



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

**Justina Menkeliūnienė**

**VANDENS IŠPURŠKIMO TECHNOLOGIJOS PRITAIKYMAS  
BIOKURO DŪMŲ ŠILUMOS UTILIZAVIMO ASPEKTE**

Magistro projektas

**Vadovas**  
prof. habil. dr. G. Miliauskas

**KAUNAS, 2016**

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

**VANDENS IŠPURŠKIMO TECHNOLOGIJOS PRITAIKYMAS  
BIOKURO DŪMŲ ŠILUMOS UTILIZAVIMO ASPEKTE**

Magistro projektas  
Termoinžinerija (621E30001)

**Vadovas**

(parašas) prof. habil. dr. G. Miliauskas  
(data)

**Recenzentas**

(parašas) Doc. Robertas Poškas  
(data)

**Projektą atliko**

(parašas) Justina Menkeliūnienė  
(data)

**KAUNAS, 2016**



## KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Mechanikos inžinerijos ir dizaino

(Fakultetas)

Justina Menkeliūnienė

(Studento vardas, pavardė)

Termoinžinerija (621E30001)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Vandens išpurškimo technologijos pritaikymas biokuro dūmų šilumos utilizavimo aspekto“

### AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 \_\_\_\_ m. \_\_\_\_\_ d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Justinos Menkeliūnienės**, baigiamasis projektas tema „Vandens išpurškimo technologijos pritaikymas biokuro dūmų šilumos utilizavimo aspekto“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

\_\_\_\_\_  
(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

\_\_\_\_\_  
(parašas)

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

**Tvirtinu:** \_\_\_\_\_

Šilumos ir atomo energetikos (parašas, data)

katedros vedėjas

Doc. E. Puida

(vardas, pavardė)

**MAGISTRANTŪROS UNIVERSITETINIŲ STUDIJŲ BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS**  
**Studijų programa TERMOINŽINERIJA**

Magistrantūros studijų, kurias baigus įgyjamas magistro kvalifikacinis laipsnis, baigiamasis darbas yra mokslinio tiriamojo arba taikomojo pobūdžio darbas (projektas). Jam atlikti ir apginti skiriama 30 kreditų. Šiuo darbu studentas parodo, kad yra pagilinęs ir papildęs pagrindinėse studijose įgytas žinias, turi pakankamai gebėjimų formuluoti ir spręsti aktualią problemą, turėdamas ribotą ir (arba) prieštaringą informaciją, geba savarankiškai atlikti mokslinius ar taikomuosius tyrimus ir tinkamai interpretuoti duomenis. Taip pat jis parodo, kad yra kūrybingas, geba taikyti fundamentines mokslo žinias, išmano socialinės bei komercinės aplinkos, teisės aktų ir finansines galimybes, turi informacijos šaltinių paieškos ir kvalifikuotos jų analizės, skaičiuojamųjų metodų ir specializuotos programinės įrangos bei bendrosios paskirties informacinių technologijų naudojimo, taisyklingos kalbos vartosenos įgūdžių, geba tinkamai formuluoti išvadas.

1. Darbo tema: ***Vandens išpurškimo technologijos pritaikymas biokuro dūmų šilumos utilizavimo aspekte.***

Patvirtinta 2016 m. gegužės mėn. 3 d. dekanų įsakymu Nr V25-11-7

2. Darbo tikslas: ***Apžvelgti ir įvertinti esamą situaciją deginant biokurą ir išnagrinėti vandens išpurškimo technologijų taikymą. Išryškinti vandens išpurškimo poreikį šilumos iš šalinamų biokuro drėgnų dūmų utilizavimo technologijose, įsisavinti išpurkšto vandens lašelių šilumos ir masės mainų skaitinio modeliavimo metodiką, atlikti skaitinį tyrimą ir pagal apibendrintus lašelių šilumokaitos ir fazinių virsmų parametrų kitimo Furje kriterijumi išreikštame universalaus laiko mastelyje išvystyti inžinerinį skaičiavimo rezultatų išplėtimą neribotam lašelių dispersiškumui..***

3. Darbo struktūra:

***3.1 Lietuvos energetikos apžvalga deginant biokurą;***

***3.2 Šilumos utilizavimas iš šalinamų biokuro dūmų;***

***3.3 Išpurkšto vandens lašelių šilumokaitos ir masės mainų modeliavimas ir skaitinis tyrimas;***

***3.4 Apibendrintų tyrimų rezultatų išplėtimo inžinerinė metodika.***

4. Reikalavimai ir sąlygos: ***Apžvalgą atlikti remiantis norminiais šaltiniais, moksline literatūra, biokuro utilizavimo technologijas pagrįsti praktikoje taikomomis schemomis ir jų analize, o tyrimuose pritaikyti Šilumos ir Atomo katedroje turimo skysčio išpurškimo skaitinio modeliavimo patirtį ir metodiką, atlikti skaitinį vandens lašelių kondensacinio ir garavimo režimo tyrimą ir pritaikyti Furje kriterijaus mastelį rezultatų apibendrinimui.***

5. Užbaigto darbo pateikimo terminas: 2016 . m. gegužės mėn. 24 d.

Užduotis išduota 2016 m. vasario mėn. 01 d.

6. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo darbo dalis.

Išduota studentei Justinai Menkeliūnienei.

Užduotį gavau: Justina Menkeliūniene  
(studento vardas, pavardė)

.....  
(parašas)

2016.02.01  
(data)

Vadovas prof. habil. dr.Gintautas Miliauskas  
(pareigos, vardas, pavardė)

.....  
(parašas)

2016.02.01  
(data)

Menkeliūnienė Justina. VANDENS IŠPURŠKIMO TECHNOLOGIJOS PRITAIKYMAS BIOKURO DŪMŲ ŠILUMOS UTILIZAVIMO ASPEKTE. *Magistro* baigiamasis projektas / vadovas prof. habil. dr. Gintautas Miliauskas; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis: Energijos inžinerija

Reikšminiai žodžiai: *Biokuras, vandens lašeliai, kondensacija, ekonomazeris, išpurškimas.*

Kaunas, 2016. 90 p.

## SANTRAUKA

Lietuvos valstybė iškastinio kuro gausa pasigirti negali. Importuoti brangias gamtines dujas yra neracionalu, taigi natūralu, kad ieškoma sprendimų, kaip, išleidžiant kuo mažiau pinigų, vartotojus aprūpinti reikiama šiluma ir elektra.

