai  $p_d=0.1$  MPa,  $w_{l,0}=40$  m/s.

### **1.8. Vandens lašelių šilumos ir masės mainų tyrimų apžvalginė analizė**

Bendruoju sudėtinės šilumokaitos atveju, suminį šilumos srautą lašelio paviršiaus pusėse sudaro radiacinis ir konvekcinis šilumos perdavimas:  $q_\Sigma = q_r + q_c$ . Tačiau pastebėta, kad radiacinis perdavimas yra labai mažas, todėl lašelio išorinė ir vidinė šilumokaita daugiausia apibrėžiama konvekciniu šilumos srauto tankiais  $q_c^+(\tau)$  ir  $q_c^-(\tau)$ . Lašelio išorinį konvekcinį šildymo intensyvumą nulemia dujų ir lašelio paviršiaus temperatūros skirtumas, lašelio slydimas dujose bei Stefano hidrodinaminis srautas, lydintis fazinius virsmus. Lašelio vidinę šilumokaitą apibrėžia temperatūros lauko gradientas, kuriame įtaką daro vandens cirkuliacija lašelyje. Vandens priverstinę cirkuliaciją dujų sraute slystančiame lašelyje lemia trinties jėgos, kylančios paviršiuje. [22]



1.10 pav. Lašelio energinė schema fazinių virsmų kondensaciniame režime.



1.11 pav. Lašelio energinė schema fazinių virsmų pereinamojo garavimo režime.

Fazinių virsmų režimuose lašelių energetinę būseną apibūdina šilumos perdavimo ir fazės virsmo šilumos srautai ant lašelio paviršiaus (1.10 pav. ir 1.11 pav.). Lašelio išorinio šildymo intensyvumą fazinių virsmų cikle apibrėžia tiekiamo suminio šilumos srauto tankio funkcija  $q_{\Sigma}^{-}(\tau)$ . Šilumos perdavimas lašeliams vyksta laidumu („k“, kondukcinis šilumos perdavimo būdas), konvekciniu būdu („c“), sudėtinu šildymu laidumu ir spinduliavimu („k + r“) ir šildymu konvekcija su spinduliavimu („c + r“). Sudėtiniai šildymo būdai tiriama vandens išpurškime į aukštos temperatūros dūmus, žemoje temperatūroje prieš kondensacinį ekonomaizerį spinduliavimas neturi ryškios įtakos rezultatams, todėl jį laikome nereikšmingu ir skaičiavimuose neatsižvelgiame [23]. Slystančiam lašeliui dujų sraute, gaunamas šilumos srautas yra apibrėžiamas konvekcijos ir laidumo komponentais Slystančio lašelio paviršiuje atsirandančios trinties jėgos sukelia priverstinę skysčio cirkuliaciją, todėl esant ryškiai spinduliavimo įtakai ir reikia įvertinti šilumos pernašos procesus vykstančius lašelyje dėl priverstinės cirkuliacijos. [22]

## 2. Metodinė dalis

### 2.1. MBP problematikos technologinis aktualumas ir tiriamieji atvejai

Plėtojant pažangias energijos gamybos technologijas, svarbu ne tik didinti jų efektyvumą, bet ir yra būtina įmanomai sumažinti aplinkos taršą. Šiuo metu vartojimui ir buičiai reikalingos energijos ženkli dalis yra generuojama deginant iškastinį kūrą, kas iššaukia vis dar per didelę gamtos taršą ir daro jaučiamą įtaką klimato kaitai [24]. Iškastinio kuro naudojimą energijai generuoti įgalina sumažinti atsinaujinančius išteklius naudojančių technologijų plėtra [25, 26]. Miškingose ir išvystyto žemės ūkio šalyse yra populiaru energiją generuoti vystant biokuro deginimo technologijas, kai medžio atliekų drožlės arba granulės sudeginamos katiluose šiluminei ir elektros energijai gaminti [27-29]. Energetikoje taip pat naudojamas ir skystasis biokuras, kuris sudeginamas disperguotame pavidale [30], o jo emulsijos vis plačiau pritaikomos kaip kuras vidaus degimo varikliuose [31-33].

Išgaruojant drėgmei, transformuojantis kure esančio azoto junginiams bei degant kure esančiam vandeniliui ir angliai, biokuro degimo procese yra generuojami kietosioms dalelėms bei nuodingoms dujoms užteršti dūmai, kurių drėgnumas pagal vandens tūrinę dalį gali siekti net penkiasdešimt procentų [34]. Todėl biokuro deginimo efektyvumą ir mažą aplinkos taršą galima užtikrinti tik kokybišku degimo produktų išvalymu filtruose ir skruberiuose [35-38] bei atgaunant šilumą iš šalinamų dūmų pažangiose kondensacinių ekonomaizerių technologijose [38-40]. Po biokuro katilo technologiškai ataušinti iki 150-180°C temperatūros dūmai prieš išmetant juos į atmosferą nukreipiami į kondensacinį ekonomaizerį, kur ataušinti orientaciniai iki ≈40°C temperatūros ir išsausinami pagal vandens garo tūrinę dalį iki ≈7 procentų. Kondensacinio ekonomaizerio technologijoje pritaikius šilumos siurbį, šalinamus dūmus galima dar daugiau ataušinti ir išsausinti [41].

Šiame magistro baigiamajame darbe ištirti du biokuro deginimo technologijai efektyvinti ir jos taršai mažinti svarbūs **vandens įpurškimo į kūryklos dūmų srautą ir vandens įpurškimo į šalinamų dūmų srautą prieš kondensacinį ekonomaizerį atvejai**. Šie atvejai ryškiai skiriasi pagal dūmų srauto temperatūrą ir vandens įpurškimo tikslą, tačiau technologiškai patogų įpurškšti iš kondensacinio ekonomaizerio surinktą ir išvalytą 40°C temperatūros kondensatą.

Pirmuoju atveju iš kūryklos ištekančių dūmų srauto temperatūra yra aukšta ir priklauso nuo kuro deginimo terminio režimo. Šlakavimosi reiškiniams išvengti technologiškai priimtina yra laikomas 800°C→900°C iš kūryklos ištekančių dūmų temperatūros intervalas. Kartu su įpurškiamu vandeniu į kūryklos dūmų srautą įvedami skystieji katalizatoriai, kad paspartinti chemines reakcijas ir sumažinti azoto  $NO_x$  koncentraciją dūmuose, t. y. įmanomai sumažinti atmosferos užterštumą toksogenais. Šiuo atveju yra svarbu, kad vandens lašeliai išgaruotų kuo tolygiau visame dūmų sraute, tačiau būtų išvengta jų kontakto su dūmų srautą ribojančiomis juodųjų metalų sienelėmis, pastarųjų korozijai išvengti.

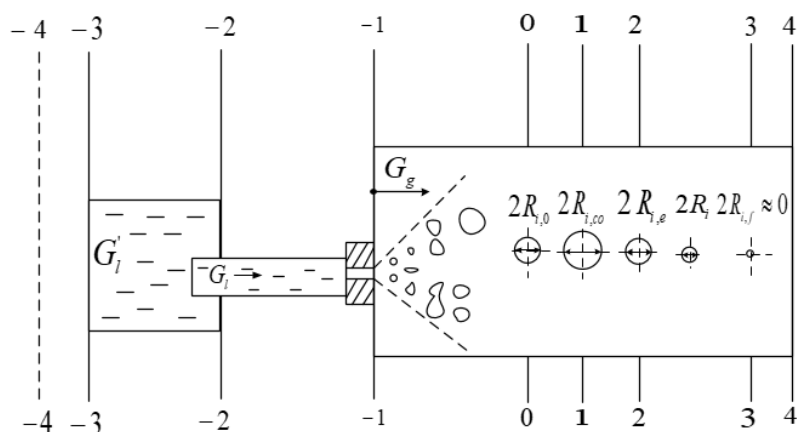
Antruoju atveju vanduo įpurškiamas į technologiškai iki 150°C→180°C temperatūros ataušintų dūmų srautą, kurio buvęs drėgnumas po pirmojo vandens įpurškimo atvejo praktiškai būna nepakitęs, kadangi įprastiniuose šilumokaičiuose kondensacinių procesų siekiama išvengti. Šiuo vandens įpurškimo atveju dūmus siekiama ataušinti iki artimo rasos taškui temperatūros, kad jiems įtekėjus į kondensacinį ekonomaizerį, garo kondensacija parsidėtų kuo greičiau. Svarbu ir tai, kad išgaruojant įpurkšto vandens lašeliams dūmų drėgnumas išauga ir rasos taško temperatūra taip pat padidėja. Tai

sudaro galimybę termofikacinį vandenį kondensaciniame ekonomaizeryje pašildyti iki aukštesnės temperatūros.

Abiem vandens įpurškimo į biokuro dūmų srautą technologiniais atvejais skaitiškai sumodeliuotas pilnas lašelių fazinių virsmų režimų ciklas (FVRC) ir pateikta pagrindinių ŠMM parametrų grafinė bei fizikinė interpretacija terminų, energinių bei fazinių virsmų parametrų grupėse ir išryškinti jų dinamikos bendrieji dėsniumai. Abiem įpurškimo atvejams ištirti pritaikytas FVC režimams universalus lašelių šilumos mainų ir fazinių virsmų bei judėjimo dinamikos matematinis modelis ir panaudota KTU EK programa „LAŠAS“.

## 2.2. Vandens įpurškimas ir lašelių FVR ciklas

Vandens dispergavimo atvejai apibrėžti pagal 2.1 paveiksle pateiktą principinę technologinę schemą:



2.1 pav. Vandens dispergavimo proceso bei dūmų ir lašelių dvifazio srauto susiformavimo principinė geometrinė interpretacija. [42]

Principinėje 2.1 pav. schemoje galima apjungti visus su vandeniu susijusius technologinius atvejus, kurie laike apibrėžiami laiko skalėje  $\tau \equiv -\infty \rightarrow \infty$  sąlyginai išskirtais ribiniais  $-4 \rightarrow +4$  pjūviais:

- laikotarpis  $\tau \equiv \tau_{-4} \rightarrow \tau_{-3}$  apibrėžia su atmosferinio vandens tūriais susijusius atvejus, kurie užtikrina technologinio vandens poreikius;
- laikotarpis  $\tau \equiv \tau_{-3} \rightarrow \tau_{-2}$  apibrėžia vandens didelių tūrių pritaikymo technologinius atvejus;
- laikotarpis  $\tau \equiv \tau_{-2} \rightarrow \tau_{-1}$  apibrėžia vandens didelio tūrio parengimo dispergavimui procesą;
- laikotarpis  $\tau \equiv \tau_{-1} \rightarrow \tau_0$  apibrėžia vandens tūrio dispergavimo procesą, kuriame vanduo veikiamas dinaminė jėgų suskaidomas į baigtinį skaičių mažesnių tūrelių (2.1 pav.). Dispergavimo procese susidarantys skysčio tūreliai gali susilieti ar toliau dar skaidytis į mažesnius, tam tikromis sąlygomis gali vykti ir sprogdus jų garavimas, kol galiausia laiko momentu  $\tau \equiv \tau_0$  susiformuoja apibrėžto dispersiškumo lašelių ir juos nešančių dujų dvifazis srautas;
- laikotarpis  $\tau \equiv \tau_0 \rightarrow \tau_1$  apibrėžia galimą lašelių kondensacinį fazinių virsmų režimą, kuriame lašeliai auga jų paviršiuje kondensuojantis vandens garai;
- laikotarpis  $\tau \equiv \tau_1 \rightarrow \tau_2$  apibrėžia lašelių pereinamojo garavimo režimą, kuriame lašeliams teikiama šiluminė energija juos šildo ir garina vandenį;

- laikotarpis  $\tau \equiv \tau_2 \rightarrow \tau_3$  apibrėžia lašelių pusiausviro garavimo režimą, kuriame lašeliams teikiama šiluminė energija tik garina vandenį;
- laiko  $\tau \equiv \tau_3$  momentu lašeliai išgaruoja, todėl laikotarpis  $\tau \equiv \tau_3 \rightarrow \tau_4$  apibrėžia papildomai pridėkusio ir dalinai ataušusio vienfazio dujų srauto technologijas.

Dispergavus vandenį, pasikeičia dideliems jo tūriams būdingos pernašos procesų vyksmo sąlygos. Šildomas dideliame tūryje bet koks skystis, taip pat ir vanduo, pašyla iki soties būsenai būdingos  $t_s$  temperatūros ir užverda. Soties būsenos temperatūra priklauso nuo skysčio prigimties aplinkos slėgio. Verdančio skysčio terminė būsena nepakinta kol išgaruoja visas skystis, jeigu aplinkos slėgis nekinta.

Dispergavus skystį į lašelius, artėjama link nano-technologijoms būdingų kraštinių sąlygų. Esminis į lašelius disperguoto vandens terminės būsenos kitimo savitumas yra tas, jog maži jo tūreliai/lašeliai šildomi neužverda. Tai reiškia, jog pusiausvirą terminę būseną lašeliai pasiekia prie tam tikros būdingos  $t_e$  temperatūros, kuri yra žemesnės už soties būsenos  $t_s$  temperatūrą.

Disperguoto skysčio tūrelių pagal dydį susiskirstymas yra artimas Gausso dėsniiui, t. y. smulkiųjų ir stambiųjų tūrelių koncentracija yra mažiausia, o vidutinio stambumo – didžiausia. Veikiami inercinių, trinties ir gravitacinių jėgų, disperguoto skysčio tūreliai yra deformuoti, todėl, griežtu vertinimu, susiformuojančių lašelių forma nėra sferinė. Todėl šilumos ir masės mainų lokaliniai parametrai atskiro lašelio paviršiuje yra saviti.

Vandens įpurškimo technologijų efektyvumą apibrėžia dujų ir lašelių sraute vykstančių fazinių virsmų procesų vidutiniai parametrai. Todėl lašelių šilumos mainų ir fazinių virsmų tyrime pritaikomas sferinio lašelio modelis. Susiformuojantis mažas tūrelis  $V_{sk}$  [m<sup>3</sup>] prilyginamas sferinio lašelio tūriui  $V_l$  [m<sup>3</sup>]. Tuomet lašelių srauto dispersiškumas apibrėžiamas pagal individualius pradinius ekvivalentinius lašelių skersmenis:

$$d_{ek,o} \equiv 2R_0 = 2 \sqrt[3]{\frac{3 V_{sk,0}}{4 \pi}} . \quad (2.1)$$

Į dūmų srautą įpurkšto vandens skysčio lašelių terminę būseną bei fazinius virsmus apibrėžia sudėtinių šilumos ir masės mainų (ŠMM) procesų intensyvi tarpusavio sąveika. Kaip „sąveika“ yra suvokiama kartu vykstančių sudėtinių šilumos mainų, fazinių virsmų ir termohidrodinaminių procesų tarpusavio poveikis, dėl kurio gali pakisti atskiro individualaus pernašos proceso vyksmo greitis. Sąveikos tarp atskirų pernašos procesų intensyvumas ryškiai priklauso nuo lašelio fazinių virsmų režimo [19]. Vandens įpurškimo į biokuro dūmus technologiniais atvejais, lašelių sproguos garavimas yra nebūdingas, todėl lašelių fazinius virsmus biokuro dūmų sraute atstovauja 1 paveikslo principinėje schemoje apibrėžti 0→3 pjūviai laiko skalėje  $\tau \equiv 0 \rightarrow \infty$ . Vandens lašelių fazinių virsmų dūmų sraute analizė pradedama laiko skalės „0“ pjūvyje numatant, kad tuomet  $\tau \equiv \tau_0 = 0$ . Laikoma, jog visi dūmų ir juose susiformavusių lašelių kraštines ŠMM sąlygas apibrėžiantys  $P_0$  parametrai yra apibrėžti. Tuomet laikotarpyje  $\tau \equiv \tau_0 \rightarrow \tau_3$  lašelių paviršiuje vykstantys fazinių virsmų procesai pateikiami kondensacinio  $\tau \equiv \tau_0 \rightarrow \tau_1$ , pereinamojo garavimo  $\tau \equiv \tau_1 \rightarrow \tau_2$  ir pusiausviro garavimo  $\tau \equiv \tau_2 \rightarrow \tau_3$  nuosekliai įvykstančių fazinių virsmų režimų ciklu (FVRC):

$$\tau \equiv 0 \rightarrow \tau_{co} \rightarrow \tau_e \rightarrow \tau_{faz} . \quad (2.2)$$

Modeliuojant biokuro dūmų sraute įpurkšto vandens lašelių FVR ciklą (2.2) daromos prielaidos:

- Lašelis suvokiamas kaip sfera, kurios ekvivalentinis skersmuo apibrėžiamas yra apibrėžiamas pagal išraišką (2.1);
- Radialine  $r$  koordinate apibrėžtų lašelio koncentrinė pūvių vidutinę temperatūrą aprašo nestacionariojo temperatūros lauko  $T_l(r, \tau)$  funkcija, kuri tenkina išraiškos (4) reikalavimą;
- Lašelių išoriniams konvekciniam pernašos procesams galioja Reinoldso kriterijaus analogijos teorija;
- Išorinio spinduliavimo intensyvumą apibrėžia dūmų temperatūrą turinčių sienelių spinduliavimas ir dėl daugkartinio atspindžio lašelių ansamblyje į atskiro lašelių krentančios spinduliuotės intensyvumas prilygsta juodo kūno spinduliuotei;
- Pernašos procesams galioja kvazistacionarumo sąlyga, t. y. momentinis proceso greitis prilygsta stacionariųjų procesų greičiui, apibrėžtam prie momentinių ŠMM kraštinių sąlygų;
- Lašelių dispersiškumas užtikrina pernašos procesų neįtakumą Knudseno sluoksnio įtakai;
- Kontakto tarp skystosios diskretinės ir vientisos dujinės fazių temperatūra lygi lašelių paviršiaus temperatūrai;
- Dėl vykstančių lašelių ŠMM procesų dūmų parametrai nepakinta, todėl skirtingo dispersiškumo lašeliams galioja "vienišo" savito ekvivalentinio skersmens lašelio modelis.

### 2.3. Lašelių fazinių virsmų ir judėjimo dūmų sraute modelis

Atskiro lašelio faziniai virsmai aprašyti garavimo dinamikos lygtimi, kuri susieja lašelio masės  $M_l$  [kg] kitimą FVC režimuose su garo srauto  $g_v$  [kg/s] dinamika [43]. Į lašelio paviršių kondensaciniame režime pritekantis garo srautas sąlyginai laikomas neigiamu, o garavimo režime nutekantis garo srautas laikomas teigiamu. Tuomet garavimo dinamikos lygtis tampa universalia visiems FVC režimams:

$$\frac{dM_l(\tau)}{d\tau} = -g_v(\tau) \quad (2.3a)$$

Atskiro lašelio masės kitimą apibrėžia tik jo paviršiuje vykstantys faziniai virsmai, kai jų galimas susidūrimas ir savaiminis suirimas paneigiamas. Lašelio tūrio kitimui papildomą įtaką turės šylančio/auštančio vandens lašelyje plėtimasis/traukimasis, todėl (2.3) lygtis pateikiama taip:

$$\frac{4}{3} \pi \frac{d}{d\tau} [\rho_l(\tau) R^3(\tau)] = -g_v(\tau) \quad (2.3b)$$

Garavimo dinamikos lygtyje (2.3b) vidutinis garo srautas lašelio paviršiuje apibrėžtas kaip Šervudo  $Sh = 2R\beta_v/D_{vd}$  kriterijaus funkcija ir aprašytas pagal difuzijos modifikuotą Fiko dėsnį, kuriame Stefano hidrodinaminio srauto įtaka įvertinta Spoldingo masės pernašos parametro  $B_M$  funkcija pagal [44] rekomendacijas:

$$g_{v,R} = 2\pi R \rho_{vd} D_{vd} \bar{Sh} \cdot \ln(1 + B_M); \quad (2.4a)$$

$$\bar{Sh} = Sh \left[ (1 + B_M)^{0.7} \frac{\ln(1 + B_M)}{B_M} \right]; \quad (2.4b)$$

$$Sh = 1 + (1 + Re Sc)^{1/3} \cdot f(Re); \quad f(Re < 1) = 1; \quad f(1 \leq Re \leq 400) = Re^{0.077}; \quad (2.4c)$$

$$B_M = \frac{Y_{v,R} - Y_{v,d}}{1 - Y_{v,R}} \quad (2.4d)$$

Čia:  $g_v$  – garo srautas, kg/s;  $Sh$  – Šervudo kriterijus;  $\bar{Sh}$  – modifikuotas Šervudo kriterijus, kad atsižvelgti į Stefano hidrodinaminio srauto įtaką garo srautui;  $Sc = \nu/D_{vd}$  – Šmidto kriterijus;  $\nu$  – garo ir dūmų mišinio kinematinės klampos koeficientas,  $m^2/s$ ;  $D_{vd}$  – garo difuzijos koeficientas dujose,  $m^2/s$ ;  $Re$  – modifikuotas Reinoldso kriterijus lašeliui, kai tankis apibrėžiamas pagal dūmų “ $d$ ” sąlygas, o dinaminės klampos koeficientas parenkamas pagal dūmų ir garo mišinio prie lašelio “ $vd$ ” sąlygas;  $Pr$  – Prandtlio kriterijus lašeliui, kuris parenkamas pagal “ $1/3$ ” taisyklę apibrėžiamam garo ir dujų mišiniui;  $B_M$  – Spoldingo masės pernašos parametras, įvertinantis Stefano hidrodinaminio srauto įtaką;  $Y_{v,R}$  – vandens garo masinė dalis dujų mišinyje prie lašelio;  $Y_{v,d}$  – vandens garo masinė dalis dūmuose.