Šiuo metu Lietuvoje vis labiau auga tendencija deginti biokurą. Šis kuras palyginti pigus, be to, duoda naudos vartotojams, nes sumažina šilumos kainą, valstybei, nes sukuria naujų darbo vietų, plius kurui išleisti pinigai lieka cirkuliuoti mokesčių pavidalu. Tačiau, biokuras yra palyginti drėgnas ir jo degimo procese tenka išgarinti drėgmę. Šiam procesui sunaudotą vandens fazinių virsmų energiją galime susigrąžinti tik naudodami kondensacinį ekonomazerį.

Taigi, utilizuojamą šilumą iš šalinamų biokuro dūmų galime susigrąžinti naudojant kontaktinį arba rekuperacinį šilumokaitį - kondensacinį ekonomazerį. Abiejais atvejais reikalingas vandens išpurškimas: kontaktiniame vandens garas iš dūmų iškondensuojamas tiesiog ant į juos įpurkšto vandens lašelių, o rekuperaciniame vanduo purškiamas virš vamzdelių retinės, kad pagerinti vamzdelių vidumi tekančios gravitacinės kondensato plėvelės hidrodinamiką. Akivaizdu, kad vandens išpurškimo technologijos biokuro deginime yra labai svarbus aspektas, todėl būtina jį gerai pažinti ir įsisavinti. Šiame darbe, pasitelkiant jau turimą išpurkšto skysčio lašelių modeliavimo patirtį ir ŠAE katedroje išvystytą lašelių fazinių virsmų ciklo skaitinio modeliavimo metodiką, skaitiškai sumodeliuotas biokuro dūmuose šylančių vandens lašelių kondensacinio ir pereinamojo garavimo režimai, lašelių šilumos ir masės mainų parametrų kitimas apibendrintas Furje kriterijaus mastelyje. Pagrįstas šių funkcijų universalumas lašelių dispersiškumo atžvilgiu. Išvystyta inžineriniam skaičiavimui tinkama laisvai parinkto vandens lašelio sumodeliuoto fazinių virsmų ciklo išplėtimo neribotam lašelių dispersiškumui metodika. Tyrimo rezultatai apibendrinti iliustruojančiais grafikai.

Menkeliūnienė, Justina. RESEARCH OF SPRAYED WATER IN BIOFUEL GAS HEAT AND MASS TRANSFER IN THE ASPECT OF PHASE TRANSFORMATION HEAT RECOVERY. *Master's* final project / supervisor assoc. prof. habil. dr. Gintautas Miliauskas. The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Studies area: Energy engineering

Key words: *Biofuel, droplet, condensation, economizer, spray.*

Kaunas, 2016. 90 p.

## SUMMARY

Lithuania does not have fossil fuel very much. It is too much expensive to import natural gas, so it is natural to seek solutions how to provide the necessary heat and electricity to consumers with the lower costs.

Currently, there is a growing tendency to burn biofuels in Lithuania. This fuel is relatively cheap and also gives benefits to both consumers and nation. Consumers gets reduced price of heat and nation gets new work places created, plus, money spent to fuel remains in form of taxes. However, biofuels are relatively wet, so, it is necessary to evaporate the humidity from it. The energy consumed to this process can be recovered only by using condensing economizer.

So, the heat from biofuel gas can be recovered by using contact or regenerative heat exchanger called condensing economizer. In both cases it is needed to use water spray: in contact type economizer water vapour from flue gases condensates on water droplets that are directly sprayed into gases, while in recuperative economizer water is sprayed above pipes pile in order to improve the gravity condensate film hydrodynamics that flows inside the pipe. It is obvious that the water spray technology is a very important aspect for biofuels burning process, so it must be well-executed. For this work, the already existing experience of sprayed liquid modelling and numerical research methodology of droplets phase transformation cycle, which was developed in Department of Thermal and Nuclear Energy, was invoked. In this work, at biofuel flue gases warming water droplets condensation and transit evaporation regimes was modelled, when droplets heat and mass transfer parameters variation was expressed in Fourier time scale. These functions universality in the aspect of droplets dispersity is based on. A freely chosen water droplet modelling in phase transformation cycle extension methodology to an unlimited droplets dispersity is developed to engineering calculation. The results are summarized by illustrative graphs.

## TURINYS

1	ĮVADAS.....	13
2	LITERATŪROS APŽVALGA.....	15
2.1	ESAMA SITUACIJA LIETUVOS ENERGETIKOJE.....	15
2.1.1	Sunaudoto kuro detalizavimas.....	15
2.1.2	Pagrindinės problemos Lietuvos centralizuoto šilumos tiekimo sistemoje.....	17
2.1.3	Branduolinės energetikos neapibrėžtumas.....	18
2.1.4	Alternatyviosios energijos panaudojimas.....	18
2.2	BIOKURO IR KIETOJO ATGAUTOJO KURO INTEGRAVIMAS Į LIETUVOS ENERGETIKĄ.....	20
2.2.1	Biokuro sąvoka ir sudėtis.....	21
2.2.2	Kietasis atgautasis kuras.....	24
2.2.3	Ekologija.....	25
2.3	PO DEGIMO SUSIDARIUSIOS MEDŽIAGOS.....	26
2.3.1	Biokuro degimas.....	27
2.3.2	Skysčio išpurškimas energetikoje.....	28
3	ŠILUMOS IŠ ŠALINAMŲ BIOKURO DŪMŲ UTILIZAVIMAS.....	29
3.1	KONTAKTINIŲ IR REKUPERACINIŲ KONDENSACINIŲ EKONOMAIZERIŲ PRINCIPINĖS SCHEMOS IR JŲ ANALIZĖ.....	29
3.2	PRAKTIKOJE NAUDOJAMOS TECHNOLOGINĖS SCHEMOS IR JŲ ANALIZĖ. ...	32
3.3	VANDENS IŠPURŠKIMO VIETA UTILIZUOJANT ŠILUMĄ IŠ ŠALINAMŲ DŪMŲ.....	33
3.3.1	Kondensaciniuose ekonomazeriuose vykstantys pernašos procesai, naudojant vandens išpurškimą.....	33
3.3.2	Lašelio fazinių virsmų ciklas.....	35
3.3.3	Lašo uždavinys.....	38
3.3.4	Energijos srautų lašelio paviršiuje balanso sąvoka.....	41
3.3.5	Šiluminių srautų lašelio paviršiuje matematinis aprašymas.....	41
3.4	LAŠELIŲ IŠPURŠKIMO Į DŪMŲ SRAUTĄ FUNDAMENTINIS TYRIMAS.....	42
3.4.1	Lašelių išpurškimo į dūmų srautą modeliavimo principas.....	42
3.4.2	Atskiros lašelio, išpurškiamo į dūmų srautą, modeliuoto atvejo apžvalga.....	44
3.4.3	Modeliuojamų rezultatų palyginimas, keičiant vieną kraštinę sąlygą.....	49

4	„LAŠO“ ŠILUMOS IR MASĖS MAINŲ PARAMETRAI IR JŲ GRUPAVIMAS.....	61
4.1	LAŠELIŲ DISPERSIŠKUMAS.....	61
4.2	LAŠELIŲ GRUPAVIMAS.....	63
4.3	FURJE MASTELIS.....	64
5	„LAŠO“ MODELIAVIMO REZULTATŲ APIBENDRINIMAS IR IŠPLĖTIMO PLATESNIAM LAŠELIŲ DISPERSIŠKUMUI INŽINERINĖ METODIKA.....	69
6	IŠVADOS.....	76
7	LITERATŪRA IR DUOMENŲ ŠALTINIAI.....	77
8	PRIEDAI.....	79



## PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS:

2.1 pav. 2013 metais Lietuvoje sunaudotas kuras [1].....	16
2.2 pav. Bendrųjų šalies kuro ir energijos sąnaudų struktūra 2014 m., procentais [5].....	16
2.3 pav. Atsinaujinančių energijos išteklių sąnaudų struktūra 2014 m. [5].....	17
2.4 pav. AEI dalis pagal sektorius 2012- 2014 m. [7] .....	19
2.5 pav. Kietasis atgautasis kuras [12] .....	24
2.6 pav. Kieto kuro degimas [14] .....	27
2.7 pav. Degimo zonos ant ardyno [14].....	27
3.1 pav. Kontaktinio kondensacinio ekonomizerio principinė schema. ....	30
3.2 pav. Rekuperacinio tipo kondensacinio ekonomizerio iškarpa iš kondensato valymo schemas. .	31
3.3 pav. Lašelio fazinių virsmų ciklo seka. ....	37
3.3 pav. Lašelio fazinių virsmų ciklo seka. ....	37
3.4 pav. Lašo schema, esant kondensaciniam režimui. ....	38
3.5 pav. Lašo schema, esant nestacionariojo garavimo režimui.....	39
3.6 pav. Lašo schema, esant pusiausvirojo garavimo režimui.....	40
3.7 pav. Lašelio temperatūros kitimas, kai $T_0=278K$ , $T_d=470K$ , $p_{g,d}=0,25$ , $Re=15$ , $R=75\mu m$ . ....	45
3.8 pav. Lašelio spindulio kitimas, kai $T_0=278K$ , $T_d=470K$ , $p_{g,d}=0,25$ , $Re=15$ , $R=75\mu m$ . ....	46
3.9 pav. Masės srauto tankio kitimas, kai $T_0=278K$ , $T_d=470K$ , $p_{g,d}=0,25$ , $Re=15$ , $R=75\mu m$ . ....	46
3.10 pav. Re ir Nu kriterijų kitimas, kai $T_0=278K$ , $T_d=470K$ , $p_{g,d}=0,25$ , $Re=15$ , $R=75\mu m$ . ....	47
3.11 pav. Lašelio slydimo greičio kitimas, kai $T_0=278K$ , $T_d=470K$ , $p_{g,d}=0,25$ , $Re=15$ , $R=75\mu m$ . ....	47
3.12 pav. Šilumos srauto kitimas, kai $T_0=278K$ , $T_d=470K$ , $p_{g,d}=0,25$ , $Re=15$ , $R=75\mu m$ . ....	48
3.13 pav. Lašelio masės kitimas, kai $T_0=278K$ , $T_d=470K$ , $p_{g,d}=0,25$ , $Re=15$ , $R=75\mu m$ . ....	48
3.14 pav. Rezultatų paklaida, kai $T_0=278K$ , $T_d=470K$ , $p_{g,d}=0,25$ , $Re=15$ , $R=75\mu m$ . ....	49
3.15 pav. Šilumos srautų palyginimas keičiant lašelio spindulį, a- fazinių virsmų, b- nuvedamo į lašelio išorę, c- nuvedamo į lašelio vidų, kai $T_0=278K$ , $T_d=470K$ , $p_{g,d}=0,25$ , $Re=15$ , $R=75$ , $100$ , $125\mu m$ . ....	50
3.16 pav. Lašelio temperatūros kitimo palyginimas keičiant lašelio spindulį, a-lašelio centro temperatūros, b- lašelio masės temperatūros, c- lašelio paviršiaus temperatūros, kai $T_0=278K$ , $T_d=470K$ , $p_{g,d}=0,25$ , $Re=15$ , $R=75$ , $100$ , $125\mu m$ . ....	52
3.17 pav. Masės srauto tankio kitimo palyginimas keičiant lašelio spindulį, kai $T_0=278K$ , $T_d=470K$ , $p_{g,d}=0,25$ , $Re=15$ , $R=75$ , $100$ , $125\mu m$ . ....	53
3.18 pav. Garo srauto tankio kitimo palyginimas keičiant lašelio spindulį, kai $T_0=278K$ , $T_d=470K$ , $p_{g,d}=0,25$ , $Re=15$ , $R=75$ , $100$ , $125\mu m$ . ....	53
3.19 pav. Šilumos srautų palyginimas keičiant Re, a- fazinių virsmų, b- nuvedamo į lašelio vidų, c- nuvedamo į lašelio išorę, kai $T_0=278K$ , $T_d=470K$ , $p_{g,d}=0,25$ , $Re=5$ , $15$ , $45$ , $R=75\mu m$ . ....	55