Atskiro lašelio individualus momentinis greitis aprašytas judėjimo dinamikos dujų sraute diferencialine lygtimi [45]:

$$\frac{dw_l}{d\tau} = \frac{3}{16} \frac{\mu_d}{\rho_l} \frac{w_d - w_l}{R^2} C_l Re_\infty; \quad (2.5a)$$

$$C_l = \frac{24 + 4.8 Re^{0.63}}{(1 + B_T)^{0.2} Re}. \quad (2.5b)$$

Čia:  $w_l$  – lašelio momentinis greitis, m/s;  $w_d$  – dūmų greitis, m/s;  $\mu_d$  – dūmų dinaminės klampos koeficientas, Pa s;  $\rho_l$  – lašelio vandens tankis,  $kg/m^3$ ;  $R$  – sferinio lašelio spindulys, m;  $C_l$  – lašelio pilnojo pasipriešinimo koeficientas;  $Re_\infty$  – Reinoldso kriterijus lašeliui, kai fizikinės savybės apibrėžiamos pagal dūmų “ $d$ ” sąlygas;  $Re$  – modifikuotas Reinoldso kriterijus lašeliui;  $B_T$  – Stefano hidrodinaminio srauto įtaką įvertinantis Spoldingo šilumos pernašos parametras.

#### 2.4. Lašelio terminės ir energinės būsenos lašelių FVC režimuose modelis

Lašelių šilumos mainų ir fazinių virsmų procesai FVC režimuose yra dėsningi ir apibrėžti lašelių terminės ir energinės būsenos savita dinamika. Atskiro lašelio terminės būsenos kitimas FVC cikle (2.2) apibrėžtas pagal nestacionarųjį temperatūros lauką, kuris aprašytas laiko ir radialinės koordinatės funkcija:

$$T_l \equiv T(\tau, r), \quad (2.6a)$$

kai galioja temperatūros susiskirstymo lašelyje simetriškumą radialinės  $r$  [m] koordinatės atžvilgiu apibrėžianti sąlyga:

$$\left. \frac{\partial T(\tau, r)}{\partial r} \right|_{r=0} = 0. \quad (2.6b)$$

Lašelių terminėi būsenai FVC režimuose apibrėžti yra svarbios temperatūros lauko  $T(\tau, r)$  trys būdingos temperatūros:

- Lašelio paviršiaus temperatūra, kuri aprašyta laikine  $T_R(\tau)$  funkcija:

$$T_R(\tau) \equiv T(\tau, r = R), \quad (2.7a)$$

- Lašelio centro temperatūra, kuri aprašyta laikinė  $T_C(\tau)$  funkcija:

$$T_C(\tau) \equiv T(\tau, r=0), \quad (2.7b)$$

- Lašelio masės vidutinė temperatūra, kuri aprašyta laikinė  $T_{l,m}(\tau)$  funkcija:

$$T_{l,m}(\tau) \equiv \frac{\int_0^R \rho_l(\tau, r) \cdot c_{p,l}(\tau, r) \cdot T_l(\tau, r) \cdot r^3 dr}{\int_0^R \rho_l(\tau, r) \cdot c_{p,l}(\tau, r) \cdot r^3 dr}. \quad (2.7c)$$

Lašelio temperatūros lauko  $T_l(\tau, r)$  funkcija aprašyta pagal sudėtinio šilumos plitimo lašelyje spinduliavimu ir laidumu modelį [46]:

$$T_l(\tau, r) = T_R(\tau) + \frac{2}{r} \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{n\pi r}{R} \int_0^{\tau} f_{n,\tau} \exp \left[ -a \left( \frac{n\pi}{R} \right)^2 (\tau - \tau_*) \right] d\tau_*; \quad (2.8a)$$

Kiekviename begalinės sumos  $n$  naryje esančia laikinio integralo  $f_n$  funkcija atsižvelgta į lašelio paviršiaus temperatūros kitimo spartos ir lokalinio spinduliuotės srauto susiskirstymo lašelyje įtaką:

$$f_{n,\tau} = \frac{(-1)^n}{n\pi} R \frac{dT_R}{d\tau} + \frac{1}{R\rho_l c_{p,l}} \int_0^R \left( \sin \frac{n\pi r_*}{R} - \frac{n\pi r_*}{R} \cos \frac{n\pi r_*}{R} \right) q_{r,l}(\tau_*, r_*) dr_*. \quad (2.8b)$$

Lašelio terminės ir energinės būsenos ryšiai išryškinti yra svarbus temperatūros lašelyje gradientas  $\text{grad} T_R$  [K/m], kuris aprašytas radialinės koordinatės  $r$  [m] atžvilgiu diferencijuojant temperatūros lauko (2.6a) lygtį ir pritaikant  $r=R$  reikalavimą:

$$\text{grad} T_R(\tau) \equiv \left. \frac{\partial T(\tau, r)}{\partial r} \right|_{r=R}; \quad (2.8c)$$

$$\left. \frac{\partial T(\tau, r)}{\partial r} \right|_{r=R} = \frac{2\pi}{R^2} \sum_{n=1}^{\infty} n (-1)^n \int_0^{\tau} f_{n,\tau} \exp \left[ -a \left( \frac{n\pi}{R} \right)^2 (\tau - \tau_*) \right] d\tau_*; \quad (2.8d)$$

Čia:  $T_l(r, \tau)$  – lokalinės temperatūros lašelyje kitimą aprašanti nestacionariojo temperatūros lauko funkcija, K;  $\text{grad} T_R$  – temperatūros lašelyje gradientas, K/m;  $T_R$  – lašelio paviršiaus temperatūra, K;  $n$  – begalinės sumos nario indeksas;  $r$  – radialinė koordinatė, m;  $\tau$  – laikas, s;  $a$  – temperatūrinis koeficientas,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $R$  – lašelio tūriui ekvivalentiškos sferos spindulys, m;  $\rho_l$  – vandens tankis,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $c_{p,l}$  – vandens savitoji šiluma,  $\text{J}/(\text{kg K})$ ;  $q_{r,l}$  – lokalinio spinduliuotės srauto lašelyje tankis,  $\text{W}/\text{m}^2$ , kuris apibrėžtas pagal spektrinį spinduliuotės pusskaidrėje sferoje modelį [46], kuris įgalina įvertinti veidrodiniame lašelio paviršiuje vykstančius šviesos atspindžio ir lūžio efektus, apibrėžtu vandens spektriniu kompleksiniu lūžio rodikliu [47].

Lašeliams slystant dūmų sraute, paviršiuje kyla trinties jėgos, kurios atskirame lašelyje gali iššaukti priverstinę vandens cirkuliaciją. Į vandens cirkuliacijos galimą įtaką temperatūros laukui lašelyje atsižvelgta išraiškose (2.8) vandens temperatūrinį koeficientą  $a$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] pakeitus efektyviuoju temperatūriniu koeficientu  $a_{ef}$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]:



$$a|_{ef} = a \cdot k_c; a| = \frac{\lambda}{\rho c_p}; \quad (2.9a)$$

$$k_c(\text{Pe}_l \leq 1) = 1; \text{Pe}_l = \text{Re}_l \text{Pr}_l; \quad (2.9b)$$

$$k_c(\text{Pe}_l > 1) = 1.86 + \tanh\left(2.245 \log_{10} \frac{\text{Pe}_l}{30}\right). \quad (2.9c)$$

Čia:  $a$  – vandens temperatūrinis koeficientas,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $a_{ef}$  – vandens priverstinės cirkuliacijos įtaką įvertinantis efektyvusis temperatūrinis koeficientas,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $\lambda$  – vandens šilumos laidžio koeficientas,  $\text{W}/(\text{m K})$ ;  $k_c$  – konvekcinio šilumos plitimo suintensyvėjimą lašelyje dėl priverstinės vandens cirkuliacijos įvertinantis efektyviojo šilumos laidumo parametras;  $\text{Pe}_l$  – Pekle kriterijus lašeliui;  $\text{Pr}_l$  – Prandtlio kriterijus lašeliui;  $\text{Re}_l$  – Reinoldso kriterijus lašeliui, kuris apibrėžiamas pagal trinties jėgų iššauktą vandens tekėjimo lašelio paviršiuje galimai didžiausią greitį, pastarąjį aprašius pagal darbo [44] rekomendacijas.

Lašelio energinės būsenos kitimas apibrėžtas šilumos srautų jo paviršiuje dinamika FVC režimuose. Lašelio energinė ir terminė būsena susietos prie lašelio paviršiau pritekančių ir nutekančių šilumos srautų balanso lygtimi, aprašančia ir lašelio paviršiaus temperatūros kitimą FVC režimuose:

$$T_R(\tau \equiv 0 \rightarrow \tau_f) \leftrightarrow q_{c,d}(\tau) + \vec{q}_{c,l}(\tau) + \vec{q}_f(\tau) = 0. \quad (2.10)$$

Tiriamaisiais atvejais dūmų temperatūra yra aukštesnė už vandens soties būsenos temperatūrą ir visuose FVC režimuose galioja  $t_d > t_R$  sąlyga. Todėl dūmų konvekcinės šilumos  $q_{c,d}$  srautas  $[\text{W}/\text{m}^2]$  balanso lygtyje (2.10) pateiktas kaip skaliaras ir aprašytas pagal modifikuotą šilumos atidavimo dėsnį:

$$q_{c,d} = \alpha(t_d - t_R) \cdot f_{B_T} \cong \lambda_{vd} \frac{\text{Nu}}{2R} (t_d - t_R) \cdot \frac{\ln(1+B_T)}{B_T} \quad (2.11a)$$

Nuselto kriterijus lašeliui, kai neįvertinama fazinių virsmų įtaka konvekciniame šildyme, aprašytas pagal empirinį modelį [44]:

$$\text{Nu} = 1 + (1 + \text{Re Pr})^{1/3} \cdot f(\text{Re}); f(\text{Re} < 1) = 1; f(\text{Re} \geq 1) = \text{Re}^{0.077}. \quad (2.11b)$$

$$\text{Re} = 2R \frac{\rho_d \cdot w_{ld}}{\mu_{vd}}; \quad (2.11c)$$

Stefano hidrodinaminio srauto įtaką įvertinantis Spoldingo šilumos pernašos parametras  $B_T$  aprašytas lašelio FVC režimams universalia empirine išraiška [46]:

$$B_T = \frac{c_{p,vd}(t_d - t_R)}{L} \frac{q_f}{q_{c,d}} \equiv \frac{c_{p,vd}(t_d - t_R)}{L} \left(1 + \frac{q_{c,l}}{q_{c,d}}\right) \quad (2.12)$$

Išraiškoje (2.11a) vandens garo ir dūmų mišinio prie lašelio šilumos laidumo koeficientas  $\lambda_{vd}$   $[\text{W}/(\text{m K})]$ , o išraiškoje (2.12) savitoji šiluma  $c_{p,vd}$   $[\text{J}/\text{kg}]$ , parenkami pagal “1/3” taisyklę tūrine vandens garo dalimi  $X_{vd}$  ir temperatūra  $t_{vd}$  apibrėžtam garo ir dūmų mišiniui prie lašelio:

$$X_{vd} = X_{v,R} + \frac{1}{3} \cdot (X_{v,d} - X_{v,R}) \quad (2.13a)$$

$$X_v = \frac{p_v}{p_d}. \quad (2.13b)$$

$$t_{vd} = t_R + \frac{1}{3} \cdot (t_d - t_R). \quad (2.13b)$$

Čia:  $\alpha$  – konvekcinio šilumos atidavimo lašeliui koeficientas,  $W/(m^2K)$ ;  $t_d$  – dūmų temperatūra,  $^{\circ}C$ ;  $t_R$  – lašelio paviršiaus temperatūra,  $^{\circ}C$ ;  $B_T$  – Spoldingo šilumos pernašos parametras;  $Nu$  – Nuselto kriterijus negaruojančiai sferai;  $Re$  – modifikuotas Reinoldso kriterijus lašeliui, aprašomas (2.11c) išraiška;  $\rho_d$  – dūmų tankis,  $kg/kg$ ,  $\mu_{vd}$  – dinaminės klampos koeficientas,  $Pa \cdot s$ , kuris parenkamas pagal “1/3” taisyklę apibrėžiamam garo ir dujų mišiniui prie lašelio;  $Pr$  – Prandtlio kriterijus lašeliui, kuris parenkamas pagal “1/3” taisyklę apibrėžiamam garo ir dujų mišiniui;  $c_{p,vd}$  – savitoji šiluma,  $J/(kg \cdot K)$ , kuri pagal “1/3” taisyklę apibrėžiamam garo ir dujų mišiniui prie lašelio;  $L$  – vandens fazinių virsmų šiluma,  $J/kg$ ,  $q_{c,d}$  – konvekcinės šilumos srauto į lašelį tankis,  $W/m^2$ ;  $q_f$  – fazinių virsmų lašelio paviršiuje šilumos srauto tankis,  $W/m^2$ ;  $q_{c,l}$  – konvekcinės šilumos srauto lašelyje tankis,  $W/m^2$ ;  $t_{vd}$  – būdinga vandens garo ir dūmų mišinio prie lašelio temperatūra,  $^{\circ}C$ ;  $X_{vd}$  – vandens garo tūrinė dalis būdingame garo ir dūmų mišinyje prie lašelio;  $\lambda_{vd}$  – vandens garo ir dūmų būdingo mišinio prie lašelio šilumos laidumo koeficientas  $\lambda_{vd} [W/(m \cdot K)]$ .

Konvekcinės šilumos srauto tekėjimo kryptis lašelyje priklauso nuo temperatūros lauko gradiento: kol lašelio paviršiaus temperatūra yra aukštesnė už vidinių sluoksnių temperatūrą, tol apskaičiuotasis gradientas yra teigiamas ir šiluma plinta į lašelio vidų; kai spinduliavimo poveikyje centriniai lašelio sluoksniai pašyla iki aukštesnės temperatūros [46], tuomet pagal (2.8d) išraišką apskaičiuotasis gradientas lašelyje yra neigiamas ir šiluma iš lašelio plinta į jo paviršių. Todėl konvekcinės šilumos lašelyje  $q_{c,l}$  srautas  $[W/m^2]$  balanso lygtyje (2.10) pateiktas kaip vektorinis dydis. Į jo vektoriaus krypties galimus pokyčius FVC režimuose atsižvelgta pagal (2.8) modelį apibrėžtu gradientu, o į vandens cirkuliavimo galimą įtaką atsižvelgta efektyviuoju šilumos laidžio  $\lambda_{ef}$  koeficientu modifikuotame Furje šilumos laidumo dėsnyje:

$$q_{c,l} = -\lambda_{ef} \left. \frac{\partial T_l(\tau, r)}{\partial r} \right|_{r=R}, \quad \lambda_{ef} = k_c \lambda. \quad (2.14)$$

Fazinių virsmų šilumos srauto tekėjimo kryptis priklauso nuo garo srauto tekėjimo krypties, todėl šilumos  $q_f$  srautas balanso lygtyje (2.10) taip pat pateiktas kaip vektorinis dydis. Kaip jau minėta, pagal (2.4) modelį apskaičiuotasis garo srautas  $g_v$   $[kg/s]$  kondensaciniame režime yra neigiamas, o garavimo režime yra teigiamas. Lašelio fazinių virsmų šilumos srauto lašelyje tankis  $q_f$   $[W/m^2]$  išreiškiamas garo srauto tankio  $m_v$   $[kg/s]$  ir vandens fazinių virsmų šilumos  $L$   $[J/kg]$  sandauga. Todėl į fazinių virsmų srauto vektoriaus krypties pokytį keičiantis iš kondensacinio režimo į garavimo režimą yra atsižvelgiama išraiška:

$$q_f = m_v \cdot L \quad (2.15)$$

## 2.5. Vandens lašelių FVRC skaitinio modeliavimo metodika

Lašelio terminę bei energinę būsenas FVC režimuose apibrėžianti bei prie lašelio paviršiaus pritekančių/nutekančių šilumos srautų balanso reikalaujanti (2.10) lygtis yra formali ir pagal ją tiesiogiai sudaryti skaitinę schemą FVRC apskaičiuoti negalima. Todėl (2.10) lygtis yra konkretizuojama pagal pateiktus šilumos srautų šilumos srautų matematinius (2.11-2.14) modelius, sudarant visiems FVC režimams galiojančią algebrinę-integralinę lygtį. Svarbu pabrėžti, kad gaunama šilumos srautų balanso lygtis yra transcendentinė, nes joje įeina ir dar ieškomi, pagal pradines sąlygas neapibrėžiami lašelio ŠMM parametrai. Pavyzdžiui, konvekciniame šilumos sraute pagal (2.11a) išraišką apskaičiuoti jau reikia žinoti tą patį konvekcinių šilumos srautą Spoldingo

šilumos pernašos parametro (2.12) išraiškoje. Savo ruožtu, spinduliuotės srautą apskaičiuoti pagal [46] metodiką galima tik tuomet, kai nestacionariojo temperatūros lauko  $T(\tau, r)$  funkcija yra apibrėžta, o jai apskaičiuoti pagal (2.8a) ir (2.8b) išraiškas jau privalo būti apibrėžta spinduliuotės srautą aprašanti  $q_r(\tau, r)$  funkcija. Todėl konkretizuotą universalią (2.10) balanso lygtį išspręsti galima tik skaitiškai pagal iteracinį algoritmą.

### 2.5.1. FVR ciklo iteracinis algoritmas ir skaitinė schema

FVR ciklo algoritmui ir iteracinio skaičiavimo schemai sudaryti lašelio FVR  $\tau=0 \rightarrow \tau_f$  cikle numatoma  $I$  kontrolinio laiko  $\tau_i$  [s] momentai, kurie apibrėžiami parinkus laiko kitimo pastovų  $\Delta\tau_i$  žingsnį:

$$\tau_{i=1} = 0; \tau_{i=I} = \tau_f; \tau_{1 < i \leq I} = \tau_{i-1} + \Delta\tau; \sum_{i=2}^I (\tau_i - \tau_{i-1}) = \tau_f. \quad (2.16)$$

Iteracinis algoritmas realizuojamas pagal skaitinę schemą, kurioje pagrindiniu ieškomuoju parametru laikoma lašelio paviršiaus momentinė  $T_{R,i}$  temperatūra. Pradiniu laiko  $\tau_{i=1}=0$  momentu visi lašelio ŠMM parametrai  $P_0$  laikomi apibrėžtais. Iteracinė schema grindžiama nuosekliai kiekvienu išskirtu kontroliniu  $\tau_{i>1}$  laiku greičiausio konvergavimo metodu vykdomame iteraciniame cikle:

$$it = 1 \rightarrow IT. \quad (2.17)$$

Iteraciniuose skaičiavimuose atrenkama tokia lašelio paviršiaus momentinė  $T_{R,i}$  temperatūra, kuri užtikrina, kad prie lašelio paviršiaus pritekantys ir nuo jo nutekantys šilumos apskaičiuotieji momentiniai srautai tarpusavyje atitiktų užduotu pasikliautinumumu. Šiame tyrime pasikliautinumumas apibrėžiamas griežtu reikalavimu, kad santykinė paklaida tarp apskaičiuotųjų prie lašelio paviršiaus pritekančių ir nutekančių šilumos srautų neviršytų penkis šimtąsias procento.

Lašelio radialinės koordinatės  $\int_0^R f_r dr$  integralui begalinės sumos  $n$  nario  $f_n$  funkcijos išraiškoje (2.8b) apskaičiuoti, lašelyje išskiriamas  $J=41$  [48] kontrolinis  $r_j$  koordinate  $r=0 \rightarrow R$  intervale apibrėžtas koncentrinis pjūvis. Lašelio skersmuo FVC režimuose kinta. Todėl universaliai radialinės koordinatės tinkleliui sudaryti įvedama bematė  $\eta$  radialinė koordinatė, kuri apibrėžiama radialinės koordinatės  $r$  [m] santykiu su laike kintančio skersmens lašelio  $R$  spinduliu. Tuomet FVR  $\tau=0 \rightarrow \tau_f$  cikle jau išskirtais kontroliniais laiko  $\tau_i$  [s] momentais radialinės  $r$  [m] koordinatės tinklelis graduojamas pagal universalią schemą:

$$\eta = r/R; \quad (2.18a)$$

$$\eta_{j=1} = 0; \eta_{j=J} = 1; \Delta\eta = \frac{1}{J-1}; \quad (2.19b)$$

$$\eta_{1 < j \leq J} = \eta_{j-1} + \Delta\eta; r_{j,i} = \eta_j R_i; \sum_{j=2}^J (r_{j,i} - r_{j-1,i}) = R_i. \quad (2.19c)$$

### 2.5.2. FVR ciklo modeliavimas programa „LAŠAS“

Lašelių ŠMM procesų skaitinio modeliavimo programa „LAŠAS“ yra išvystyta KTU Energetikos katedroje ir parašyta QBASIC kalboje, kuri patogi aptarto vandens lašelių FVRC iteracinio algoritmo realizavimui ir skaitinio modeliavimo programos sudarymui bei patogiam praktiniam naudojimui. Atramine šioje lašelių FVRC skaitinio modeliavimo programa yra valdančioji paprogramė, kuri derina visos eilės pagalbinių paprogramių įsijungimo eiliškumą bei kurioje yra suformuojami konkretų vandens įpurškimo atvejį apibrėžiantys lašelių ŠMM kraštinių sąlygų ĮVESTIES (INPUT)

parametrai. Šiame darbe numatytų skaitiškai ištirti vandens įpurškimo į biokuro kūryklos dūmų srautą 1a ir 1b atvejų bei į šalinamų dūmų srautą prieš kondensacinį ekonomaizerį 2a ir 2 b atvejus apibrėžiantys INPUT parametrai pateikti 2.1 lentelėje.