3.20 pav. Lašelio paviršiaus temperatūros palyginimas keičiant Re, kai $T_0=278K$ , $T_d=470K$ , $p_{g,d}=0,25$ , $Re=5, 15, 45$ , $R=75\mu m$ .	56
3.21 pav. Lašelio masės srauto tankio palyginimas keičiant Re, kai $T_0=278K$ , $T_d=470K$ , $p_{g,d}=0,25$ , $Re=5, 15, 45$ , $R=75\mu m$ .	56
3.22 pav. Lašelio garo srauto tankio palyginimas keičiant Re, kai $T_0=278K$ , $T_d=470K$ , $p_{g,d}=0,25$ , $Re=5, 15, 45$ , $R=75\mu m$ .	57
3.23 pav. Lašelio spindulio palyginimas keičiant Re, kai $T_0=278K$ , $T_d=470K$ , $p_{g,d}=0,25$ , $Re=5, 15, 45$ , $R=75\mu m$ .	57
3.24 pav. Šilumos srautų palyginimas keičiant dūmų temperatūrą, a- fazinių virsmų, b- nuvedamo į lašelio vidų, c- nuvedamo į lašelio išorę, kai $T_0=278K$ , $T_d=370, 570, 400K$ , $p_{g,d}=0,25$ , $Re=15$ , $R=75\mu m$ .	59
3.25 pav. Lašelio spindulio palyginimas keičiant dūmų temperatūrą, kai $T_0=278K$ , $T_d=370, 570, 400K$ , $p_{g,d}=0,25$ , $Re=15$ , $R=75\mu m$ .	60
3.26 pav. Lašelio centro temperatūros palyginimas keičiant dūmų temperatūrą, kai $T_0=278K$ , $T_d=370, 570, 400K$ , $p_{g,d}=0,25$ , $Re=15$ , $R=75\mu m$ .	60
3.27 pav. Lašelio garo srauto tankio palyginimas keičiant dūmų temperatūrą, kai $T_0=278K$ , $T_d=370, 570, 400K$ , $p_{g,d}=0,25$ , $Re=15$ , $R=75\mu m$ .	61
4.1 pav. Purkštuko charakteristika.	63
4.2 pav. Lašelio paviršiaus temperatūros kitimas Furje mastelyje, kai $T_0=278K$ , $T_d=470K$ , $p_{g,d}=0,25$ , $Re=15$ , $R=75, 100, 125\mu m$ .	65
4.3 pav. Lašelio garo srauto tankio kitimas Furje mastelyje, kai $T_0=278K$ , $T_d=470K$ , $p_{g,d}=0,25$ , $Re=15$ , $R=75, 100, 125\mu m$ .	65
4.4 pav. Lašelio garo srauto tankio kitimas Furje mastelyje (perskaičiavus) , kai $T_0=278K$ , $T_d=470K$ , $p_{g,d}=0,25$ , $Re=15$ , $R=75, 100, 125\mu m$ .	66
4.5 pav. Lašelio masės kitimas Furje mastelyje, kai $T_0=278K$ , $T_d=470K$ , $p_{g,d}=0,25$ , $Re=15$ , $R=75, 100, 125\mu m$ .	67
4.6 pav. Lašelio masės kitimas Furje mastelyje (perskaičiuotas), kai $T_0=278K$ , $T_d=470K$ , $p_{g,d}=0,25$ , $Re=15$ , $R=75, 100, 125\mu m$ .	67
4.7 pav. Lašelio masės srauto tankio kitimas Furje mastelyje, kai $T_0=278K$ , $T_d=470K$ , $p_{g,d}=0,25$ , $Re=15$ , $R=75, 100, 125\mu m$ .	68
4.8 pav. Lašelio masės srauto tankio kitimas Furje mastelyje (perskaičiuotas), kai $T_0=278K$ , $T_d=470K$ , $p_{g,d}=0,25$ , $Re=15$ , $R=75, 100, 125\mu m$ .	68
5.1 pav. Lašelio masės srauto tankio nejautrumas lašelių dispersiškumui, kai $T_0=278K$ , $T_d=470K$ , $p_{g,d}=0,25$ , $Re=15$ , $R=75\mu m$ .	69
5.2 pav. $\overline{R_{75}}(Fo)$ funkcijos grafikas, kai $T_0=278K$ , $T_d=470K$ , $p_{g,d}=0,25$ , $Re=15$ , $R=75\mu m$ .	70

5.3 pav. Lašelio paviršiaus temperatūros nejautrumas lašelių dispersiškumui, kai $T_0=278\text{K}$ , $T_d=470\text{K}$ , $p_{g.d.}=0,25$ , $Re=15$ , $R=75\mu\text{m}$ . .....	70
5.4 pav. Lašelio šilumos srauto, nuvedamo į lašelio vidų, nejautrumas lašelių dispersiškumui, kai $T_0=278\text{K}$ , $T_d=470\text{K}$ , $p_{g.d.}=0,25$ , $Re=15$ , $R=75\mu\text{m}$ . .....	71
5.5 pav. Išplėstų modeliavimo rezultatų grafinis atvaizdavimas. Garo srauto tankis, kai $R_0=50, 75, 150, 200$ , $T_0=278\text{K}$ , $T_d=470\text{K}$ , $p_{g.d.}=0,25$ , $Re=15$ . .....	75

## LENTELIŲ SĄRAŠAS:

2.1 lentelė	Plačiausiai paplitusių medžių rūšių žemutinis šilumingumas, $q_{\text{net,d}}$ , MJ/kg [11]. .....	24
4.1 lentelė	Sugrupuotų lašelių kraštinės sąlygos, kai $Re=15$ . .....	63
5.1 lentelė	Modeliavimo rezultatai $\bar{P}(Fo)$ , kai $R=75\mu\text{m}$ . .....	72
5.2 lentelė	Pradinės parametrų $\frac{a_0}{R_0^2}$ , $m_{g,0}$ , $T_{m,0}$ , $g_0$ ir $M_0$ vertės, kai $R_0=50, 75, 150$ ir $200\mu\text{m}$ .73	73
5.3 lentelė	Parametrų $R$ , $m_g$ , $T_m$ , $g$ , $M$ reikšmės kai $R_0=50, 75, 150$ ir $200\mu\text{m}$ . .....	73