**2.1 lentelė.** INPUT parametrai tiriamaisiais atvejais.

Nr.	$t_d$	$X_{g,d}$	$w_d$	$p_d$	$\varepsilon$	$t_{l,0}$	$2R_0$	$w_{l,0}$
-	°C	-	m/s	MPa	-	°C	μm	m/s
1a.	800	0,3	10	0,1	1	40	100	40
1b	800	0,3	10	0,1	1	40	400	40
2a.	150	0,3	10	0,1	1	40	100	40
2b.	150	0,3	10	0,1	1	40	400	40

Abu tiriamieji vandens įpurškimo 1 ir 2 atvejai susieti vienoda 40°C įpurškiamo vandens temperatūra ir skirtingą vandens išpurškimo dispersiškumą apibrėžiančiais 100 ir 400 mikrometrų pradinio skersmens lašeliais bei vienodu jų pradiniu 40 m/s, kai 30 procentų drėgnumo pagal tūrinę vandens garo dalį ir 0,1 MPa slėgio dūmai teka vienodu 10 m/s greičiu. Esminį skirtumą tarp tiriamųjų atvejų apibrėžia ryškiai besiskirianti dūmų srauto 800°C ir 150°C. Dėl dūmuose esančio vandens garo ir anglies dvideginio dujų spinduliavimo bei suodžiais padengtų sienelių spinduliavimo ir daugkartinio krintančių infraraudonųjų šviesos spindulių atspindžio veidrodiniame lašelių paviršiuje, į atskirą lašelį krintančios spektrinės spinduliuotės intensyvumas yra artimas juodo kūno spektrinei spinduliuotei [49]. Todėl dūmų ir sienelių spinduliavimo didžiausiai įtakai išryškinti parinktas vienietinis išorinio spinduliavimo šaltinio juodumo laipsnis  $\varepsilon \approx 1$ .

„LAŠO“ programos valdančiojoje paprogramėje pagal INPUT parametrus (Lentelė 2.1) yra suformuojamas tiriamasis atvejis ir duodama komanda pradėti skaičiavimą. Tuomet valdančioji paprogramė kreipiasi į specialią greičiausios konvergencijos metodu veikiančią paprogramę „RAPAS“, kuriai, pradedant nuo  $\tau_2$  laiko, visais kontroliniais laiko  $\tau_{i>1}$  momentais vykdomo iteracinio (2.17) ciklo pirmajai iteracijai pateikiama 0.1°C padidinta prieš tai buvusi lašelio paviršiaus temperatūra:

$$t_{R,i,it=1} = t_{R,i-1} + 0.1^\circ \text{C}. \quad (2.20)$$

Kiekvienai sekančiai  $it>1$  iteracijai, lašelio paviršiau  $T_{R,i,it}$  temperatūrą parenka savarankiškai veikianti paprogramė „RAPAS“, kuri kreipiasi į šilumos srautus apskaičiuojančias paprogrames bei kontroliuoja prie lašelio pritekančių ir nutekančių šilumos srautų atitikimą. Momentinei  $T_{R,i}$  temperatūrai yra priskiriama baigiamajai iteracinio (2.17) ciklo  $IT$  iteracijai „RAPAS“ parinkta lašelio paviršiaus temperatūra, kuri 99,95 procentų pasikliautimumu užtikrino šilumos srautų balanso sąlygos reikalavimą:

$$t_{R,i} \equiv t_{R,i,it=IT}, \text{ kai } \frac{q_{c,l,i,it} + q_{f,i,it}}{q_{c,g,i,it}} \cdot 100\% \leq 0,05\%. \quad (2.21)$$

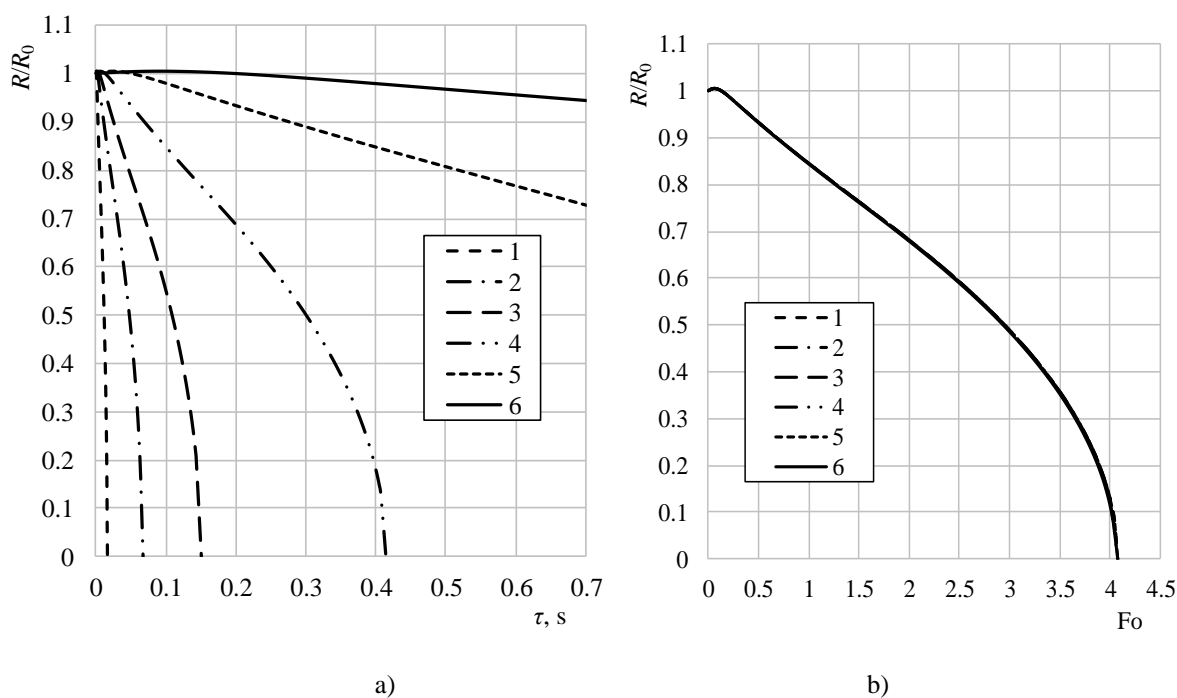
Po kiekvienos iteracijos yra kreipiamasi į lašelio momentinį greitį ir skersmenį apskaičiuojančias paprogrames, kuriose skaitiškai išsprendžiant lašelio fazinių virsmų ir judėjimo dinamikos diferencialines lygtis (2.3b) ir (2.5a) atitinkamai, yra patikslinamas momentinis lašelio  $2R_{i,it}$  [m] skersmuo ir momentinis lašelio slydimo  $w_{sl,i,it} = w_{l,i,it} - w_d$  [m/s] dūmuose greitis. Skaitinio modeliavimo

eigoje suformuojami lašelio ŠMM parametrų kitimą FVR cikle (2) apibrėžiantys  $P_{SMM,i}$  masyvai, kurie išvedimi kaip IŠVESTIES (OUTPUT) parametrai standartinės duomenų lentelės formoje.

### 2.5.3. Furje $Fo$ kriterijumi apibrėžtos universalios laiko skalės svarba FVR ciklo modeliavimui ir rezultatų grafinei interpretacijai

Vandens lašelių garavimo aukštos  $1000^{\circ}\text{C}$  temperatūros  $X_v=0,25$  drėgnumo oro sraute (tai atitinka vidutinio drėgnumo biokuro dūmus) konvekcinio šildymo atveju spaudai pateikti darbo [50] duomenys rodo, jog lašelių fazinių virsmų trukmė yra labai jautri vandens išpurškimo dispersiškumui (2.2. pav. a).

Kadangi lašelių išgaravimo  $\tau_f$  laikas labai ryškiai priklauso nuo jų stambumo ir technologiškai svarbiame pradinio  $2R_0$  skersmens kitimo  $100 \rightarrow 500$  mikrometrų intervale gali skirtis dešimtimis kartų (4 pav. a 2 ir 5 kreivės), todėl kiekvienu numatytu modeliuojamu atveju optimalus realaus laiko koordinatės tinklo gradavimas turės būti individualus. Tai komplikuoja skaitinį eksperimentą. Išeitį duoda darbe [50] pagrįstas Furje laiko universalios skalės (2.2 pav. b) įvedimo tikslingumas. Svarbu tai, kad Furje  $Fo$  kriterijumi išreikštoje universalios laiko skalėje skirtingo stambumo lašelių garavimo dinamika konvekcinio šildymo yra vienoda (2.2 pav. b), jei kiti ŠMM kraštines sąlygas apibrėžiantys parametrai yra vienodi.



**2.2 pav.** Skirtingo stambumo lašelių garavimo dūmų sraute dinamika konvekcinio šildymo atveju realiaime laike (a) ir Furje kriterijumi išreikštoje laiko skalėje (b) [50].  $2R_0, \mu\text{m}$ : (1) 50, (2) 100, (3) 150, (4) 250, (5) 500, (6) 1000;  $t_d=1000^{\circ}\text{C}$ ;  $X_{v,d}=0.25$ ;  $w_d=10 \text{ m/s}$ ;  $t_{l,0}=40^{\circ}\text{C}$ ;  $\text{Re}=20$ .

Todėl skaitinio modeliavimo patogumui naudinga laiko kitimo žingsnį skaitinėje schemoje apibrėžti lašelių stambumui jautrų FVR ciklą (2.2) transformavus į Furje  $Fo$  kriterijumi apibrėžiamą universalios laiko skalę ir joje pereinamajame garavimo režime išskirti svarbų  $For$  momentą, kuriame konvekcinės šilumos  $q_{c,l}$  srautas lašelyje pakeičia tekėjimo kryptį ir tuomet susidaro prielaidos sugertam spinduliuotės srautui nuosekliai įsijungti į vandens paviršinio garinimo procesą [50]:

$$Fo = \frac{a_{l,0}}{R_0^2} \tau; Fo \equiv 0 \rightarrow Fo_{co} \rightarrow Fo_r \rightarrow Fo_e \rightarrow Fo_f . \quad (2.22a)$$

$$\Delta\tau(2R_0) \equiv \Delta Fo / (a_{l,0} / R_0^2). \quad (2.22b)$$

Čia:  $a_{l,0}$  – pagal pradinę lašelio temperatūrą parenkamas vandens temperatūrinis koeficientas,  $m^2/s$ ;  $R_0$  – lašelio pradinis ekvivalentinis spindulys,  $m$ ;  $\tau$  – momentinis laikas FVR cikle (2.2);  $a_{l,0}/R_0^2$  – laiko ir Furje skalių ryšių daugiklis,  $s^{-1}$ ;  $Fo$  – momentinis Furje kriterijus FVR cikle (2.22a);  $Fo_{co}$  – kondensacinio režimo pabaigą FVR cikle (2.22a) apibrėžiantis Furje kriterijus;  $Fo_r$  – spinduliavimo srauto įsijungimo momentą į vandens paviršinį garinimą FVR ciklo (2.22a) pereinamojo garavimo režime apibrėžiantis Furje kriterijus;  $Fo_e$  – pereinamųjų fazinių virsmų trukmę FVR cikle (2.22a) ir kartu pusiausviro garavimo režimo pradžios momentą apibrėžiantis Furje kriterijus;  $Fo_f$  – lašelio FVR ciklo trukmę apibrėžiantis Furje kriterijus;  $\Delta Fo$  – universalus lašelių dispersiškumui žingsnis FVR cikle Furje skalėje apibrėžtos dūmų  $t_d$  temperatūros atveju;  $\Delta\tau$  – pagal universalų  $\Delta Fo$  ir lašelio pradinį  $R_0$  spindulį apskaičiuotas individualus lašelių dispersiškumui žingsnis realaus laiko skalėje.

Aišku, jog sudėtinio radiacinio-konvekcinio šildymo atveju skirtingo stambumo lašelių garavimui tam tikrą įtaką turės tai, kad spinduliavimo sugėrimo intensyvumas priklauso nuo lašelio dydžio [43,49, 50]. Todėl skirtingo stambumo lašelių garavimo dinamikos grafikų  $R(Fo)/R_0$  kreivės sudėtinio šildymo atveju nesutaps, tačiau, tikėtina, jog jų išgaravimo  $Fo_f$  laikas bus tos pačios eilės dydis. Tuomet visiems lašeliams apibrėžtos dūmų temperatūros atveju bus galima apibrėžti optimalų  $\Delta Fo$  žingsnį pagal vieno lašo FVRC modeliavimo rezultatus, o visiems kitiems lašeliams pagal (2.16) schemą pergraduoti laiko tinklę žingsnį jame patikslinus pagal (2.22b) išraiškos duomenis.

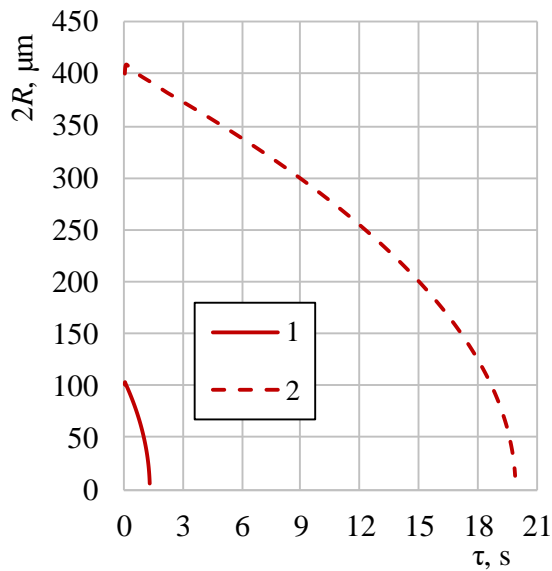
Taip pat 2.2 paveikslo pavyzdžiu galima teigti, jog Furje  $Fo$  kriterijaus universalioje laiko skalėje skirtingo pradinio dispersiškumo lašelių ŠMM parametrų  $P_{\text{ŠMM}}(Fo)$  funkcijų grafinė interpretacija yra patogi ir akivaizdi kokybinio dėsningumo išryškavimo aspektu.

### 3. Vandens lašelių FVR ciklo biokuro dūmuose modeliavimo rezultatai

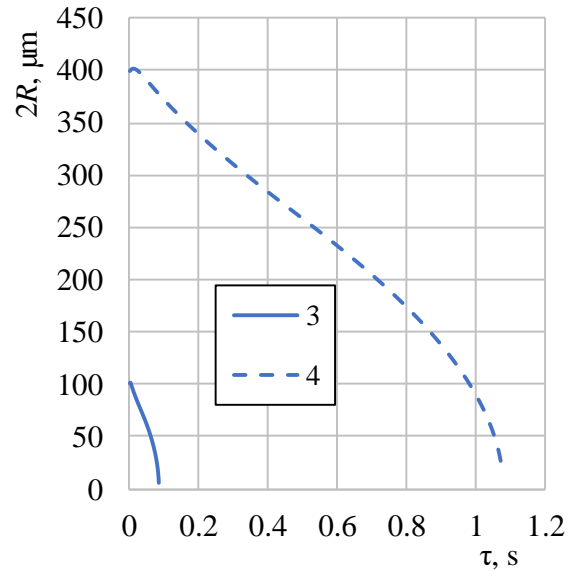
Į biokuro dūmų srautą įpurškto vandens FVRC skaitinio modeliavimo rezultatus programa „LAŠAS“ pateikia ŠMM procesus dvifaziame lašelių sraute apibrėžiančių pagrindinių parametru (bendras pavadinimas yra  $P_{\dot{S}MM}$  parametras) laikinių  $P_{\dot{S}MM}(\tau)$  funkcijų apskaičiuotųjų momentinių  $P_{\dot{S}MM,i}$  verčių masyvais OUTPUT lentelėje. Funkcijų  $P_{\dot{S}MM}(\tau)$  kitimo FVC režimuose dėsningumas bei tarpusavio ryšys apibrėžtas pateiktų masyvų grafinės interpretacijos ir sisteminės palyginamosios analizės metodu. Todėl „LAŠAS“ programos pateikti OUTPUT parametru lentelėje parametrai yra klasifikuoti ir suskirstyti į fazinių virsmų  $P_f$ , terminių  $P_t$ , energiniu  $P_q$  ir dinaminį  $P_w$  bei kriterijų  $P_{kr}$  parametru grupes. Fazinių virsmų parametrai susieti su lašelio garavimo dinamika, Terminiai  $P_t$  – su lašelio nestacionariuoju temperatūros lauku, energiniai  $P_q$  – su lašelio entalpija ir šilumos srautais jo paviršiuje, dinaminiai  $P_w$  – su lašelio judėjimu, o kriterijų  $P_{kr}$  parametru grupei priskirti Spoldingo pernašos  $B$  parametrai ir Nuselto, Šervudo bei Pekle kriterijai. Visais modeliuotais atvejais apibrėžti (2.2) ir (2.22a) FVR ciklai, sudaryti parametru kitimo dėsningumą juose apibrėžiančių  $P_{\dot{S}MM}(Fo)$  ir  $P_{\dot{S}MM}(\tau)$  funkcijų grafikai ir pateikta jų fizikinė interpretacija.

#### 3.1. Lašelių fazinių virsmų analizė ir FVR ciklo trukmės apibrėžimas

Vandens įpurškimo į biokuro dūmų srautą technologinį efektyvumą užtikrina lašelių fazinių virsmų procesai, kurie apibrėžia išgarinamą vandens arba iš dūmų iškondensuojamo garo kiekį. Todėl vienu iš svarbiausių technologiniu parametru yra laikomas lašelių paviršiuje generuojamo arba sukondensuojamo garo srautas  $g_v$  [kg/s]. Taip pat yra svarbus garo srauto intensyvumą apibrėžiantis garo srauto tankis  $m_v$  [kg/(m<sup>2</sup>s)]. Fazinių virsmų parametru  $P_f$  grupei dar priskirti ir fazinių virsmų procesų iššaukti lašelio masės bei geometrijos (skersmens, paviršiaus ploto ir tūrio) momentiniai OUTPUT duomenys. Lašelių garavimo dinamika tradiciškai yra apibrėžiama jų skersmens kitimu FVR cikle realaus laiko skalėje. Lašelių garavimo dinamika dūmuose sudėtinio šildymo atveju pagal OUTPUT duomenis realiame laike pateikta ir Furje laiko skalėje pateikta 3.1 ir 3.2 a paveiksluose atitinkamai. Aiškiai matosi, jo lašelių skersmuo FVR cikle kinta netiesiškai ir garavimo dinamika priklauso nuo dūmų temperatūros ir vandens išpurškimo dispersiškumo.

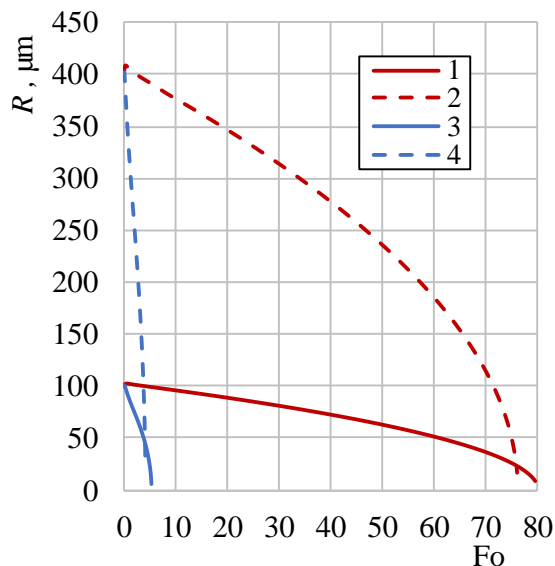


a)

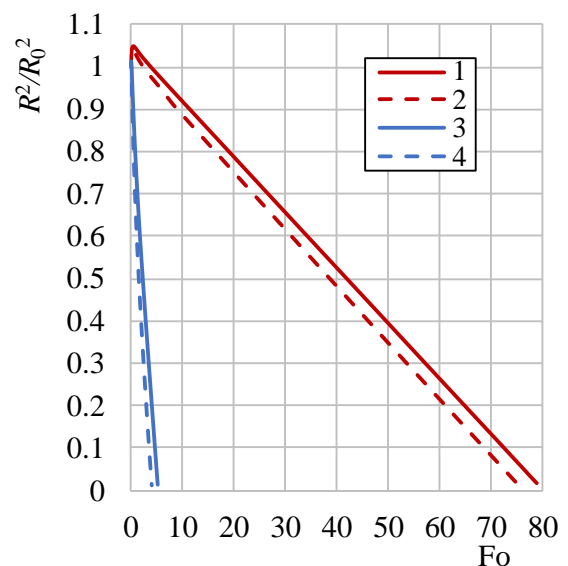


b)

**3.1 pav.** Lašelių garavimo dinamika žemos (a) ir aukštos (b) temperatūros dūmuose.  $t_d$ , °C (1, 2) 150, (3, 4) 800°C;  $2R_0$ , μm: (1, 3) 100, (2, 4) 400;  $X_{v,g}=0.3$ ;  $w_d=10$  m/s;  $t_{l,0}=40$ °C;  $w_{l,0}=40$  m/s.



a)



b)

**3.2 pav.** Lašelių garavimo dinamika (a) ir bemačio ploto kitimas (b) dūmuose.  $Fo_f$ : (1) 80,35; (2) 76,42; (3) 5,32; (4) 4,184.  $\tau_f$ , s: (1) 1,312; (2) 19,97; (3) 0,087; (4) 1,084. Kraštinės ŠMM sąlygos kaip paveiksle 3.1.