## PRIEDŲ SĄRAŠAS:

1. MODELIAVIMO, ESANT KRAŠTINĖMS SĄLYGOMS $T_0=273\text{K}$ ; $T_d=470\text{K}$ ; $pg,d= 0,25$ ; $Re=15$ ; $R=75\mu\text{m}$ REZULTATAI. ....	79
2. Dūmų kondensacinio ekonomizerio valymo schema. ....	82
3. AB „Kauno energija“ Inkaro katilinės kondensacinio ekonomizerio kondensato valymo funkcinė schema. ....	83
4. AB „Kauno Energija“ Inkaro katilinės šiluminė schema. ....	84
5. AB „Kauno energija“ Petrašiūnų elektrinės principinė biokuro vandens šildymo katilų ir jų sistemos aprišimo schema. ....	85
6. Kondensacinio ekonomizerio srautų principinė schema Ignalinos ŠT. ....	86
7. AB „Kauno energija“ Šilko katilinės vandens šildymo katilinės šiluminė schema. ....	87
8. „Vandens lašelių šilumos ir masės mainų biokuro dūmuose modeliavimas“. Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Pramonės inžinerija 2016“ parengto straipsnio kopija. ....	88

## 1 ĮVADAS.

Žmogus ir gamtiniai ištekliai yra vienareikšmiškai susiję ir vienas nuo kito priklauso. Gamtos ištekliai yra žmonijos egzistavimo ir vystymosi priežastis. Tačiau, žmogus, tobulindamas mokslą ir technologijas, gamtos išteklius kardinaliai keičia. Gamtos ištekliai negrįžtamai kinta, kaip antai naftos skaičiuojama, kad užteks pusšimčiui metų. Mažėja ir kitas iškastinis kuras- gamtinės dujos, akmens anglis, skalūnai ir t.t. Žmogus įprato naudotis iškastiniu kuru, jį perprato. Tačiau kuo jį pakeisti surasti ne taip jau paprasta ir lengva. Iškastinis kuras ir jo naudojimas žmogui sudarė komfortiškas sąlygas keliauti, apšildyti namus, apsišviesti, galų gale net kuo apsirengti. Gamtinių išteklių eksportas yra svarbus pajamų šaltinis. Šalys, kurios jų turi, yra ekonomiškai nepriklausomos ir turtingos. Tačiau šalys, jų neturinčios, priverstos šiuos išteklius importuoti ir eikvoti didelius finansinius resursus.

Gamtinių išteklių išgavimas reikalauja didelių energijos sąnaudų. O naujų išteklių paieškai ir išgavimui išleidžiami milžiniški pinigai. Neretai gamtinių išteklių gavyba negrįžtamai pakeičia kraštovaizdį. Be to, perdirbus pradinius išteklius, atliekomis yra teršiama aplinka. Be to, generuojant energiją, nors ir tradiciškai yra orientuojamasi į iškastinį kurą, dažnai jį deginti yra neracionalu.

Taip pat, degindami neatsinaujinantį iškastinį kurą, su dūmais į aplinką išleidžiame šiltnamio efektą sukeliančias dujas. Šio proceso metu Žemė šyla dėl atmosferos sugeriamo infraraudonojo spinduliavimo. Buvo manoma, kad sumažinti iškastinio kuro naudojimą padės branduolinė energetika. Niekam nepaslaptis, kad naudojant šią energetiką, energija pagaminama sąlyginai pigiai. Tačiau, po Černobylio AE avarijos, Fukušimos AE avarijos, branduolinės energetikos patrauklumas išblėso ir blėsta toliau. Statant naują atominę elektrinę nustatomi griežti reikalavimai, o statybos kaštai joms vykstant dar labiau išauga. Taigi naudoti branduolinę energetiką tampa ekonomiškai brangu.

Kaip ir visame pasaulyje, taip ir Lietuvoje, generuojant energiją, iškyla tokios pačios problemos. Deja, mūsų valstybė negali pasigirti iškastinių išteklių gausa, todėl yra priversta jį importuoti. Sustabdžius Ignalinos Atominę elektrinę, yra priversta didžiąją dalį reikiamos elektros energijos importuoti iš kaimyninių šalių.

Taigi, nenuostabu, kad šiuo metu mūsų valstybėje auga tendencija deginti biokurą ir naudoti kitus atsinaujinančius energijos šaltinius [1]. Už biokurą pinigus sumokame ne kaimynams, o savo tautiečiams, kurie vėliau mokesčių pavidalu neša pajamas į biudžetą bei gerina prekybos balansą.

Biokuro ištekliai dideli, jį deginti yra racionalu. Išmokę tinkamai jį deginti ir atgauti iš šalinamų dūmų šilumą, biokurą galime efektyviai panaudoti.

Tačiau, biokuras yra labai drėgnas. Bendrą kuro masę gali sudaryti net 50% vandens! O šį vandenį biokuro degimo procese reikia išgarinti. Išgarinus vandenį ir iš dūmų nesusigražinus tam įdėtos šiluminės energijos, šio kuro naudojimas yra ne toks jau ir efektyvus, kadangi išgarintas vanduo garo pavidale kartu su dūmais ir juose įdėta vandens fazinių virsmų šiluma yra pašalinamas per kaminą ir teršia gamtą. Iš drėgnų dūmų fazinių virsmų šilumą galima atgauti tik garo kondensacijos procese. Naudojant kondensacinį ekonomaizerį atgauname ne tik dalį vėsiamų dūmų fizinės šilumos bet ir dalį fazinių virsmų (kondensacijos) šilumos, taip pat mažinama aplinkos tarša. Būtent fazinių virsmų šilumos iš drėgnų biokuro dūmų atgavimo procesas yra analizuojamas šiame darbe.

## 2 LITERATŪROS APŽVALGA.

### 2.1 ESAMA SITUACIJA LIETUVOS ENERGETIKOJE.

#### 2.1.1 Sunaudoto kuro detalizavimas.

Lietuvoje ypatingai griežtai yra reguliuojamas CŠT [2]. Jau ir taip didelis norminių aktų kiekis yra dar papildomas naujomis pataisomis ar pakeitimais, neretai žadama pradėti reformas. Taigi, nenuostabu, kad Lietuvos energetika nėra itin stabili ir neretai blaškosi nuo vieno reguliavimo būdo prie kito. Lietuvos centralizuoto šilumos tiekimo sektoriuje kyla nauji iššūkiai, susiję su šilumos pardavimo mažėjimu dėl pastatų apšiltinimo, senstančiu vamzdynu, biokuro kainos didėjimu ir t.t. Taigi, nesunku nuspėti, kad šilumos kainos augs. Lieka daug klausimų, kaip sumažinti sąnaudas. Tačiau, net ir nesant Lietuvos energetikai itin stabiliai, yra šalių, kurios iš mūsų mokosi, esama visuotinai pripažintų Lietuvos centralizuoto šilumos tiekimo sektoriaus laimėjimų- įvadinės apskaitos įvedimas, boilerinių pakeitimas į individualius šilumos punktus, greita biokuro katilų su kondensaciniais ekonomizeriais plėtra ir t.t. Taigi, naudodami jau pripažintus laimėjimus su naujausiomis technologijomis galime sumažinti šilumos sąnaudas ir taip visuomenę palikti patenkintą.