Svarbu pabrėžti, jog modeliuojant lašelių fazinius virsmus jų išgaravimo  $\tau_f$  momentu skaitiškai įvykdyti iteracinį it ciklą (2.17) neįmanoma, todėl lašelių garavimą apibrėžiančių  $R(\tau)$  funkcijų (3.1 pav.) ir  $R(Fo)$  funkcijų (3.2 pav.) grafikai nulinę vertę nepasiekia. Detalesnė fazinių virsmų parametų grafinė analizė parodė, jog skirtingo stambumo lašelių garavimo apibrėžtos temperatūros dūmuose Furje  $Fo$  kriterijaus skalėje yra artima, o lašelių paviršiaus bemačio plotas pusiausviro garavimo režime kinta tiesiškai (3.2 pav. b). Todėl lašelių FVR ciklo trukmę su aukštu pasikliautimumu galima apibrėžti tiesiškai ekstrapoliuojant bemačio  $R^2/R_0^2$  ploto duomenis baigiamosiose OUTPUT parametų lentelės I ir I-1 eilutėse:



$$Fo_f = Fo_I + (Fo_I - Fo_{I-1}) \cdot \left(0 - R^2_I/R_0^2\right) \left(R^2_I/R_0^2 - R^2_{I-1}/R_0^2\right). \quad (2.23)$$

Pagal išraišką (2.23) apibrėžta modeliuotais vandens įpurškimo atvejais lašelių FVR (2.22a) ciklo  $Fo_f$  trukmė (nurodyta 3.2 pav. apraše) Furje kriterijaus skalėje ir pagal ją apskaičiuota FVR (2.2) ciklo  $\tau_f$  trukmė (nurodyta 3.2 pav. apraše) realaus laiko skalėje:

$$\tau_f = Fo_f / \left(a_{l,0} / R_0^2\right). \quad (2.24)$$

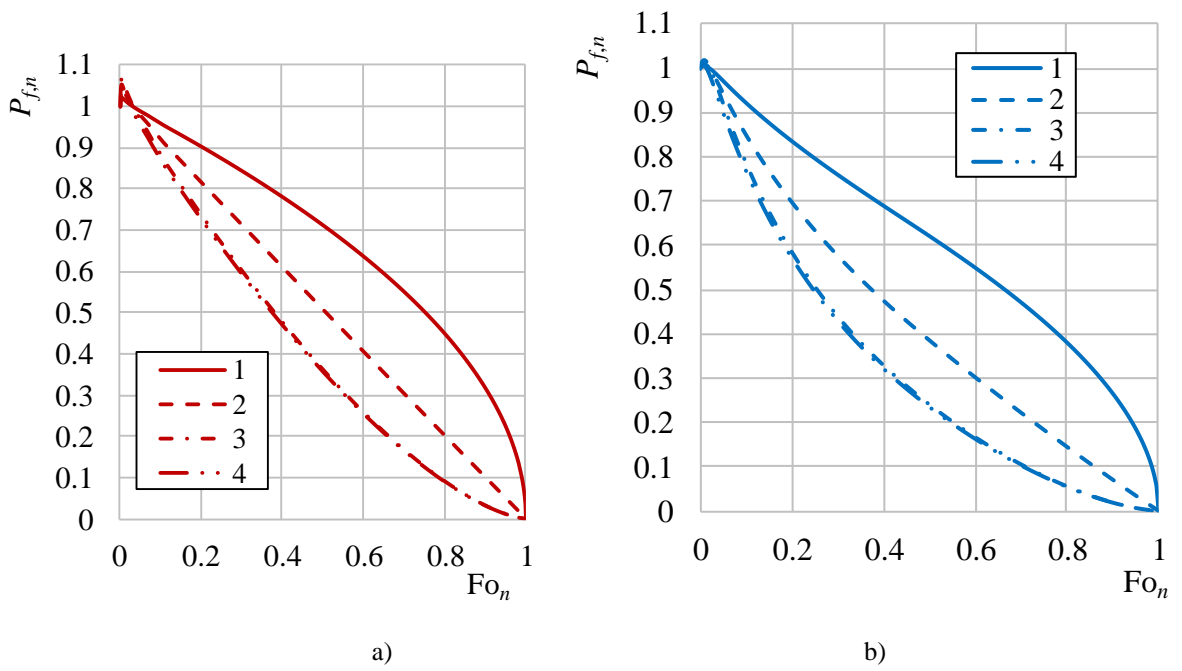
Laiko ir Furje kriterijaus skalių ryšio daugiklis (2.24) išraiškoje yra apibrėžtas pagal įpurškiamo vandens temperatūrą ir lašelių dispersiškumą, o nuo dūmų parametrų nepriklauso. Modeliuotais 40°C temperatūros vandens įpurškimo atvejais  $a_{l,0}/R_0^2$  daugiklis yra 61,2347 ir 3,8272, kai lašelio pradinis skersmuo yra 100 ir 400 mikrometrų atitinkamai.

Lašelių garavimo dinamikos analizės pagrindu (3.2 pav.) galima teigti, jog apibrėžtos dūmų temperatūros atveju, lašelių  $P_{SMM}(Fo)$  funkcijų grafikai yra artimi, todėl grafiškai interpretuoti OUTPUT parametrų lentelės duomenis  $Fo$  skalėje yra patogū. Tačiau aiškiai matosi (3.2 pav.), jog skirtingo dispersiškumo lašelių  $P_{SMM}(Fo)$  funkcijų grafikai ryškiai skiriantis dūmų temperatūrai detalesniam palyginamajam įvertinimui nėra patogūs. Kadangi  $P_{SMM}(\tau)$  funkcijų grafikai yra taip pat nepatogūs (3.1 pav.), todėl svarbu atrasti analizei patogią ir lašelių dispersiškumui ir dūmų temperatūrai universalią laiko skalę. Buvo rasta, kad tokią universalią bemačio laiko skalę galima sudaryti tiek pagal lašelių fazinių virsmų OUTPUT duomenis tiek realaus laiko, tiek ir Furje kriterijaus skalėse, kai FVRC  $\tau_f$  arba  $Fo_f$  trukmė yra apibrėžta. Bematė universalios laiko skalė yra apibrėžta momentinio laiko ir FVR ciklo trukmės santykiu:

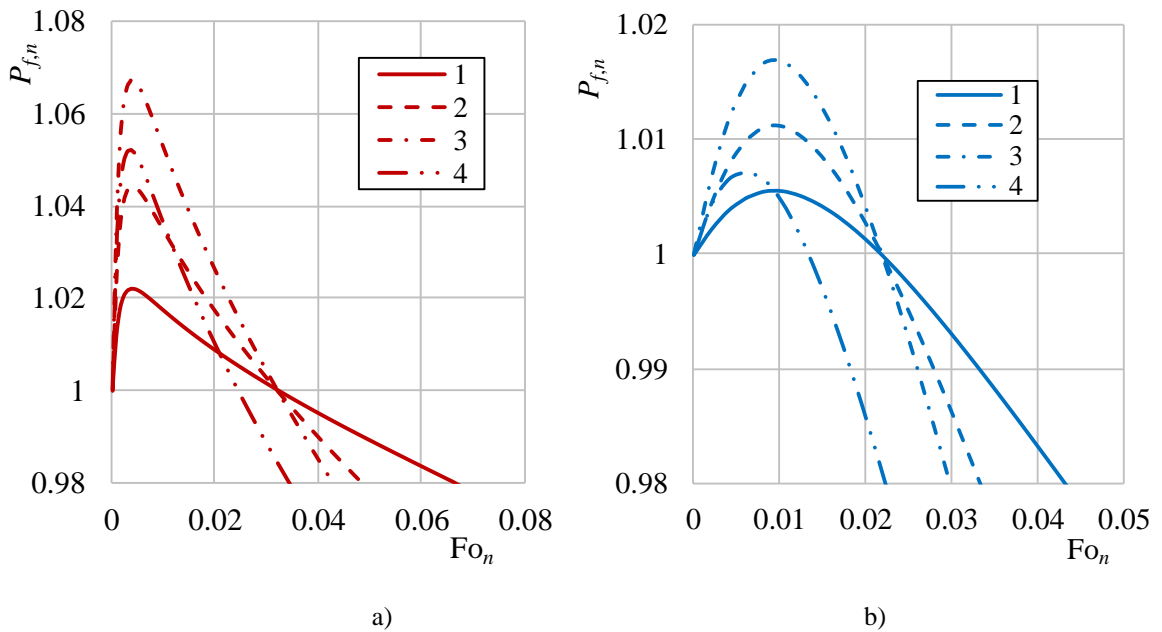
$$Fo_n = \frac{Fo}{Fo_f}; \quad (2.25a)$$

$$\tau_n = \frac{\tau}{\tau_f}. \quad (2.25b)$$

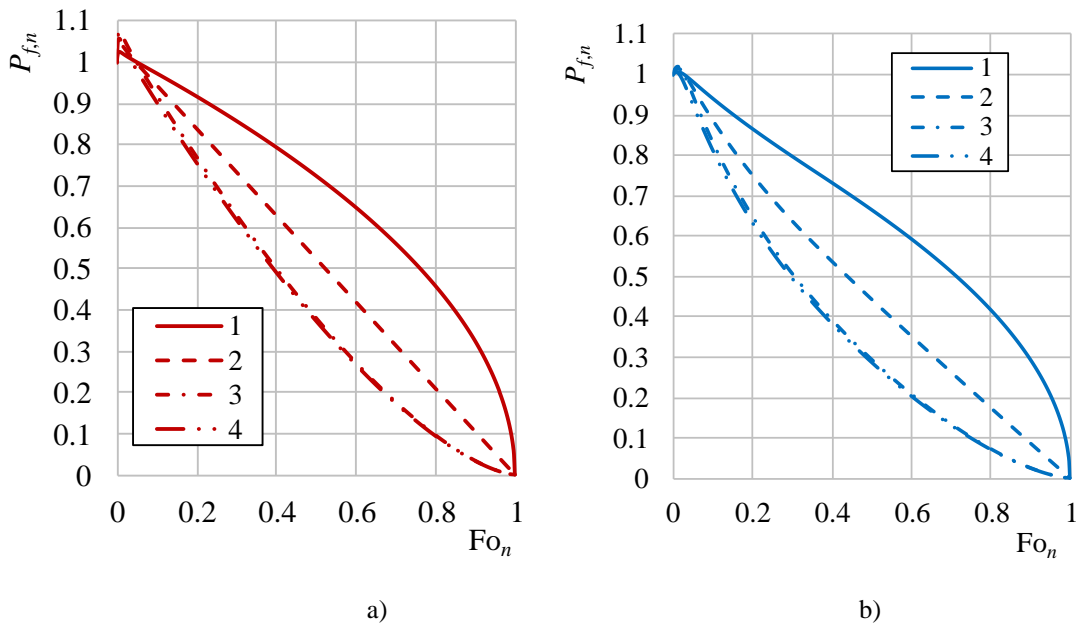
Svarbu pabrėžti, jog abi (2.25a) ir (2.25b) bematės universalios laiko skalės yra pilnai sutampančios. Todėl OUTPUT  $P_{SMM}$  parametrų grafinė interpretacija jose yra lygiavertė. Palyginamoji grafinė interpretacija (3.3-3.6 pav.) patvirtino, jog lašelių bemačio  $R/R_0$  skersmens, bemačio  $R^2/R_0^2$  paviršiaus ploto ir bemačio  $R^3/R_0^3$  tūrio kitimas FVR ciklo režimuose yra savitas. Pereinamųjų fazinių virsmų režime šių parametrų kitimo grafiko kreivės yra išgaubtos ir turi ryškų maksimumą (3.4 pav.) ir (3.6 pav.), kuris priklauso nuo dūmų temperatūros ir nuo lašelių stambumo. Pusiausviro garavimo režime  $R/R_0$  grafiko kreivė yra išgaubta,  $R^3/R_0^3$  grafiko kreivė yra įgaubta, o  $R^2/R_0^2$  yra tiesė tarp, tačiau kiekybiniu aspektu dūmų temperatūros įtaka matosi (3.3 pav.) ir (3.5 pav.), o bematės  $\rho_l R^3 / (\rho_{l,0} R_0^3)$  masės kitimo grafikas pusiausviro garavimo režime yra artimas bemačio tūrio grafikui.



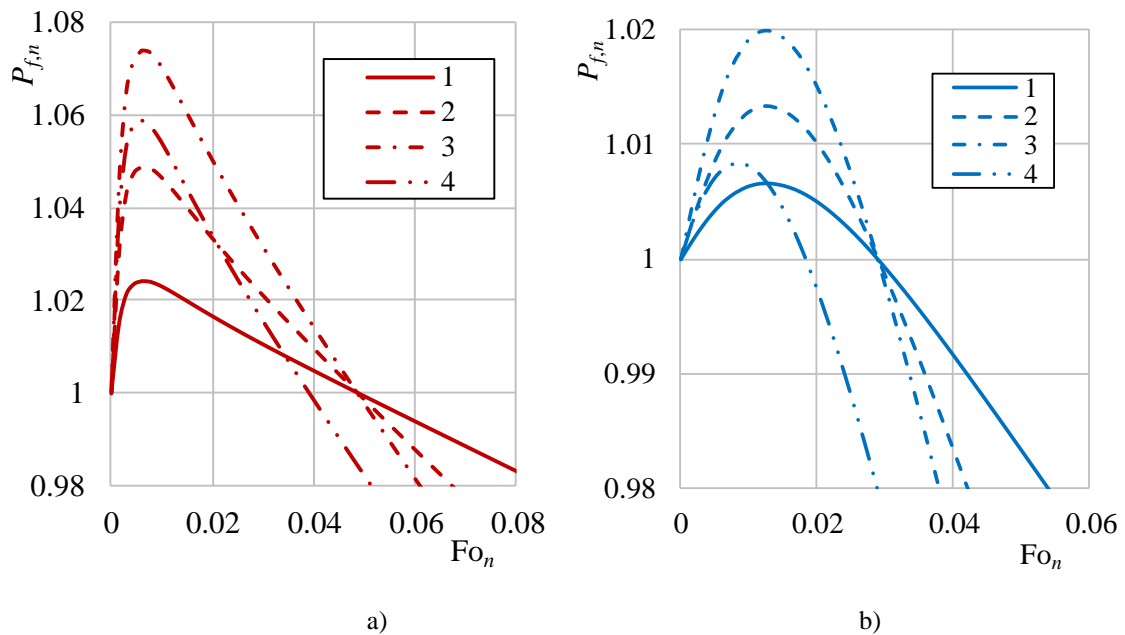
**3.3 pav.** Stambaus 400  $\mu\text{m}$  skersmens lašelio bemačių  $P_{f,n}$  parametų kitimas FVR cikle žemos 150°C temperatūros (a) ir aukštos 800°C (b) temperatūros dūmuose. Parametro  $P_{f,n}$  prasmė: (1)  $R/R_0$ , (2)  $R^2/R_0^2$ , (3)  $R^3/R_0^3$ , (4)  $\rho_l R^3/(\rho_{l,0} R_0^3)$ .



**3.4 pav.** Stambaus 400  $\mu\text{m}$  skersmens lašelio  $P_{f,n}$  parametų kitimas FVC pereinamajame režime žemos 150°C temperatūros (a) ir aukštos 800°C (b) temperatūros dūmuose. Parametro  $P_{f,n}$  prasmė: (1)  $R/R_0$ , (2)  $R^2/R_0^2$ , (3)  $R^3/R_0^3$ , (4)  $\rho_l R^3/(\rho_{l,0} R_0^3)$ .



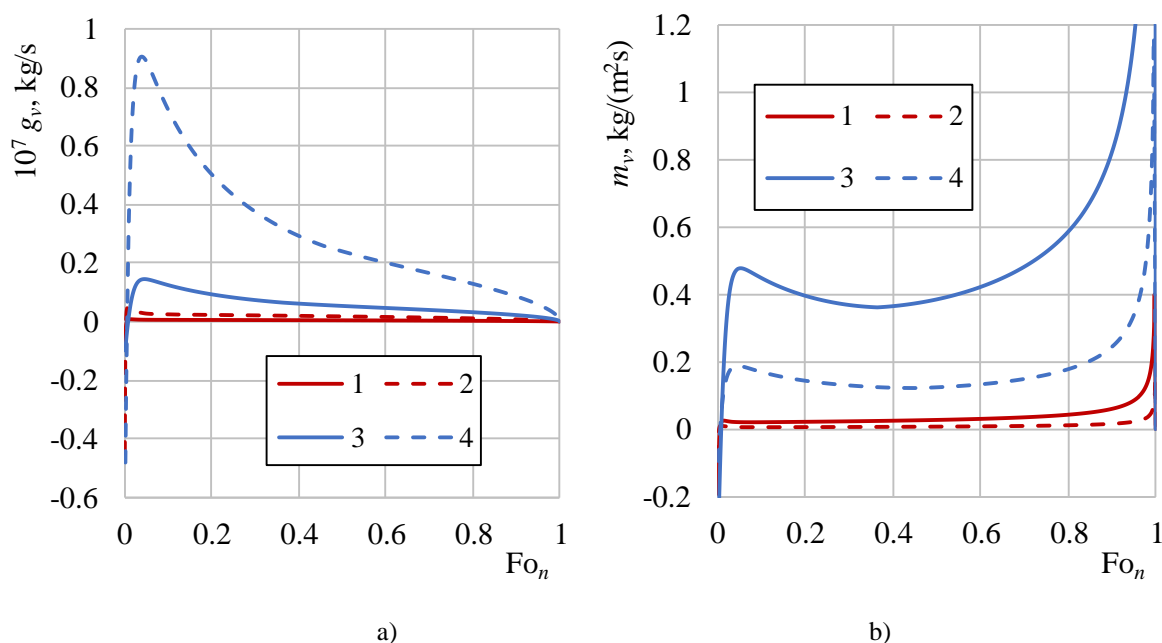
**3.5 pav.** Smulkaus 100  $\mu\text{m}$  skersmens lašelio bemačių  $P_{f,n}$  parametų kitimas FVR cikle žemos 150°C temperatūros (a) ir aukštos 800°C (b) temperatūros dūmuose. Parametro  $P_{f,n}$  prasmė: (1)  $R/R_0$ , (2)  $R^2/R_0^2$ , (3)  $R^3/R_0^3$ , (4)  $\rho_l R^3/(\rho_{l,0} R_0^3)$ .



**3.6 pav.** Smulkaus 100  $\mu\text{m}$  skersmens lašelio  $P_{f,n}$  parametų kitimas FVC pereinamajame režime žemos 150°C temperatūros (a) ir aukštos 800°C (b) temperatūros dūmuose. Parametro  $P_{f,n}$  prasmė: (1)  $R/R_0$ , (2)  $R^2/R_0^2$ , (3)  $R^3/R_0^3$ , (4)  $\rho_l R^3/(\rho_{l,0} R_0^3)$ .

Lašelių bemačių geometrinių  $P_{f,n}$  parametų dinamiką pereinamajame FVC režimo pradinėje stadijoje apibūdina garo kondensacijos ir šylančio vandens plėtimosi procesai, o pereinamojo garavimo režime šylančio vandens plėtimosi įtaką mažina garavimo procesas. Kai garavimas atsveria vandens plėtimąsi, tuo momentu geometrinių  $P_{f,n}$  grafikų kreivėse stebimas maksimumo taškas, o garavimui įsivyravus kreivės žemėja (3.4 pav.) ir (3.6 pav.). Lašelio masės kitimui vandens plėtimasis įtakos neturi, todėl bemačių  $\rho_l R^3/(\rho_{l,0} R_0^3)$  masės kitimo grafiko kreivėje maksimumas susiformuoja kiek anksčiau kondensacinio režimo pabaigoje (3.4 pav. 4 kreivė) ir (3.6 pav. 4 kreivė).