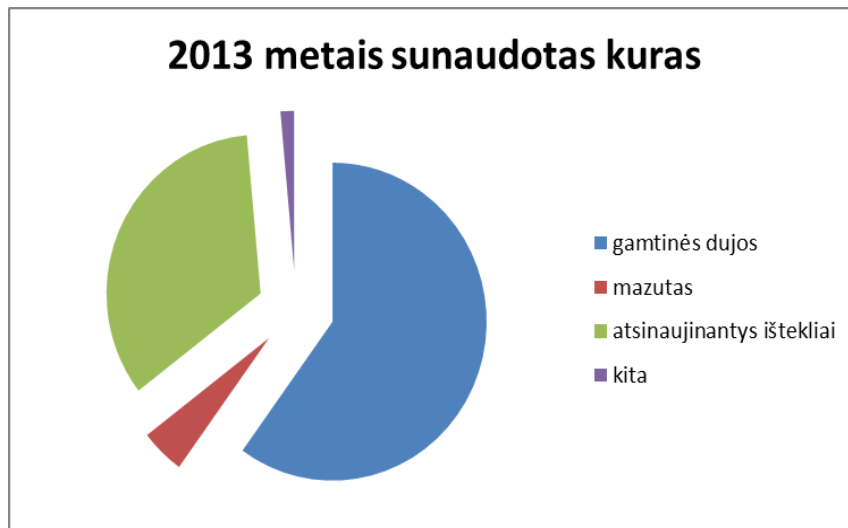
Lietuvos svarbus tikslas - energetinė nepriklausomybė [3]. Siekiant energetinės nepriklausomybės, Lietuvos Respublikos energetikos ministerija išsikėlė tikslus, iš kurių vienas- 2020m. galutiniame energijos vartojimo balanse atsinaujinančių išteklių dalis siektų 23 procentus. Taigi, Lietuva didindama atsinaujinančių išteklių naudojimą ne tik mažintų aplinkos užterštumą, bet ir didintų energetinę nepriklausomybę.

Lietuvos Respublikos energetikos ministerijos strateginiame 2014- 2016 veiklos plane pats pirmasis veiklos prioritetasis- energijos vartojimo efektyvumo didinimas. Tai ne tik pastatų apšiltinimas, bet ir efektyvesnė šilumos gamyba, naudojant efektyviausias ir naujausias technologijas. 2016- 2018 metų Ministerijos strateginiame veiklos plane šis prioritetasis išlieka [4]. Taip pat vienas iš prioritetų yra darnus atsinaujinančių energijos išteklių naudojimas ir jų plėtra.

Pastaraisiais metais Lietuvoje ženkliai padidėjo vietinio biokuro naudojimas ir sumažėjo brangaus importuojamo kuro (gamtinių dujų) panaudojimas. Aišku, iškastinio kuro naudojimas lieka reikšmingoje pozicijoje ir užima didžiąją „torto“ dalį, tačiau didėja atsinaujinančių išteklių naudojimas, kurių didžiąją dalį sudaro vietinis biokuras. Biokuro naudojimas yra naudingas ne tik todėl, kad tai pigus kuras, bet ir naudingas valstybei ir jos gyventojams, nes sukuria darbo vietas žmonėms, kurie tą biokurą paruošia, veža, kuria biokuro deginimo įrenginius ir galų gale prižiūri,

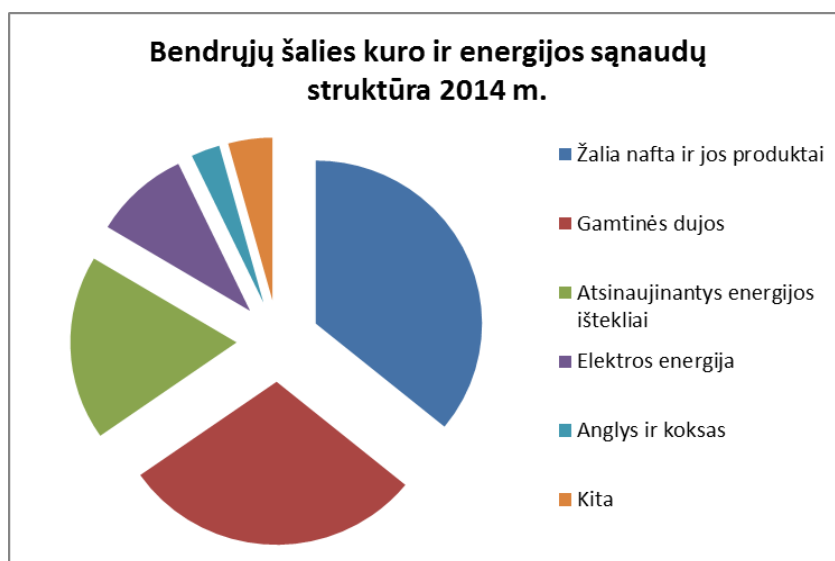
kaip jis deginamas. Tokiu atveju kurui išleisti pinigai lieka valstybėje, o ne yra atiduodami kaimyninėms šalims.

Lietuvos Respublikos nutarime dėl nacionalinės šilumos ūkio plėtros 2015- 2021 metų programos patvirtinimo 2013 metais sunaudotas kuras detalizuojamas taip [1]:



**2.1 pav. 2013 metais Lietuvoje sunaudotas kuras [1].**

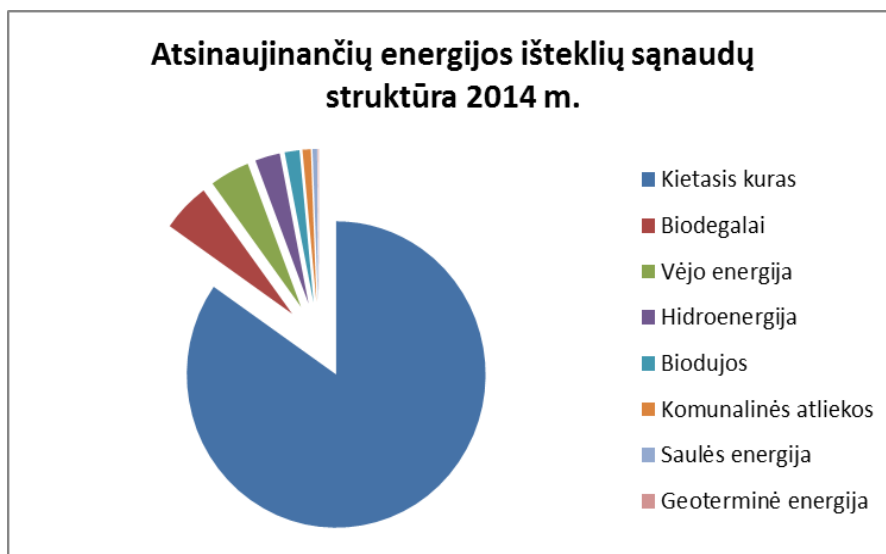
Iš viso valstybėje yra įrengta apie 260 mažų CŠT sistemų, jų duomenys nedetalizuojami, o suvartoto kuro kiekis siekia apie 40 tūkst. tne. Iš viso CŠT gamybai sunaudota apie 900 tūkst. tne kuro, tuo tarpu atsinaujinantys ištekliai sudarė 34 %. Taigi, galime daryti išvadą, kad daugiausia buvo deginamas brangus iškastinis neatsinaujinantis kuras, už kurį ne tik vartotojai turi brangiai sumokėti, bet ir kvėpuoti po degimo susidariusiomis medžiagomis.



**2.2 pav. Bendrujų šalies kuro ir energijos sąnaudų struktūra 2014 m., procentais [5]**



2014 metais, palyginti su 2013, Lietuvoje atsinaujinančių energijos išteklių gamyba padidėjo 5,6 proc. [5]. Didžiausią potencialą atsinaujinančioje energetikoje turi kietasis biokuras. Didžiausias jo kiekis 2014 metais buvo sunaudotas centralizuotai šilumai gaminti (41,3 %)[5], namų ūkiuose ir elektrai gaminti(46,9 %)[5]. Pastaraisiais metais ženkliai augo biokuro panaudojimas, lyginant tarp CŠT ir elektrai gaminti naudojamų kuro rūšių. Lyginant 2014 ir 2013 metų kietojo biokuro naudojimo didėjimą, jo dalis elektrinių ir katilinių sąnaudose padidėjo beveik 10%, tuo tarpu beveik 8,5% [5] sumažėjo gamtinių dujų dalis. Taip pat, 2014 m. mažėjo anglies ir mazuto sunaudojimas, nes mažėjo elektros ir šilumos gamybos kiekiai.



**2.3 pav. Atsinaujinančių energijos išteklių sąnaudų struktūra 2014 m. [5]**

Kaip matome iš 2.2 ir 2.3 paveikslų, kietojo biokuro panaudojimas Lietuvoje vis didėja ir yra tendencija ir toliau augti ir toliau.

### **2.1.2 Pagrindinės problemos Lietuvos centralizuoto šilumos tiekimo sistemoje.**

Lietuvos CŠT sistema yra anaiptol netobula. Pagrindinės problemos, esančios sistemoje, susijusios su didelėmis šilumos kainomis, per mažu atsinaujinančių energijos šaltinių naudojimu ir jų įterpimu į šilumos tinklus juos modernizuojant. Atrodytų nekalta problema, tačiau ji yra- valstybės teikiamos kompensacijos už šildymą, kuriomis piktavališkai naudojasi vartotojai. Lietuvoje šildymo santykinės išlaidos yra palyginti didelės, netgi vienos didžiausių ES. To priežastys: klimato sąlygos gana atšiaurios, prastos kokybės pastatai (energetiniu požiūriu), pagrindinis kuras- brangios gamtinės dujos, be to, menka gyventojų ekonominė galia. Teikiamos kompensacijos už šildymą neskatina šilumos vartoti efektyviai, vartotojai nėra suinteresuoti energiją vartoti efektyviai, nes ši sistema tėra susieta su pajamomis. Problemą galima spręsti įvairiais būdais, o vienas iš jų yra centralizuotame šilumos tiekimo sektoriuje plačiau naudoti atsinaujinančius energijos išteklius. Šiuo

būdu padidintume gyventojų užimtumą, ypač tuose regionuose, kur didelis nedarbo lygis, šie gyventojai taip pat pagerintų prekybos balansą, mokesčių pavidalu neštų pajamas į biudžetą.

### **2.1.3 Branduolinės energetikos neapibrėžtumas.**

2009 metais gruodžio 31 d. Baigė veikti IAE. Lietuvos Respublikos energetikos ministerijoje šiuo metu netgi yra atskiras skyrius- Ignalinos atominės elektrinės eksploatavimo nutraukimo skyrius. Šio skyriaus darbuotojai rūpinasi, kad IAE būtų tinkamai demontuojama.

Uždarę Ignalinos atominę elektrinę, elektrą perkame iš kaimynų, deja, pamirštame, kad elektros energija vartojama masiškai, o mūsų kaimynai, deja, elektros pertekliumi negali pasigirti.[23] Buvo pasigirsta kalbų Lietuvai statyti kitą, naują atominę elektrinę, tačiau kalbų nebesigirdi. Taigi, branduolinė energetika taip ir lieka neapibrėžta, bet greičiausiai mūsų valstybėlei pasistatyti tokį energetinį objektą būtų per brangu. Tikslių duomenų vis dar nėra, tačiau keleta šaltinių teigia, kad Visagino atominės elektrinės statybų išlaidos siektų apie 30 mlrd. litų [6] (8,7mlrd. €). Kitų šalių, kurios statė atominę elektrinę, pavyzdžiai rodo, kad numatytos išlaidos pradėjus statyti atominę elektrinę, padidėja dar iki 50 proc. [6]. Taip pat, atominių elektrinių, statybos brangsta nuolat.