Lašelių stambumo ir dūmų temperatūros įtaka garo srauto (3.7 pav. a) ir jo tankio dinamikai FVC režimuose yra ryški. Abu kondensaciniame režime pasiekia nulinę vertę, o pereinamojo garavimo režime maksimaliai išauga (3.7 pav.), tačiau pusiausviro garavimo režime garo srautas sumažėja iki nulio (3.7 pav. a), o jo tankis pradinėje stadijoje kiek sumažėja, o vėliau sparčiai pradeda augti (3.7 pav. b).

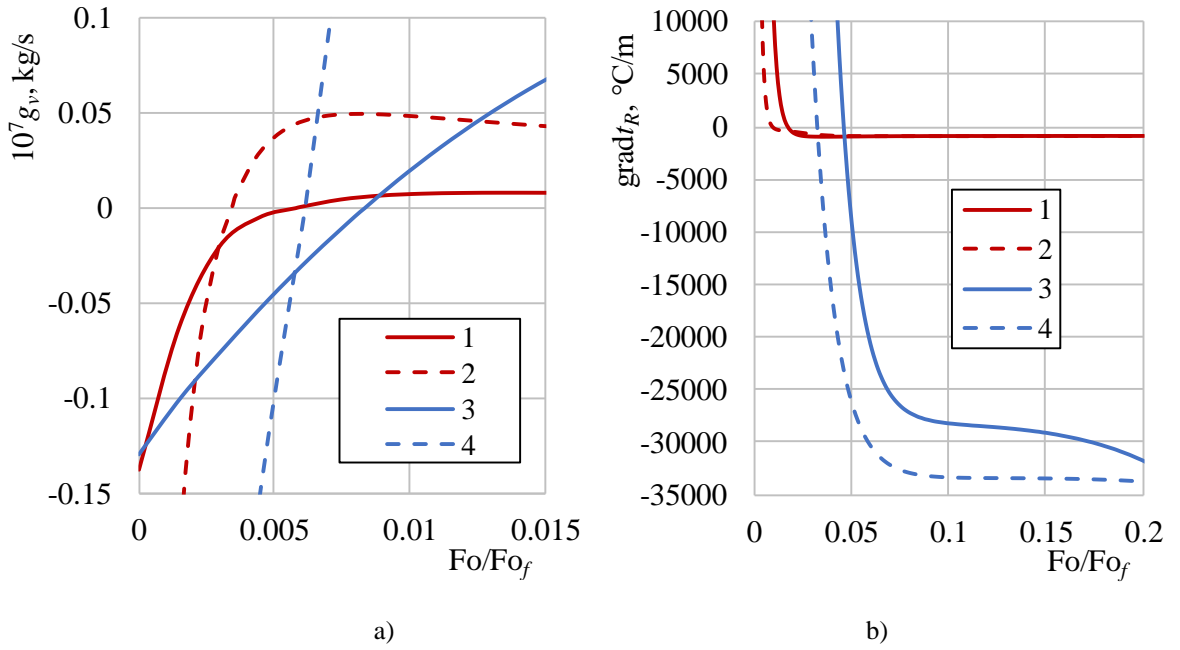


**3.7 pav.** Garo srauto (a) ir jo tankio (b) dinamika lašelių FVR cikle.  $t_d$ ,  $^\circ\text{C}$  (1, 2) 150, (3, 4) 800 $^\circ\text{C}$ ;  $2R_0$ ,  $\mu\text{m}$ : (1, 3) 100, (2, 4) 400;  $X_{v,g}=0.3$ ;  $w_d=10$  m/s;  $t_{l,0}=40^\circ\text{C}$ ;  $w_{l,0}=40$  m/s.

### 3.2. Lašelių FVR ciklo režimų apibrėžimas pagal modeliavimo rezultatus

Tirtais technologiniais  $40^\circ\text{C}$  temperatūros vandens įpurškimo į vidutinio  $x_v=0,3$  drėgnumo aukštos  $800^\circ\text{C}$  ir santykinai žemos  $150^\circ\text{C}$  temperatūros dūmų srautą atvejais lašelių FVR ciklo režimams apibrėžti buvo išanalizuoti ir atrinkti aiškūs fazinių virsmų režimų kaitą parodantys faktoriai, kurie įgalino vienareikšmiškai, pagal „LAŠAS“ pateiktus OUTPUT  $P_{\dot{S}MM,i}$  vertes, apibrėžti būdingus laiko momentus lašelių FVR (2.2) ir (2.22a) cikluose. Svarbu suvokti, jog skaitiškai modeliuojant lašelio fazinius virsmus, pataikyti atlikti iteracinį (2.17) ciklą pereinamojo garavimo pradžios momentui sunku, o kondensacinio režimo pabaigos ir lašelio išgaravimo momentais jis yra neįmanomas. Tačiau lašelio fazinių virsmų režimų kaitai artimu laiku momentiniai  $P_{\dot{S}MM,i}$  bei  $P_{\dot{S}MM,i-1}$  parametrai yra apibrėžti, o būdingi universalūs  $Fo$  laiko momentai  $Fo_{co}$ ,  $Fo_r$  ir  $Fo_e$  yra tarpe  $Fo_{i-1}$  ir  $Fo_i$ , o  $Fo_f$  yra už  $Fo_{i-1}$ . Kadangi  $\Delta Fo$  yra baigtinis ir santykinai mažas, todėl numatomas tiesiškas  $P_{\dot{S}MM}$  parametru kitimas jo trukmėje.

Kondensacinio režimo kaitos į garavimą  $Fo_{co}$  momentu garo srauto vektorius pakeičia kryptį, o jo modulis tuomet įgauna nulinę vertę (3.8 pav. a).



**3.8 pav.** Garo srauto (a) lašelio paviršiuje ir temperatūros gradiento (b) vektorių krypties pokytis FVRC pereinamajame režime. Kraštinės ŠMM sąlygos kaip paveiksle 3.7.

Kondensacinio režimo trukmę apibrėžiantis  $Fo_{co}$  kriterijus apskaičiuotas tiesinės interpoliacijos metodu:

$$Fo_{co} \approx Fo_{i-1} + (Fo_i - Fo_{i-1}) \cdot (0 - g_{v,i-1}) / (g_{v,i} - g_{v,i-1}). \quad (2.26)$$

Kondensacinio fazinių virsmų režimo trukmės pateiktos 2.2 lentelėje, o lašelio būdingų  $P_{\dot{S}MM,co}$  parametų vertės kondensacinio režimo kaitos į garavimo režimą momentu apibrėžtos 2.3 lentelėje. Kol lašelyje yra teigiamo gradiento temperatūros laukas, tol sugeriamas spinduliuotės srautas tik šildo vidinius lašelio sluoksnius. Sugerto spinduliavimo srauto išjungimo į vandens paviršinio garinimo procesą užtikrina temperatūros lauko lašelyje gradiento pokytis iš teigiamo į neigiamą, todėl temperatūros gradientas  $Fo_r$  momentu lašelyje įgauna nulinę vertę (3.8 pav. b). Furje  $Fo_r$  kriterijus apskaičiuotas tiesinės interpoliacijos metodu:

$$Fo_r \approx Fo_{i-1} + (Fo_i - Fo_{i-1}) \cdot (0 - \text{grad}t_{R,i-1}) / (\text{grad}t_{R,i} - \text{grad}t_{R,i-1}). \quad (2.27)$$

Spinduliavimo išjungimo į vandens garinimą laikas apibrėžtas 2.2 lentelėje, o lašelio būdingų  $P_{\dot{S}MM,r}$  parametų vertės apibrėžtos 2.4 lentelėje.

Neizotermiško lašelio momentinę terminę būseną apibrėžia jo masės vidutinės  $t_{l,m}$  temperatūros kitimas (3.9 pav.) ir (3.10 pav.). Pradinėje FVRC stadijoje lašeliai sparčiai šyla (3.9 pav. a), o pusiausvirai garuoti vandens lašeliai pradeda pašilę iki aukščiausio lygmens terminės būsenos (3.9 pav. b), kurią apibrėžia  $t_e$  temperatūra. Todėl pereinamųjų fazinių virsmų režimo pabaigos/pusiausviro garavimo režimo pradžios  $Fo_e$  laiko momentas apibrėžtas pagal lašelio masės vidutinės temperatūros maksimalią vertę (3.9 pav. b) ir (3.10 pav. b):

$$Fo_e \approx Fo_i, \text{ kai } t_{l,m}(Fo_i) \equiv t_{l,m,i}^{\max}. \quad (2.28)$$

Pusiausviro garavimo pradžios apibrėžtas 3.1 lentelėje, o lašelio būdingų  $P_{\dot{S}MM,e}$  parametų vertės apibrėžtos 3.4 lentelėje.

**3.1 lentelė.** Vandens lašelių FVC režimų kaitą apibūdinantys laikai tiriamaisiais atvejais.

Nr.	$Fo_{co}$	$\tau_{co}$	$Fo_r$	$\tau_r$	$Fo_e$	$\tau_r$	$Fo_f$	$\tau_f$
-	-	S	-	s	-	s	-	S
1a	0.4658	0.0076	1.403	0.023	1.92	0.031	80.35	1.312
1b	0.2624	0.0686	0.732	0.191	1.485	0.388	76.42	19.97
2a	0.0445	0.0007	0.246	0.004	0.6375	0.01	5.323	0.087
2b	0.0255	0.0067	0.135	0.035	2.04	0.533	4.148	1.084

**3.2 lentelė.**  $P_{SMM,co}$  parametrai  $Fo_{co}$  momentu.

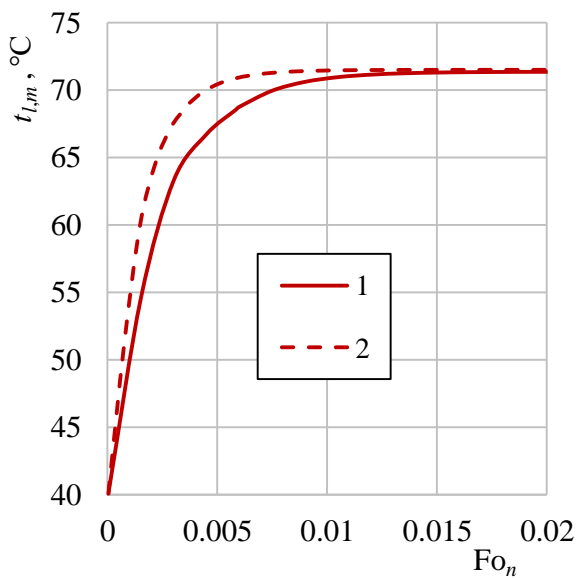
Nr.	$2R_{co}$	$t_R$	$t_m$	$h_l$	$q_{c,d}$	$q_r$	$q_{c,l}$	$q_f$	$\alpha$	$k_{c,l}$
-	$\mu\text{m}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$\text{kJ/kg}$	$\text{kW/m}^2$	$\text{kW/m}^2$	$\text{kW/m}^2$	$\text{kW/m}^2$	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	-
1a	102.4	69.22	68.59	1430.4	70.83	0.602	70.83	0	877.06	1.906
1b	408.72	69.25	68.53	1430.2	29.47	0.61	29.48	0	364.89	2.705
2a	100.59	69.23	60.28	1393.2	1508	53.01	1508	0	2063.9	2.718
2b	402.01	69.25	57.13	1379.5	594.4	63.2	520.4	0	813.42	2.72

**3.3 lentelė.**  $P_{SMM,r}$  parametrai  $Fo_r$  momentu.

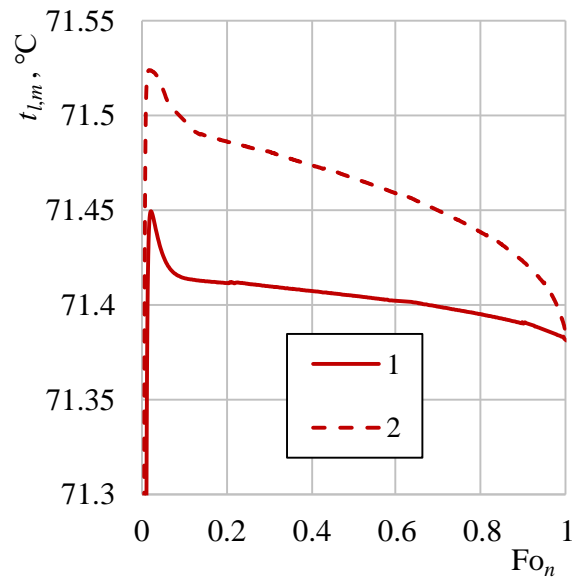
Nr.	$2R_r$	$t_R$	$t_m$	$h_l$	$q_{c,d}$	$q_r$	$q_{c,l}$	$q_f$	$\alpha$	$k_{c,l}$
-	$\mu\text{m}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$\text{kJ/kg}$	$\text{kW/m}^2$	$\text{kW/m}^2$	$\text{kW/m}^2$	$\text{kW/m}^2$	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	-
1a	101.81	71.43	71.43	1443.1	56.78	0.573	0	56.78	722.64	1.19
1b	407.01	71.47	71.46	1443.3	21.92	0.583	0	21.92	279.13	2.605
2a	98.644	82.4	82.3	1492.2	1096	51.95	0	1096	1527	2.709
2b	396.28	82.43	81.48	1488.4	417.2	62.86	0	417.3	581.47	2.72

**3.4 lentelė.**  $P_{SMM,r}$  parametrai  $Fo_e$  momentu.

Nr.	$2R_e$	$t_R$	$t_m$	$h_l$	$q_{c,d}$	$q_r$	$q_{c,l}$	$q_f$	$\alpha$	$k_{c,l}$
-	$\mu\text{m}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$\text{kJ/kg}$	$\text{kW/m}^2$	$\text{kW/m}^2$	$\text{kW/m}^2$	$\text{kW/m}^2$	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	-
1a	101.4	71.44	71.45	1443.2	52.69	0.573	0.5772	53.27	670.75	1.061
1b	403.58	71.52	71.52	1443.6	17.35	0.582	0.5749	17.93	221.11	1.981
2a	92.585	82.75	82.99	1495.4	952.5	51.21	51.087	1004	1328	2.648
2b	250.89	83.99	85.47	1507	223.9	60.21	59.857	283.8	312.72	1.043

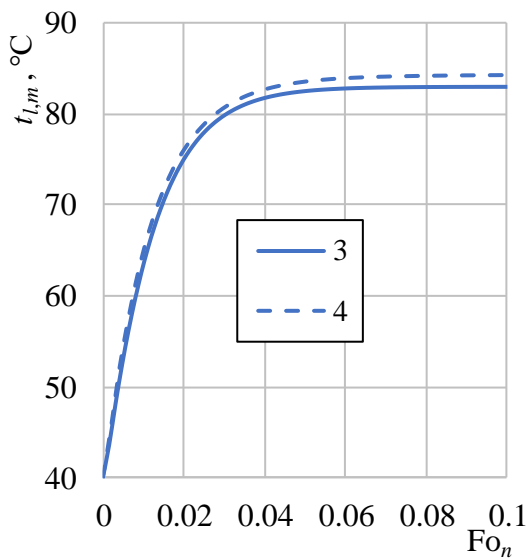


a)

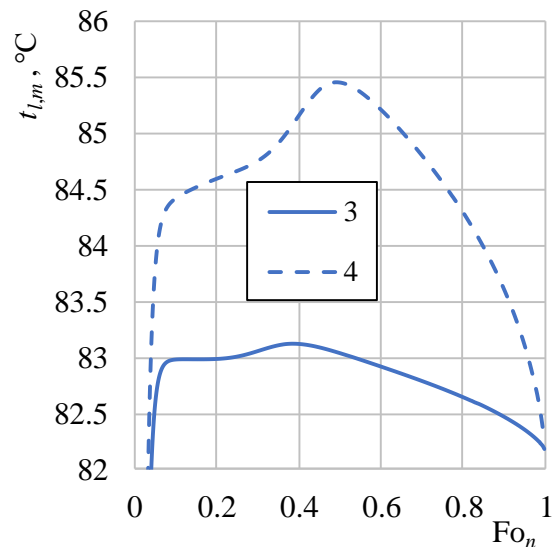


b)

**3.9 pav.** Lašelių terminės būsenos kitimas 150°C temperatūros dūmuose FVRC pradžioje (a) ir vėliau (b). Kraštinės ŠMM sąlygos kaip paveiksle 3.7.



a)



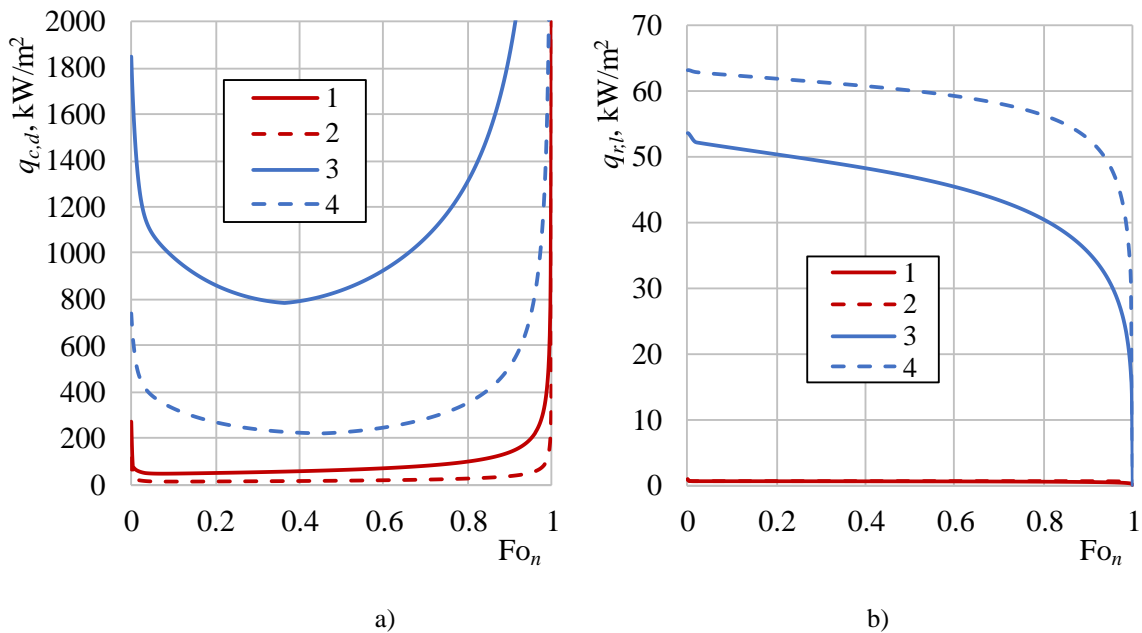
b)

**3.10 pav.** Lašelių terminės būsenos kitimas 800°C temperatūros dūmuose FVRC pradžioje (a) ir vėliau (b). Kraštinės ŠMM sąlygos kaip paveiksle 3.7.

### 3.3. Lašelių terminės ir energinės būsenos kitimo FVC režimuose analizė

Lašelio terminė ir energinė būsena yra glaudžiai susijusios ir jų kitimą apibrėžia sudėtinių pernašos procesų sąveika FVC režimuose. Neizotermiško lašelio terminės būsenos kitimą atspindi lašelio masės vidutinės temperatūros dinamika (3.9 pav.) ir (3.10 pav.). Kondensaciniame režime ir pereinamojo garavimo pradinėje stadijoje lašeliai šyla intensyviai ir 150°C temperatūros dūmuose pasiekia  $\approx 71^\circ\text{C}$  temperatūrą (3.9 pav. a), o 800°C temperatūros dūmuose pasiekia  $\approx 82^\circ\text{C}$  temperatūrą ir (3.10 pav. a). Vėliau, pereinamojo garavimo režimo eigoje jų temperatūra auga lėčiau, kol pasiekia  $t_{l,m}^{\max}$  temperatūra apibrėžtą aukščiausio lygmens terminę būseną (3.4 lentelė), kuri ryškiai priklauso

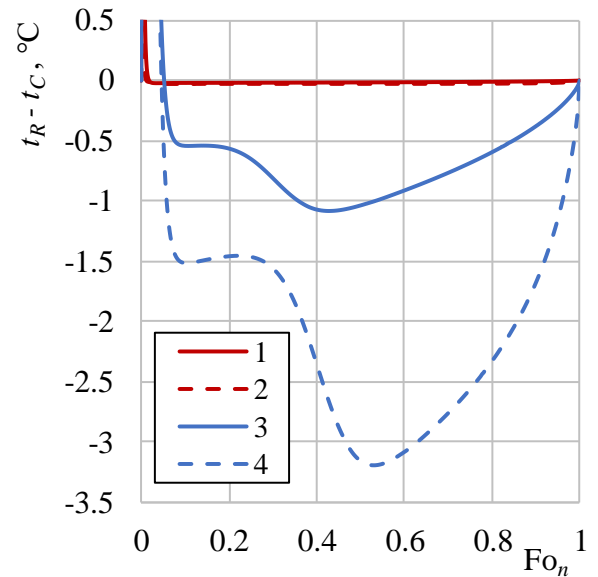
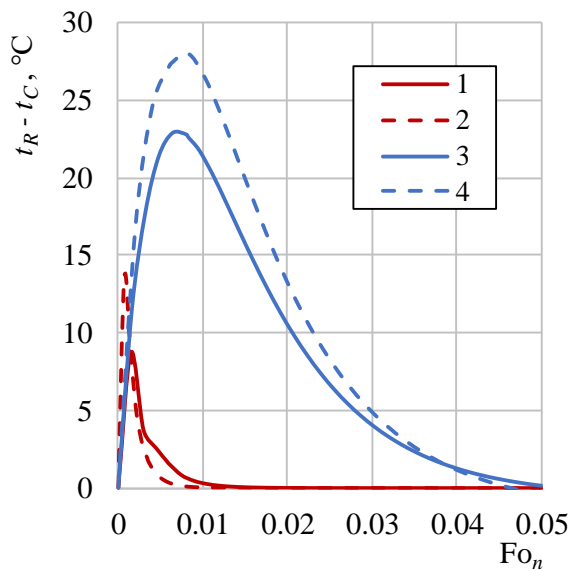
nuo dūmų temperatūros ir lašelių stambumo (3.9 pav. b) ir (3.10 pav. b). Taip yra todėl, kad dūmų temperatūra (jai prilyginama ir spinduliuojančio šaltinio temperatūra) ir lašelių stambumas ryškiai įtakoja tiek lašeliui suteikiamos konvekcinės šilumos (3.11 pav. a), tiek ir lašelyje sugeriamą spinduliuotės šilumos (3.10 pav. b) srauto tankį. 150°C temperatūros dūmuose lašeliuose sugeriamos spinduliuotės srauto tankis yra vieneto eilės, o 800°C temperatūros dūmuose pradžioje yra  $\approx 52$  ir  $\approx 63$  kW/m<sup>2</sup>, kai lašelių skersmuo yra 100 ir 400  $\mu\text{m}$  atitinkamai, vėliau nuosekliai sumažėja iki nulio (3.11 pav. b). 150°C temperatūros dūmuose konvekcinės šilumos srautas pradžioje yra  $\approx 270$  ir  $\approx 112$  kW/m<sup>2</sup>, o 800°C temperatūros dūmuose pradžioje yra  $\approx 1850$  ir  $\approx 740$  kW/m<sup>2</sup>, kai lašelių skersmuo yra 100 ir 400  $\mu\text{m}$  atitinkamai, vėliau kiek sumažėja, o pusiausviro garavimo režimo pabaigoje smarkiai išauga (3.11 pav. a).



**3.11 pav.** Lašeliui suteikiamo konvekcinio (a) ir sugeriamo spinduliuavimo (b) šilumos srautų kitimas FVC režimuose. Kraštinės ŠMM sąlygos kaip paveiksle 3.7.

Neizotermiškumą lašelyje apibrėžia jo paviršiaus ir centro temperatūrų skirtumo dinamika FVC režimuose (3.12 pav.). Aiškiai išsiskiria pradinis (3.12 pav. a) ir vėlesnis (3.12 pav. b) FVRC laikotarpiai. Pradžioje neizotermiškumas lašeliuose auga sparčiai šylant paviršiniams vandens sluoksniams ir 150°C temperatūros dūmuose pasiekiamas  $\approx 8$  ir  $\approx 14^\circ\text{C}$ , o 800°C temperatūros dūmuose pasiekiamas  $\approx 23$  ir  $\approx 28^\circ\text{C}$  skirtumas tarp paviršiaus ir centro temperatūrų, kai lašelių skersmuo yra 100 ir 400  $\mu\text{m}$  atitinkamai (3.12 pav. a). Po to neizotermiškumas sumažėja iki nulio, o lašelio centriniams sluoksniams sugeriamos spinduliuotės poveikyje pašilus daugiau už paviršinius, pasiekiamas antrasis, tačiau jau minusinis neizotermiškumo pikas (3.12 pav. b). 150°C temperatūros dūmuose jis yra  $\approx -0,3$  eilės, o 800°C temperatūros dūmuose yra  $\approx -1,1$  ir  $\approx -3,2^\circ\text{C}$ , kai lašelių skersmuo yra 100 ir 400  $\mu\text{m}$  atitinkamai, vėliau nuosekliai sumažėja iki nulio (3.12 pav. b). Neizotermiškumo dinamika aiškiai atsispindi konvekcinės šilumos srauto lašelyje kitime FVC režimuose (3.13 pav.).

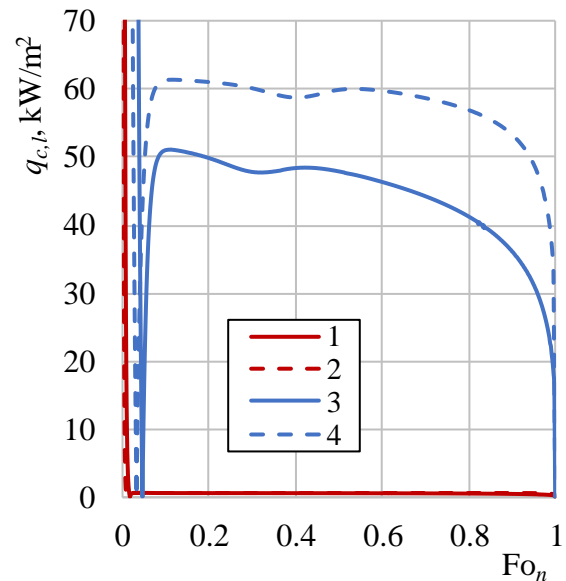
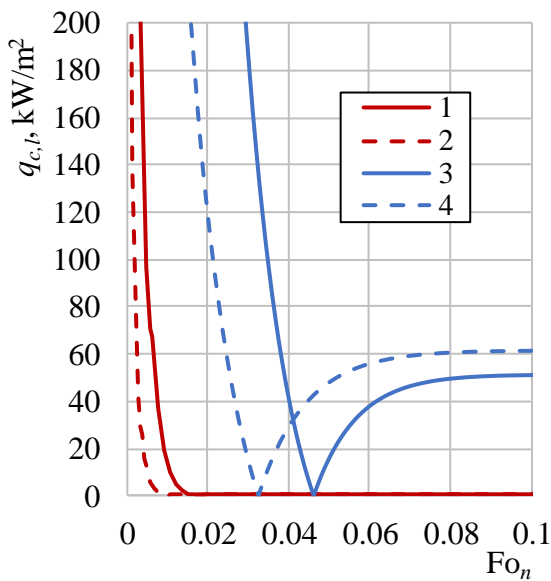




a)

b)

**3.12 pav.** Neizotermiškumo lašelyje dinamika FVRC pradžioje (a) ir vėliau (b). Kraštinės ŠMM sąlygos kaip paveiksle 3.7.



a)

b)

**3.13 pav.** Konvekcines šilumos sruto tankio lašelyje dinamika FVRC pradžioje (a) ir vėliau (b). Kraštinės ŠMM sąlygos kaip paveiksle 3.7.

Kondensaciniame režime į lašelį nuteka garo kondensacijos procese išsiskyrusi fazinių virsmų šiluma ir visa išorine konvekcija suteikta šiluma. Konvekcinis šilumos srautas lašelyje kondensaciniame režime yra intensyvus, kada apibrėžiamas šių šilumos srautų suma:

$$q_{c,l}(\tau \equiv 0 \rightarrow \tau_{co}) = q_{c,d}(\tau) + q_{f \equiv co}(\tau). \quad (2.29a)$$

150°C temperatūros dūmuose konvekcinio šilumos sruto lašeliuose tankis yra  $\approx 1326$  ir  $\approx 549$  kW/m<sup>2</sup>, o 800°C temperatūros dūmuose pradžioje yra  $\approx 2848$  ir  $\approx 1133$  kW/m<sup>2</sup>, kai lašelių skersmuo yra 100 ir

400  $\mu\text{m}$  atitinkamai. Vėliau kondensaciniame režime susilygina su konvekcinės šilumos srauto  $q_{c,d}(\tau_{co})$  tankiu, o pereinamo garavimo režime  $\tau_r$  momentu tampa nuliniu (3.13 pav. a), todėl:

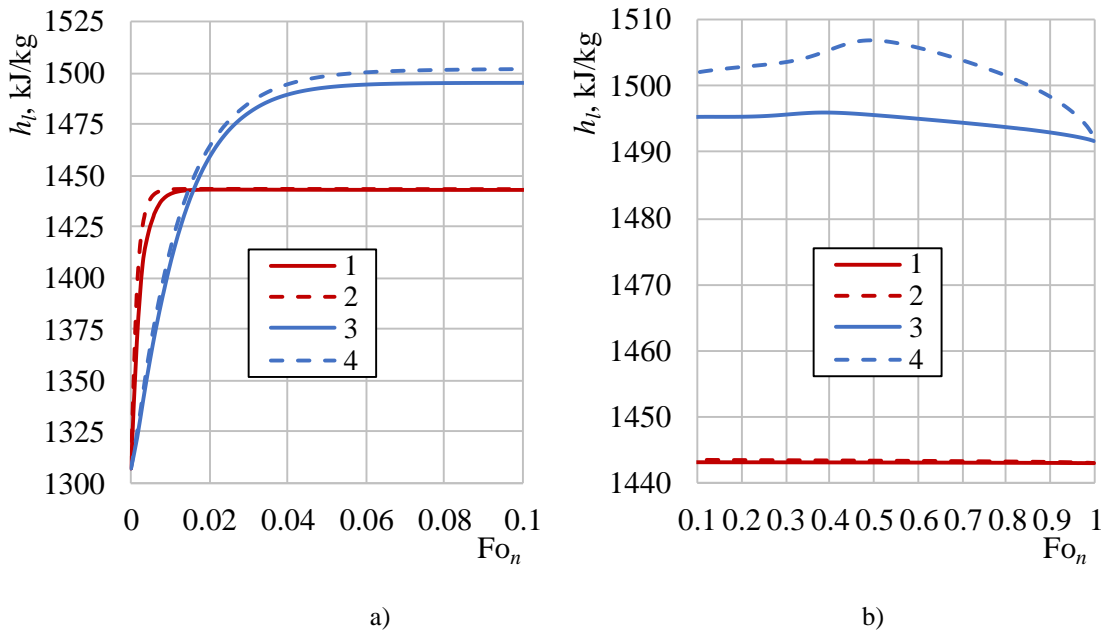
$$q_{c,l}(\tau \equiv \tau_{co} \rightarrow \tau_r) = q_{c,d}(\tau) - q_{f \equiv \text{gar}}(\tau), \text{ kai } q_{f \equiv \text{gar}}(\tau_r) = q_{c,d}(\tau_r). \quad (2.29b)$$

Išraiškoje (2.29b) srautas  $q_{f \equiv \text{gar}}$  apibrėžia garavimo procese dalyvaujančią išorinės konvekcijos srauto dalį. Pereinamojo garavimo antrajame laikotarpyje garavimo procese dalyvauja visas išorinės konvekcijos srautas ir vidinė konvekcija į paviršių ištekėjusi sugerto spinduliuotės srauto dalis, todėl

$$q_{c,l}(\tau \equiv \tau_r \rightarrow \tau_e) = q_{f \equiv \text{gar}}(\tau) - q_{c,d}(\tau), \text{ kai } q_{f \equiv \text{gar}}(\tau_e) = q_{c,d}(\tau_e) + q_{r,l}(\tau_e). \quad (2.29c)$$

Pusiausviro garavimo režime vandens garinime papildomai dalyvauja auštančio lašelio entalpijos pokyčiui (3.14 pav.) proporcingas šilumos srautas, kuris apibrėžiamas pagal lašelio masės vidutinės temperatūros kitimo (3.9 pav. b) ir (3.10 pav. b) spartą:

$$q_{c,l}(\tau \equiv \tau_e \rightarrow \tau_f) = q_{r,l}(\tau) - \frac{1}{3} \rho_l(\tau) c_{p,l}(\tau) \frac{dT_{l,m}(\tau)}{d\tau}. \quad (2.29d)$$

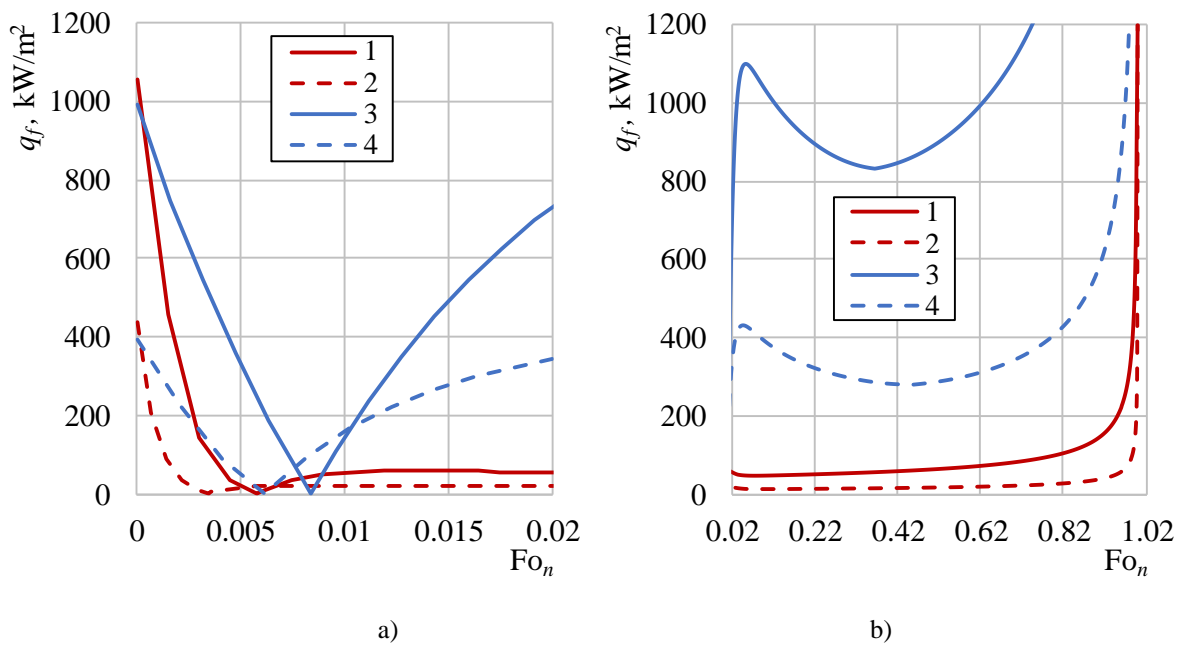


**3.14 pav.** Lašelio entalpijos dinamika FVRC pradžioje (a) ir vėliau (b). Kraštinės ŠMM sąlygos kaip paveiksle 3.7.

Lašelio faziniuose virsmuose dalyvaujančią šilumą apibrėžia fazinių virsmų šilumos srauto dinamika FVC režimuose (3.15 pav.). Kondensacinio režimo kaitos į garavimo režimą  $\tau_{co}$  momentu fazinių virsmų srautas sumažėja iki nulio (3.15 pav. a), o pereinamojo garavimo režime auga (2.17 pav. b) ir  $\tau_e$  momentu prilygsta dujų suteikiamo suminio šilumos srauto tankiui:

$$q_f(\tau \equiv \tau_e) \equiv q_{\Sigma,d}(\tau_e) = q_{c,d}(\tau_e) + q_{r,d}(\tau_e). \quad (2.30)$$

Pusiausviro garavimo režime fazinių virsmų šilumos srautas išlieka artimu dujų suteikiamos šilumos srautui, kadangi auštančio lašelio entalpijos pokyčiui proporcingas ir garinimo procese papildomai dalyvaujantis šilumos srautas nėra reikšmingas.



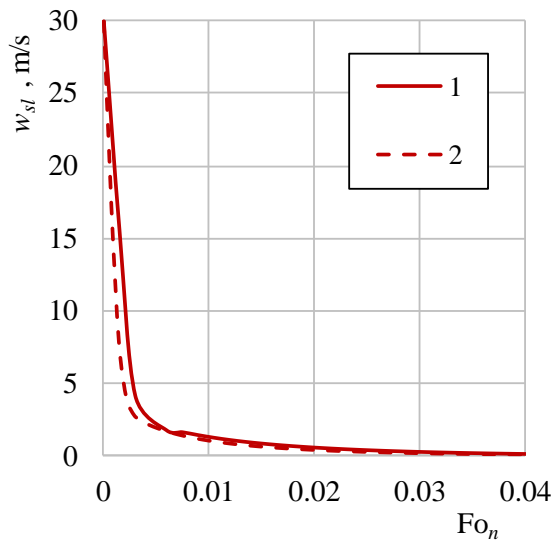
3.15 pav. Fazinių virsmų šilumos srauto tankio lašelyje dinamika FVRC pradžioje (a) ir vėliau (b). Kraštinės ŠMM sąlygos kaip paveiksle 3.7.

### 3.4. Lašelių dinaminio parametro kitimo FVC režimuose analizė

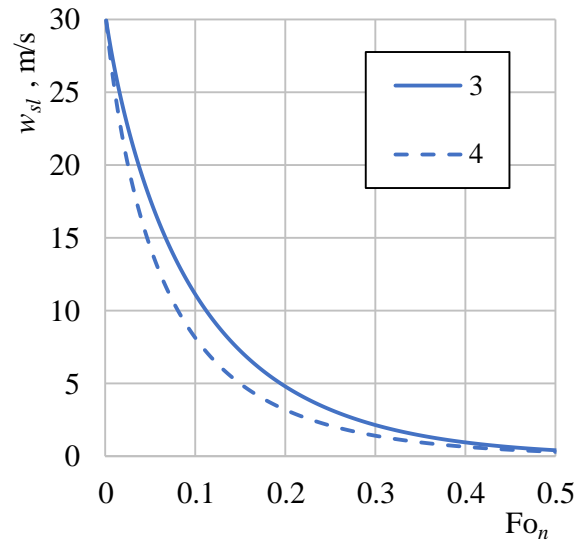
Lašelių dinaminiai parametrai yra apibrėžti lašelių slydimo greičio dūmų sraute sparčiu slopimu pereinamųjų FVC ciklo kondensaciniame ir pereinamojo garavimo režimuose (3.16 pav.). Lašelio slydimo greitis žemos temperatūros dūmų sraute mažėja sparčiau (3.16 pav. a) todėl, kad dūmų dinaminė klampa yra didesnė ir trinties bei pilno pasipriešinimo jėgos lašeliu veikia intensyviau. Tai daro didelę įtaką lašelio aptekėjimo režimą ir konvekcinio šildymo intensyvumą apibrėžiančio Reinoldso  $Re$  kriterijaus dinamikai (3.17 pav.).  $150^{\circ}C$  temperatūros dūmuose pradžioje  $Re$  yra  $\approx 114$  ir  $\approx 456$ , o  $800^{\circ}C$  temperatūros dūmuose yra  $\approx 30$  ir  $\approx 123$ , kai lašelių skersmuo yra 100 ir 400  $\mu m$  atitinkamai, vėliau pereinamojo garavimo režime nuosekliai sumažėja iki nulio (3.17 pav.)

Lašelio slydimo greitis apibrėžia jo paviršiuje kylančias trinties jėgas, kurios iššaukia vandens priverstinę cirkuliaciją lašelyje. Kylančių jėgų lygmenį apibrėžia Pekle  $Pe_l$  kriterijus vandeniui, kurio kitimą FVC režimuose (3.18 pav. a) apibrėžia lašelio slydimo greičio dinamika.  $150^{\circ}C$  temperatūros dūmuose pradžioje  $Pe_l$  yra  $\approx 1292$  ir  $\approx 85207$ , o  $800^{\circ}C$  temperatūros dūmuose yra  $\approx 848$  ir  $\approx 5384$ , kai lašelių skersmuo yra 100 ir 400  $\mu m$  atitinkamai, vėliau pereinamojo garavimo režime nuosekliai sumažėja iki nulio (3.17 pav.).

Savo ruožtu Pekle kriterijaus kitimas lemia konvekcinio šilumos srauto intensyvumą apibrėžiančio efektyviojo šilumos laidumo  $kc$  parametro dinamiką FVC režimuose (3.19 pav. b). Parametras  $kc$  nusako kiek kartu konvekcinė šilumos pernaša yra intensyvesnė už grynojo šilumos laidumo lašelyje atvejį.

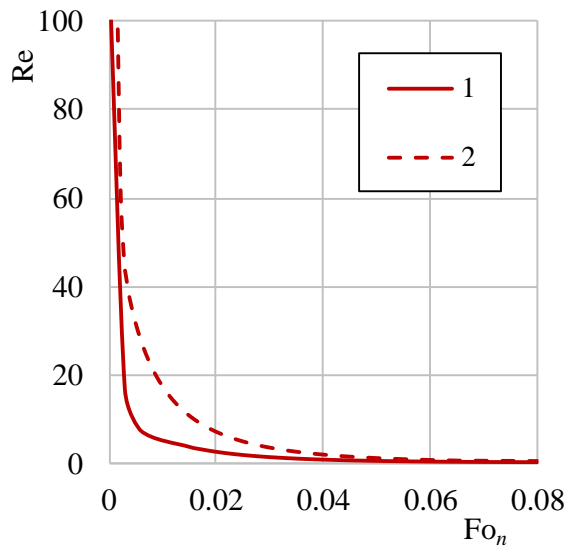


a)

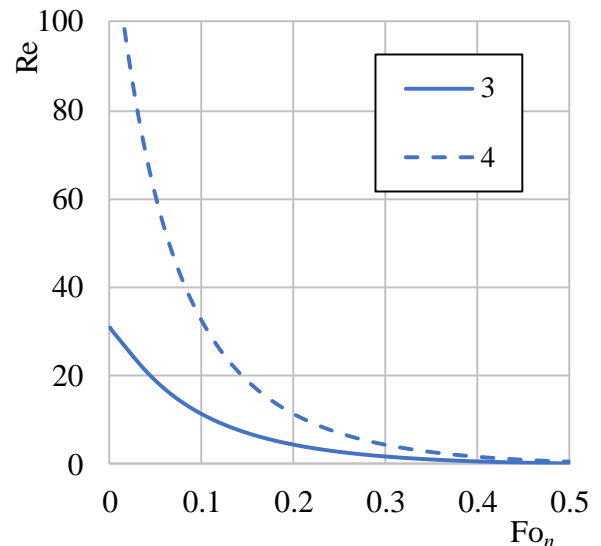


b)

**3.16 pav.** Lašelių slydimo greičio kitimas FVC pereinamajame režime 150°C (a) ir 800°C (b) dūmų sraute. Kraštinės ŠMM sąlygos kaip paveiksle 3.7.



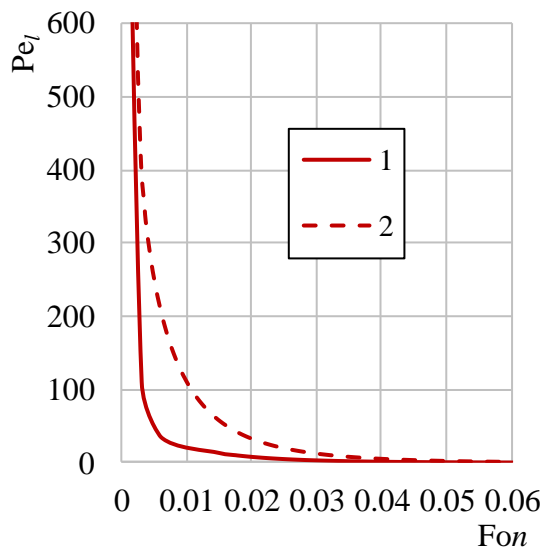
a)



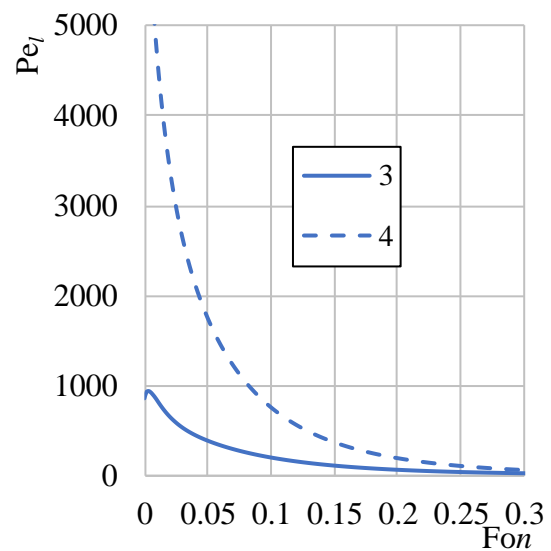
b)

**3.17 pav.** Reinoldso kriterijaus dinamika FVC pereinamajame režime 150°C (a) ir 800°C (b) dūmų sraute. Kraštinės ŠMM sąlygos kaip paveiksle 3.7.

Modeliuotais atvejais, nepriklausomai nuo dūmų temperatūros, pradžioje apskaičiuotais  $Pe \approx 2.72$ , kas pilnai atitinka eksperimentais patvirtintą maksimalią vertę, o vėliau pereinamojo garavimo režime nuosekliai pasiekia vienetinę vertę, kas patvirtina išsivyravus sudėtinio šilumos plitimo lašelyje spinduliavimu ir laidumu atvejį.

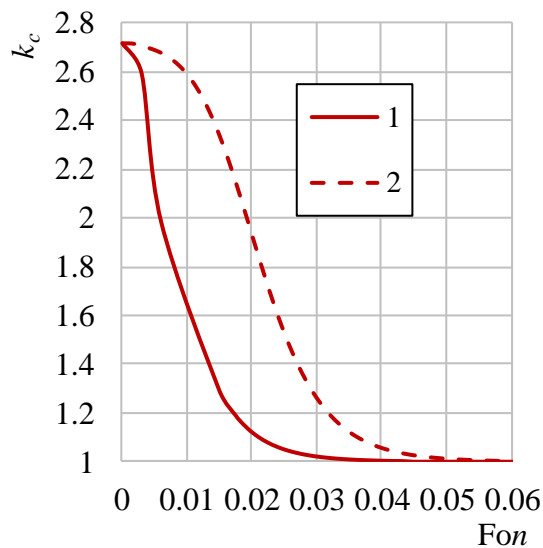


a)

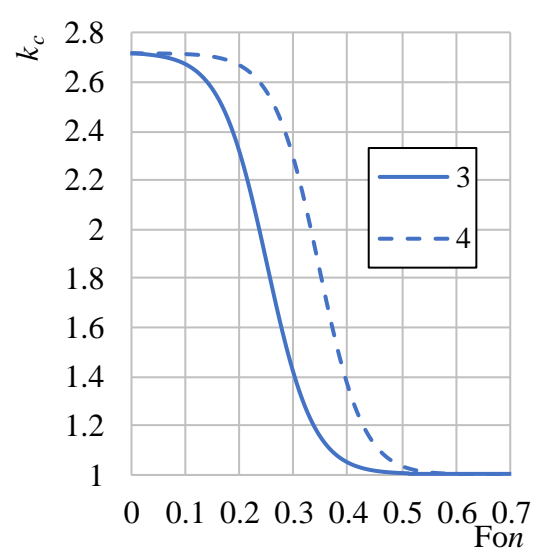


b)

**3.18 pav.** Pekle  $Pe_l$  kriterijus vandeniui dinamika FVC pereinamajame režime 150°C (a) ir 800°C (b) dūmų sraute Kraštinės ŠMM sąlygos kaip paveiksle 3.7.



a)



b)

**3.19 pav.** Efektyviojo  $k_c$  parametro dinamika FVC pereinamajame režime 150°C (a) ir 800°C (b) dūmų sraute. Kraštinės ŠMM sąlygos kaip paveiksle 3.7.

### 3.5. Stefano hidrodinaminio srauto įtakos lašelio konvekciniam šildymui ir faziniams virsmams įvertinimas

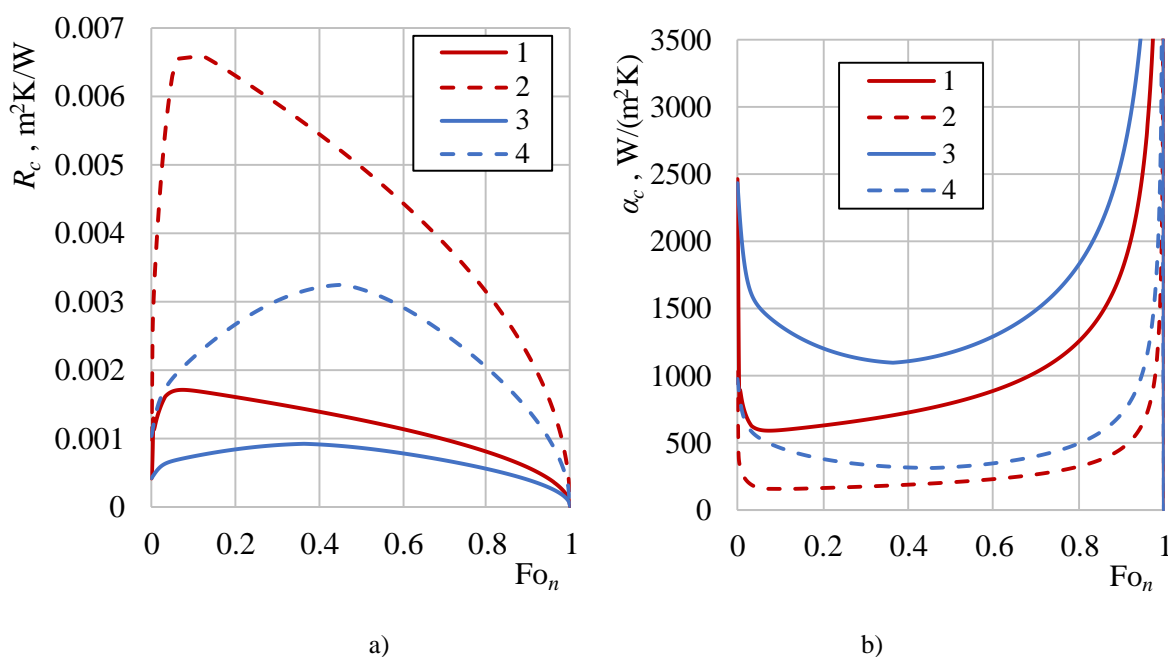
Kaip jau minėta, Fazinius virsmus visuomet lydi Stefano hidrodinaminis srautas. Jo poveikyje pakinta lašelius gaubiančių pasienio sluoksnių storis, todėl pakinta ir lašelių konvekcinio šildymo ir fazinių virsmų procesų greitis. Stefano hidrodinaminis srautas yra vadinamas skysčio paviršinių fazinių virsmų (skysčio garavimo ir garo kondensacijos) metu kylantis dujų mišinio papildomas savaiminis judėjimas, kuris užtikrina dujinės terpės masės nepertraukiamumą arti skysčio jo paviršinių fazinių virsmų metu. Fundamentinis Stefano hidrodinaminio srauto kilmės fizikinis pagrindimas yra labai

sudėtingas, tačiau jo atsiradimas ir įtaka šilumos ir masės pernašos sudėtiniais procesams yra patvirtinta eksperimentiškai.

Pasaulyje plačiai vykdytuose teoriniuose ir eksperimentiniuose skysčio lašelių garavimo proceso tyrimuose (dalis jų yra cituoti ir aptarti jau anksčiau) įrodyta, kad Stefano hidrodinaminis srautas lašelių konvekcinių šildymą garavimo režime susilpnina, o kondensaciniame režime sustiprina. Inžineriškai Stefano hidrodinaminio srauto įtaką konvekciniams lašelių šildymui garavimo režime supaprastintai galima paaiškinti poveikiu šiluminiam pasienio  $\delta_T$  sluoksniui: nuo skysčio sklindant papildomam žemesnės už aplinkos temperatūrą garo ir dujų mišiniui, šiluminis pasienio sluoksnio storis pastorėja, todėl šilumos atidavimo terminė varža  $R_a$  [ $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ ] išauga ir lašelių konvekcinis šildymas susilpnėja. Šilumos atidavimo terminę varžą (3.20 pav. a) apibrėžiantis konvekcinės šilumos atidavimo  $\alpha_c$  [ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ] koeficientas (3.20 pav. b) lašelių fazinių virsmų režimuose kinta ir ryškiai priklauso nuo kraštinių ŠMM sąlygų:

$$\alpha_c = \frac{\lambda_{vd} \text{Nu}_f}{2R}, \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]. \quad (2.31)$$

$$R_c = \frac{1}{\alpha_c}, \left[ \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \right]. \quad (2.32)$$



**3.20 pav.** Šilumos atidavimo koeficiento (a) ir terminės varžos (b) kitimo dinamika lašelių FVC cikle. Kraštinės ŠMM sąlygos paveiksle 3.7.

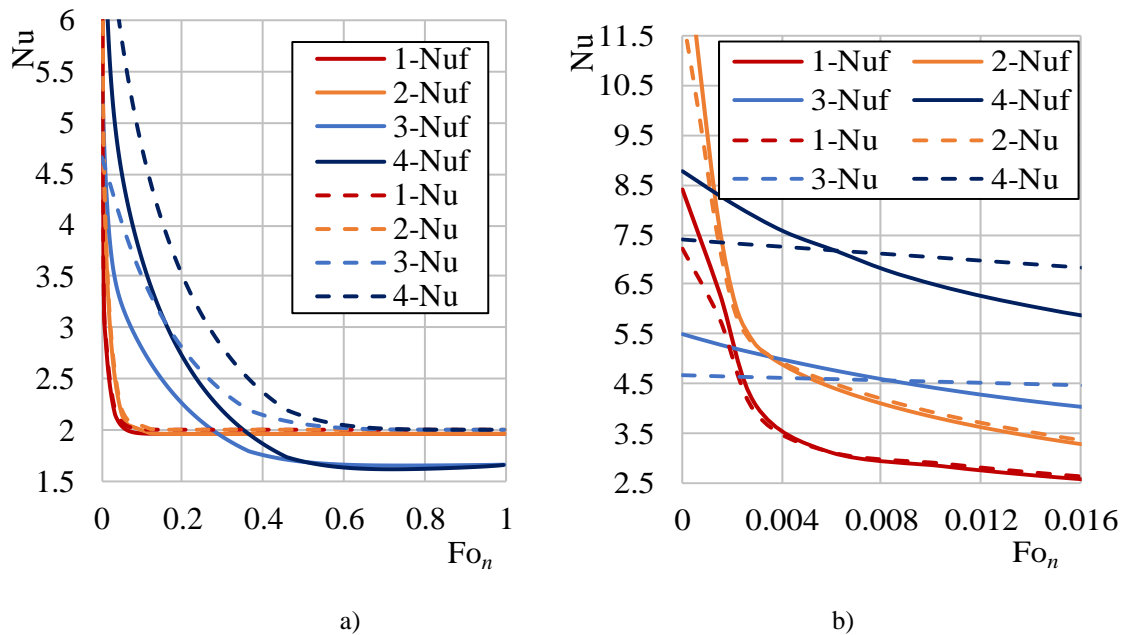
Stefano hidrodinaminio srauto įtaką konvekcinei šilumos pernašai lašelių FVC režimuose apibrėžta Nuselto  $\text{Nu}_f$  ir  $\text{Nu}$  kriterijų santykiu, o įtaką faziniams virsmams apibrėžti Šervudo  $\text{Sh}_f$  ir  $\text{Sh}$  kriterijų santykiu:

$$\text{Nu}_n(\text{Fo}) = \frac{\text{Nu}_f(\text{Fo})}{\text{Nu}(\text{Fo})}. \quad (2.33a)$$

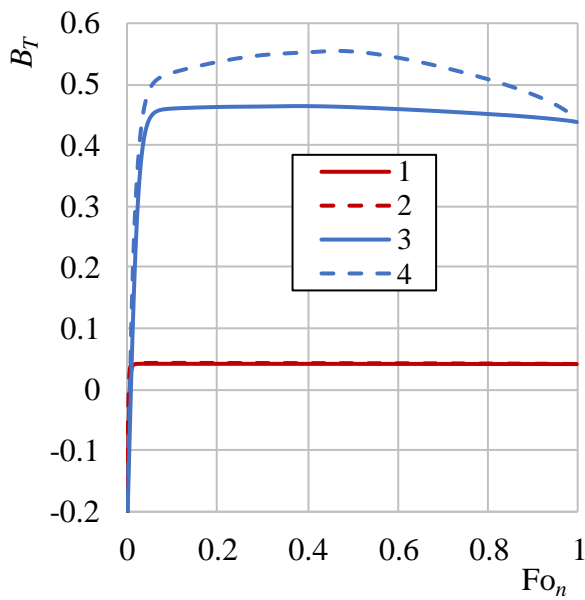
$$\text{Sh}_n(\text{Fo}) = \frac{\text{Sh}_f(\text{Fo})}{\text{Sh}(\text{Fo})}. \quad (2.33b)$$

Čia:  $Nu_n$  – bematis Nuselto kriterijus, kiekybiškai apibrėžiantis Stefano hidrodinaminio srauto įtaką lašelio konvekciniam šildymui;  $Nu_f$  – Nuselto kriterijus, kuriame atsižvelgta į Stefano hidrodinaminio srauto įtaką lašelio konvekciniam šildymui;  $Nu$  – Nuselto kriterijus, apibrėžiamas pagal (2.11b) modelį;  $Sh_n$  – bematis Šervudo kriterijus, kiekybiškai apibrėžiantis Stefano hidrodinaminio srauto įtaką lašelio konvekciniam faziniams virsmams;  $Sh_f$  – Šervudo kriterijus, kuriame atsižvelgta į Stefano hidrodinaminio srauto įtaką lašelio konvekciniam faziniams virsmams;  $Sh$  – Šervudo kriterijus, apibrėžiamas pagal (2.4c) modelį.

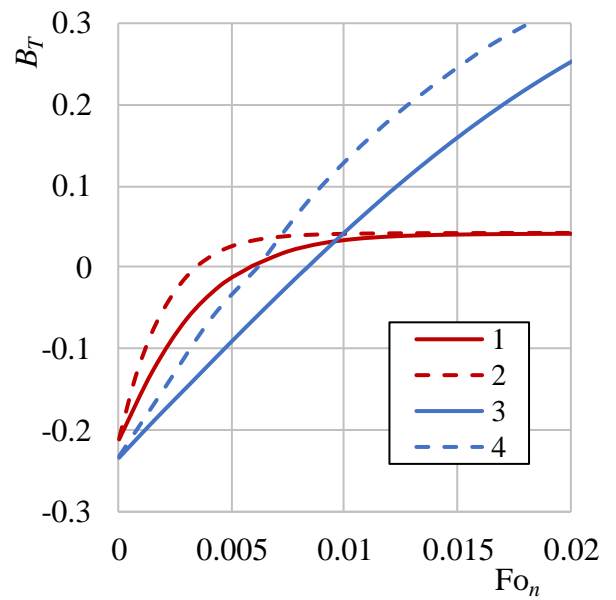
Stefano hidrodinaminio įtaka lašelių konvekciniam šildymui lašelių FVC režimuose yra skirtinga (3.21 pav.). Šią įtaką įvertinantis apskaičiuotasis Nuselto  $Nu_f$  kriterijus kondensaciniame režime yra didesnis už analogiškos lašeliui sferinės dalelės apskaičiuotąjį  $Nu$  kriterijų (3.21 pav. b), o garavimo režime yra mažesnis (3.21 pav. a). Tai įvertinti įgalina Spoldingo šilumos pernašos parametro  $B_T$  kitimo lašelių FVC režimuose (3.22 pav.) savitumas: kondensaciniame režime apskaičiuotasis  $B_T$  yra neigiamas (3.22 pav. b), o garavimo režime yra teigiamas (3.22 pav. a). Kiekybinę Stefano hidrodinaminio srauto įtaką konvekciniam šildymui aiškiai parodo bemačio Nuselto  $Nu_n$  kriterijaus dinamika FVC režimuose (3.23 pav. a).



**3.21 pav.** Nuselto  $Nu_f$  (ištinės linijos) ir  $Nu$  (punkturai) kriterijų kitimas lašelių FVC cikle (a) bei kondensaciniame režime ir pradinėje garavimo stadijoje (b). Kraštinės ŠMM sąlygos paveiksle 3.7.

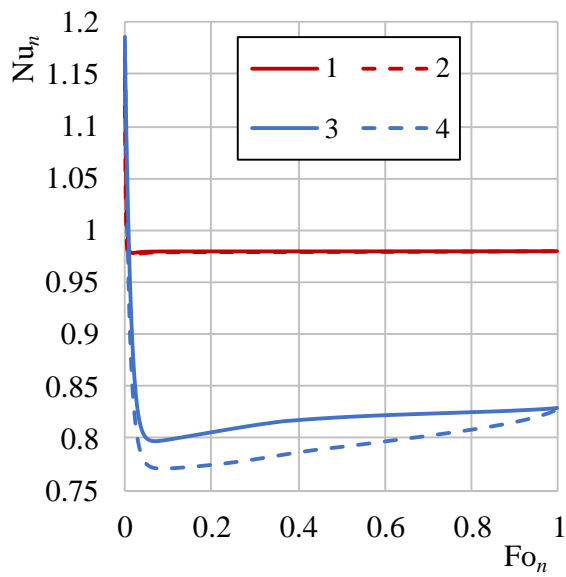


a)

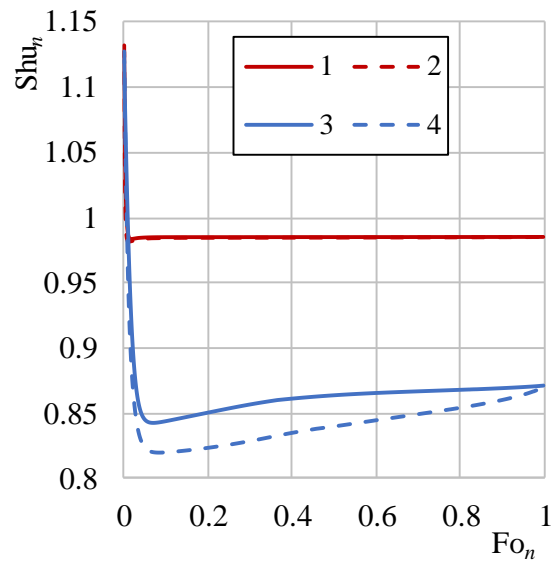


b)

**3.22 pav.** Spoldingio šilumos pernašos parametro  $B_T$  kitimas lašelių FVR cikle (a) bei kondensaciniame režime ir pradinėje garavimo stadijoje (b). Kraštinės ŠMM sąlygos paveiksle 3.7.



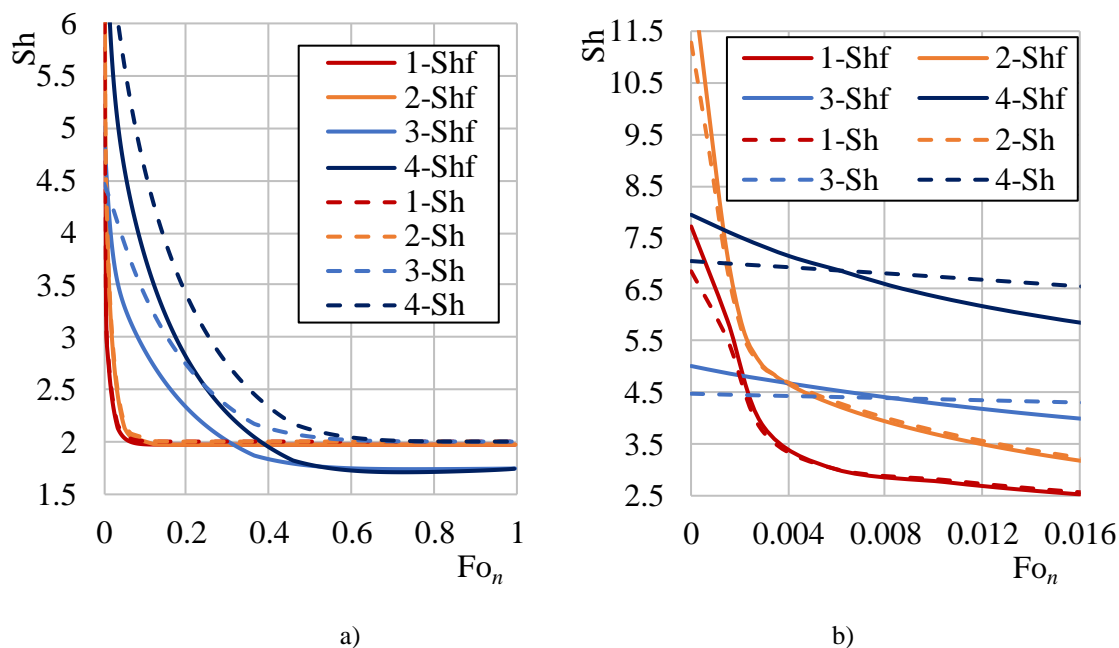
a)



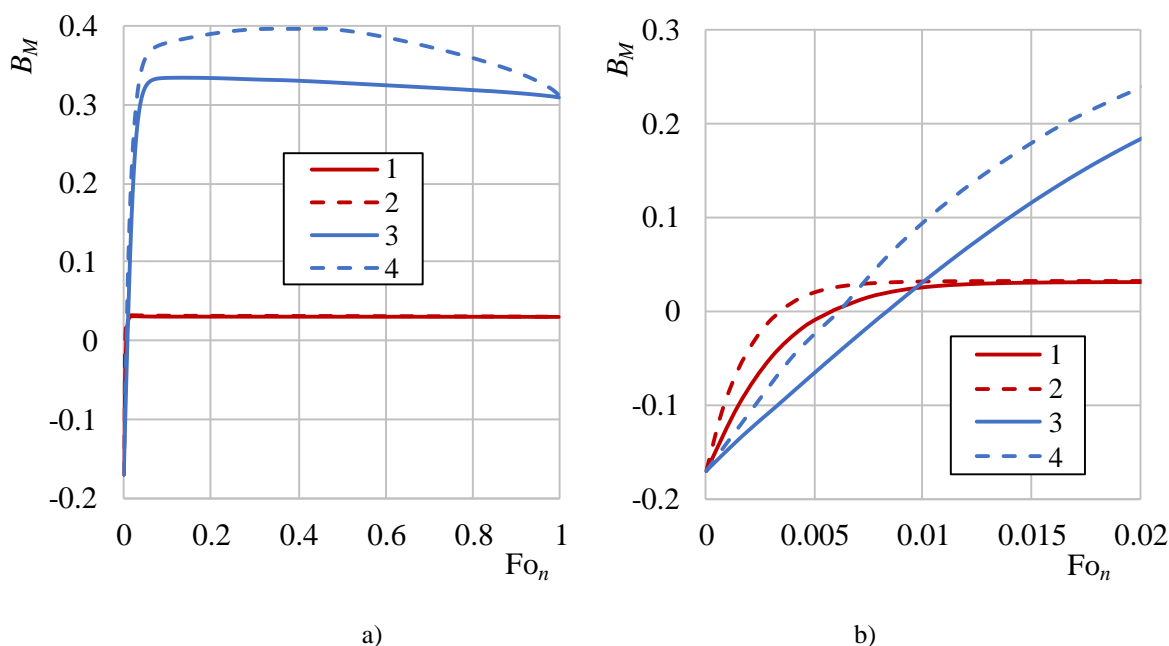
b)

**3.23 pav.** Bemačio Nuselto  $Nu_n$  kriterijaus (a) ir bemačio Šervudo  $Sh_n$  kriterijaus (b) dinamika lašelių FVR cikle. Kraštinės ŠMM sąlygos paveiksle 3.7.





**3.24 pav.** Šervudo  $Sh_f$  (išsistinės linijos) ir  $Sh$  (punkturai) kriterijų kitimas lašelių FVR cikle (a) bei kondensaciniame režime ir pradinėje pereinamojo garavimo režimo stadijoje (b). Kraštinės ŠMM sąlygos paveiksle 3.7.



**3.25 pav.** Spaldingo masės pernašos parametro  $B_M$  kitimas lašelių FVR cikle (a) bei kondensaciniame režime ir pradinėje garavimo stadijoje (b). Kraštinės ŠMM sąlygos paveiksle 3.7.

Stefano hidrodinaminio srauto įtaka lašelių konvekciniam faziniam virsmams taip pat yra skirtinga (3.24 pav.). Šią įtaką įvertinantis Šervudo  $Sh_f$  kriterijus kondensaciniame režime yra didesnis už apskaičiuotąjį  $Sh$  kriterijų (3.24 pav. b), o garavimo režime yra mažesnis (3.24 pav. a). Stefano hidrodinaminio srauto įtaką įvertinančio Šervudo  $Sh_f$  kriterijaus kitimo FVC kondensaciniame ir garavimo režimuose dėsningumą apibrėžia Spaldingo masės pernašos parametro  $B_M$  kitimo lašelių FVC režimuose (3.25 pav.) savitumas: kondensaciniame režime apskaičiuotasis  $B_M$  yra neigiamas (3.25 pav. b), o garavimo režime yra teigiamas (3.25 pav. a). Tačiau Spaldingo masės pernašos parametras  $B_M$  už šilumos pernašos parametą  $B_T$  visais modeliuotais atvejais gautas kiek mažesnis.

Tai rodo, jog Stefano hidrodinaminio srauto poveikis lašelių konvekcinei šilumokaitai yra reikšmingesnis. Kiekybinę Stefano hidrodinaminio srauto įtaką lašelių konvekciniams faziniams virsmams aiškiai parodo bemačio Šervudo  $Sh_n$  kriterijaus dinamika FVC režimuose (3.23 pav. b).

## Išvados

1. Efektyviam dūmų valymui ir šilumos atgavimui iš dūmų biokurą deginančiuose įrenginiuose vandenį technologiškai įpurkšti reikia trimis etapais: į aukštos temperatūros kūryklos dūmus, prieš kondensacinį ekonomaizerį ir kondensaciniame ekonomaizeryje.
2. Aukštos temperatūros dūmų sraute įpurkšto vandens lašeliai pašyla iki pusiausviram garavimui būdingos temperatūros, kuri yra žemesnė už vandens soties būsenos temperatūrą, todėl lašeliai, skirtingai nuo didelio vandens tūrio, intensyviai garuodami neužverda.
3. Lašelių fazinius virsmus drėgnų dūmų sraute apibrėžia dūmų ir vandens temperatūra, lašelių dispersiškumas bei jų šildymo režimas.
4. Vandens įpurškimui prieš kondensacinį ekonomaizerį dūmų temperatūrai esant 150°C spinduliavimo įtaka kiekybiškai įpurkšto vandens lašelių terminai būsenai nėra reikšminga, o aukštos 800°C temperatūros dūmų sraute spinduliuotės įtaka stambesniai lašeliui yra ryški, apie 2,5°C.
5. Disperguoto vandens šilumokaitai ir faziniams virsmams dūmų sraute reikšmingą įtaką turi šilumokaitos režimo lašeliuose kaita jų FVC režimuose. Trinties jėgų poveikyje lašelių slydimas dūmuose silpnėja. Tai palanku priverstinei vandens cirkuliacijai lašelyje susilpnėti.
6. Pradžioje slystančiame lašelyje vyksta sudėtinis konvekcinis-radiacinis šilumos plitimas. Lašelių slydimui silpnėjant, pereinamajame garavimo režime nuosekliai pereinama į kondukcinį-radiacinį šilumos plitimą juose
7. Pusiausviro garavimo režime lašeliai sparčiai mažėja ir spinduliuotės sugėrimas juose silpnėja. Todėl baigiamojoje garavimo stadijoje šilumos plitimas lašeliuose artimas laidumui.
8. Kai technologiškai naudinga išvengti kondensacinio režimo, rekomenduotina įpurkšti pašildytą virš rasos taško temperatūros vandenį. Tuomet dūmai netik bus atausinti, bet ir papildomai pridrėks, kas naudinga efektyviam kondensacinio ekonomaizerio darbui.

## Literatūros sąrašas

1. K. Handayani, Y. Krozer, T. Filatova. From fossil fuels to renewables: an analysis of long-term scenarios considering technological learning. *Energy Policy*, 2019, Vol. 127, pp. 134-14
2. Lietuvos centralizuotos šilumos tiekimo sektoriaus 2021 metų apžvalga [Žiūrėta 2024-05-14] Prieiga per internetą: [2021\\_CST\\_apzvalga\\_Final\\_RG.pdf \(lsta.lt\)](#)
3. M.F. Koseoglu. 2013 Investigation of water droplet carryover phenomena in industrial evaporative air-conditioning systems, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 47: 92-97.
4. A. Jenft; et. all. 2014. Experimental and numerical study of pool fire suppression using water mist, *Fire Safety Journal* 67: 1-12.
5. Kamia Handayani; et. all. 2019. From fossil fuels to renewables: an analysis of long-term scenarios considering technological learning, *Energy Policy* 127: 134-146.
6. Chang-Eon Lee; et. all. 2018. Analysis of the thermodynamic performance of a waste-heat-recovery boiler with additional water spray onto combustion air stream *Applied Thermal Engineering* 135: 197-205.
7. Yumeng Zhang; et. all. 2020. Investigation into water vapor and flue gas temperatures on the separation capability of a novel cyclone separator, *Powder Technology* 361: 171-178.
8. Chang-Eon Lee; et. all. 2018. Analysis of the thermodynamic performance of a waste-heat-recovery boiler with additional water spray onto combustion air stream, *Applied Thermal Engineering* 135: 197-205.
9. Lietuvos Respublikos Energetikos Ministerija “Nacionalinė energetinės nepriklausomybės strategija 2018” [Žiūrėta 2024-04-14] Prieiga per internetą: [Nacionaline energetines nepriklausomybes strategija 2018 LT.pdf \(lrv.lt\)](#)
10. International Energy Agency Energy system of Lithuania [Žiūrėta 2024-05-02] Prieiga per internetą: <https://www.iea.org/countries/lithuania/energy-mix>
11. Lietuvos energetikos agentūra Bendrasis suvartojimas [Žiūrėta 2024-05-12] Prieiga per internetą: <https://www.ena.lt/bendrasis-suvartojimas/>
12. Lietuvos energetikos agentūra Jūrinės vėjo energetikos vystymas [Žiūrėta 2024-05-14] Prieiga per internetą: <https://www.ena.lt/jve-vystymas/>
13. Lietuvos šilumos tiekėjų asociacijos Žurnalas „Šiluminė technika“ 2023 Nr.2 (Nr.88) Spalis
14. Villu Vares, Ülo Kask, Peeter Muiste, Tõnu Pihu, Sulev Soosaar 2007. Biokuro naudotojo žinynas
15. Gintautas Miliauskas, Virginijus Ramanauskas ŠILUMOS ENERGETIKA IR TECHNOLOGIJOS – 2017 Sudėtinių šilumos ir masės pernašos procesų biokuro terminėse technologijose apibrėžimo poreikis ir savitumai p. 64-71.
16. Lietuvos Respublikos Energetikos Ministerijos Tyrimai ir analizės Išsamus Nacionalinio Šilumos Ir Vėsumos potencialo įvertinimo studija 2022 lapkričio mėn. [Žiūrėta 2024-05-02] Prieiga per internetą: [2h8i-XcAaxc.pdf \(lrv.lt\)](#)
17. G. Miliauskas; et. all. 2021. The interaction of the complex transfer processes in the phase transformations regimes of a water droplets, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 169: 120761.
18. B. Abramzon, W. A. Sirignano. 1989. Droplet vaporization model for spray combustion calculations, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 32: 1605-1618.

19. William A. Sirignano. Fluid Dynamics and Transport of Droplets and Sprays. 2000, Cambridge University Press. 1989.
20. G. Miliauskas. 2001. Regularities of unsteady radiative-conductive heat transfer in evaporating semitransparent liquid droplet., *International Journal of Heat and Mass Transfer* 44: 785-798.
21. Tseng C.C., Viskanta R. 2014. Enhancement of water droplet evaporation by radiation absorption, *Fire Safety Journal* 41: 236-247. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2006.01.001>
22. G. Miliauskas, M. Maziukiene, V. Ramanauskas Peculiarities of the transit phase transformation regime for water droplets that are slipping in humid gas *International Journal of Heat and Mass Transfer* Volume 102, November 2016, Pages 302-314
23. Paulius PUSTELNINKAS, Gintautas MILIAUSKAS, Monika Maziukienė Numerical modelling of phase transformations of water droplets for efficient heat recovery from biofuel flue gas *ISSN 1392-1207. MECHANIKA* 2024-01-09 pateiktas spaudai
24. Kriegler E., et. all. Fossil-fuelled development (SSP5): An energy and resource intensive scenario for the 21st century. *Global Environmental Change*, 2017, Vol. 42, p. 297-315.
25. Handayani K, Krozer Y., Filatova T. From fossil fuels to renewables: an analysis of long-term scenarios considering technological learning. 2019, *Energy Policy*, Vol. 127, p. 134-136.
26. Borawski, P., et. all. Development of renewable energy sources market and biofuels in The European Union. *Journal of Cleaner Production*, 2019, Vol. 228, p. 467-484.
27. Jan Malat'ák, et. all. Emissions from combustion of renewable solid biofuels from coniferous tree cones. *Fuel*, 2020, Vol. 276, art. no. 118001.
28. Juan Luis Rodríguez, et. all. Design of solid biofuels blends to minimize the risk of sintering in biomass boilers. *Journal of the Energy Institute*, 2020, Vol. 93, p. 2409-2414.
29. Esa Kari Vakkilainen. 2 - Solid Biofuels and Combustion. *Steam Generation from Biomass/ Construction and Design of Large Boilers*, 2020, Vol. 93, p. 2409-2414.
30. H. Pawlak-Kruczek, M. Ostrycharczyk, J. Zgóra. Co-combustion of liquid biofuels in PC boilers of 200 MW utility unit. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, Vol. 34, p. 2769-2777.
31. S.S. Reham, et. all. Study on stability, fuel properties, engine combustion, performance and emission characteristics of biofuel emulsion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, Vol. 52, pp. 1566-1579.
32. Stefano Frigo, et. all. Utilisation of advanced biofuel in CI internal combustion engine. *Fuel*, 2021, Vol. 297, art. no. 120742.
33. Ziming Yang, et. all. Spray and combustion characteristics of pure hydrothermal liquefaction biofuel and mixture blends with diesel. *Fuel*, 2021, Vol. 297, art. no. 120498.
34. Sven Hermansson, Fredrik Lind, Henrik Thunman. On-line monitoring of fuel moisture-content in biomass-fired furnaces by measuring relative humidity of the flue gases. *Chemical Engineering Research and Design*, 2011, Vol. 89, p. 2470-2476.
35. Bao Jingjing, et. all. Experimental study of fine particles removal in the desulfurated scrubbed flue gas. *Fuel*, 2013, Vol. 108, pp. 73-79.
36. Hao Wu, et. all. Improving the removal of fine particles by heterogeneous condensation during WFGD processes. *Fuel Processing Technology*, 2016, Vol. 145, p. 116-122.
37. Jianmin Liu, Fahua Zhu, Xiuyuan Ma. Industrial Application of a Deep Purification Technology for Flue Gas Involving Phase-Transition Agglomeration and Dehumidification. *Engineering*, 2018, Vol. 4, p.416-420.

38. Qianwen Wang, et. all. Promoting fine particle removal in double-tower cascade wet flue gas desulfurization system by flue gas temperature reduction. *Powder Technology*, 2020, Vol. 373, pp. 581-589.
39. G. Miliauskas, M. Maziukiene, R. Poškas, et. all. Investigation of mass and heat transfer transitional processes of water droplets in wet gas flow in the framework of energy recovery technologies for biofuel combustion and flue gas removal. *Energy*, 2019, Vol. 173, pp. 740-754.
40. Miliauskas G., Puida E., Poškas R., et. all. The modeling of transient phase changes of water droplets in flue gas flow in the range of temperatures characteristic of condensing economizer technologies. *Energy*, 2022, Vol. 257, art. no. 124719.
41. A. Vannoni, A. Giugno, A. Sorce. Integration of a flue gas condensing heat pump within a combined cycle: Thermodynamic, environmental and market assessment. *Applied Thermal Engineering*, 2021, Vol. 184, art. no. 116276.
42. Miliauskas, G.; Ramanauskas, V.; Maziukienė, M. The interaction of the complex transfer processes in the phase transformations regimes of a water droplets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, Vol. 169, art. no. 120761.
43. C.C. Tseng, R. Viskanta. Enhancement of water droplet evaporation by radiation absorption, *Fire Safety Journal*, 2006, Vol. 41, p. 236–247.
44. .B. Abramzon, W.A. Sirignano. Droplet vaporization model for spray combustion calculations, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1989, Vol. 32, p. 1605–1618.
45. Williams A. Sirignano. *Fluid Dynamics and Transport of Droplets and Sprays*. 2000, Cambridge University Press.
46. G. Miliauskas. Regularities of unsteady radiative-conductive heat transfer in evaporating semitransparent liquid droplets, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001, Vol. 44, p. 785-798.
47. G. M. Hale, M. R. Query, Optical constant of water in the 200-nm to 200- $\mu$ m wavelength region. *Applied Optics*. 1973, Vol. 12, p. 555-563.
48. Miliauskas G., Adomavičius A., Maziukienė M. Modelling of water droplets heat and mass transfer in the course of phase transitions. II: Peculiarities of the droplet radial coordinate and the time grid calibration, *Nonlinear analysis: modelling and control*. 2017, Vol. 22, p. 386-403.
49. G. M. Harpole. Radiative absorption by evaporating droplets, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1980, Vol. 23, p. 17-26.
50. G. Miliauskas, M. Maziukienė, R. Poškas, H. Jouhara. Peculiarities of thermal and energy state variation in phase change regimes of water droplets in radiating biofuel flue gas flow. *Energy*, 2024 (in press)

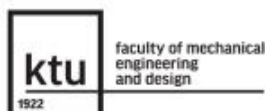
## Priedai

### 1 priedas. Industrial Engineering 2023 CIRCULAR ECONOMY: PRODUCTION AND CONSUMPTION Certificate



**dr. Andrius Vilkauskas**

Dean of the Faculty of Mechanical Engineering and Design



**2 priedas. 2024-02-19 Pažyma dėl pateikto straipsnio „Numerical Modelling of Phase Transformations of Water Droplets for Efficient Heat Recovery from Biofuel Flue Gas“ mokslo žurnalo „Mechanika“ redakcijai.**



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETO  
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

Žurnalo „Mechanika“ mokslinis sekretorius  
dr. Evaldas Narvydas

Dėl straipsnio pateikimo  
mokslo žurnalui „Mechanika“

**PAŽYMA**

2024-02-19

Kaunas

Pažymime, kad *Paulius PUSTELNINKAS*, *Gintautas MILLAUSKAS* ir *Monika MAZIUKIENE* mokslo žurnalo „Mechanika“ redakcijai pateikė straipsnį „*Numerical Modelling of Phase Transformations of Water Droplets for Efficient Heat Recovery from Biofuel Flue Gas*“.

dr. Evaldas Narvydas

Evaldas Narvydas, tel. (8 685) 96413, el. p. [evaldas.narvydas@ktu.lt](mailto:evaldas.narvydas@ktu.lt)