### **2.1.4 Alternatyviosios energijos panaudojimas.**

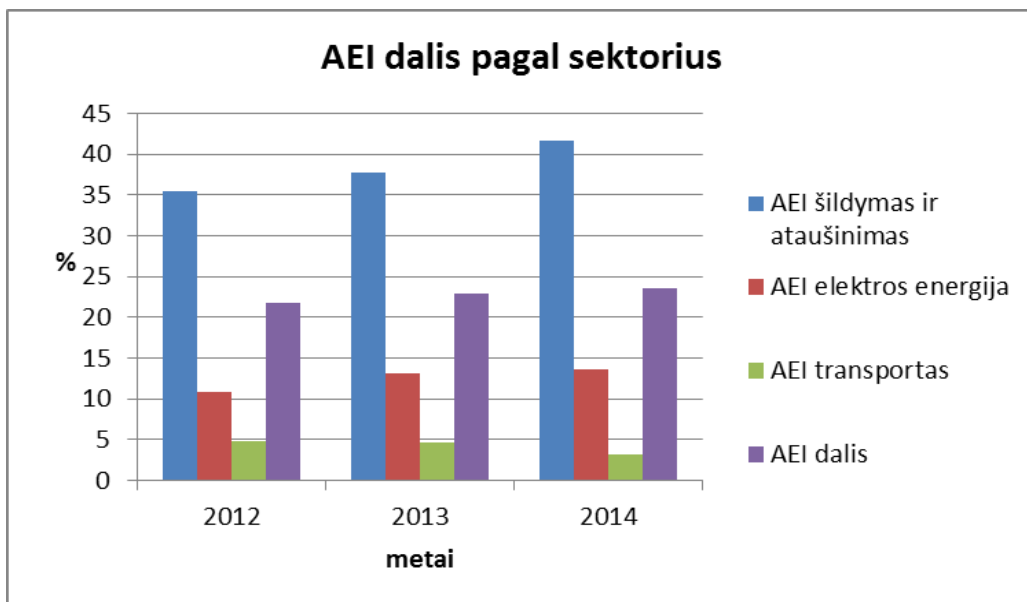
Taip, kaip atominių elektrinių statybos nuolat brangsta- atsinaujinančios energetikos kaina žymiai mažėja. Pavyzdžiu galime paimti Saulės energijos sistemas. Prieš dešimtmetį, vienos kilovatvalandės, pagamintos naudojant Saulės energiją, kaina buvo maždaug dvigubai didesnė nei šiandien. Manoma, kad ši kaina mažės ir toliau. Netgi, yra paskaičiuota, kad Lietuvai nusprendus statyti Saulės energijos jėgainę, statybos kaštai būtų iki 15 mlrd. litų [6] (4,3mlrd. €), o tai yra beveik dvigubai mažiau nei statybos kaštai statant atominę elektrinę. Labai svarbus momentas yra tas, kad tokios energetikos efektyvumas tik didėtų. Elektros kaina po atsipirkimo laikotarpio tik mažėtų, kadangi pinigai, išleisti statyboms, jau būtų gražinti, o už kurą- Saulę ar vėją mokėti nereikia. Preliminariai yra apskaičiuota, kad investicijos, skirtos vėjo jėgainėms atsipirkimų iki 15 metų [6], esant dabartinėms sąlygoms, o biomasės investicijos atsipirkimų dar greičiau. Po šio laikotarpio, elektros energijos kaina taptų itin maža. Vienas iš alternatyviosios energijos privalumų- decentralizacija. Naudojant atsinaujinančią energetiką, energija gali būti gaminama daugelyje vietų, o tai labai sumažintų perdavimo ir skirstymo kaštus. Šių jėgainių statybos taptų darbo vieta aukštą kvalifikaciją turintiems specialistams, kadangi šiandien jie Lietuvoje neturi kur savęs realizuoti ir šalį palieka.

Viskas atrodo labai gražiai, tačiau turime pripažinti, kad alternatyvioji energetika negali pakeisti tradicinių elektrinių gaminamos energijos, nes negalime garantuoti pasakyti, kad visus metus švies

Saulė ar pūs vėjas. Taip pat, viena kilovatvalandė elektros energijos atominėje elektrinėje pagaminama kur kas greičiau nei Saulės ar vėjo jėgainėje. Ekonomiškai geriausia sistema būtų tokia, kur nedominuotų nė vienas elektrą generuojantis šaltinis. Tokia sistema leistų vartotojų pinigus cirkuliuoti valstybėje, o ne visus atiduoti kaimyninėms šalims, suteiktų darbo vietų Lietuvos inžinieriams bei skatintų tobulinti žinias ir siekti efektyvesnio atsinaujinančių šaltinių panaudojimo.

Lietuvos planuose yra numatyta, kad iki 2020 metų 23 proc. visos suvartojamos energijos sudarytų atsinaujinantieji išteklių [1]. Ši energija apimtų šilumos ir elektros ūkius, taigi, procentas atrodytų gana nedidelis, tačiau tai- didelis energijos kiekis. Apklausa, atliekama Lietuvos gyventojams rodo, kad jiems alternatyvioji energetika yra priimtina, o jos plėtojimas valstybei būtų naudingas. Nenuostabu, nes iškastinio kuro energetika visada kainuoja daugiau, ypač, kai neturime savo kuro, o jį reikia importuoti. Taip pat svarbus punktas yra ekologija, o alternatyvioji energija užtikrina švarų ir ekologišką elektros ar šilumos gamybos būdą. Aišku, reiktų įskaičiuoti energiją ir taršą, kuri yra sukeliama gaminant, montuojant ar prižiūrint alternatyviosios energijos generavimo įrenginius, bet tai sudaro labai mažą dalį lyginant su tradicinės energetikos generavimo įrenginių sukuriama tarša.

2014 metais Lietuva jau pasiekė ir viršijo Europos Sąjungos nustatytą įsipareigojimą 2020 metais galutiniame energijos suvartojime pasiekti 23% atsinaujinančios energijos išteklių naudojimo rodiklį [7].



**2.4 pav. AEI dalis pagal sektorius 2012- 2014 m. [7]**

Atsinaujinančių išteklių energetikos įstatymas leidžia didinti vietinės energijos gamybos pajėgumus bei toliau didinti AEI plėtrą. Šiame įstatyme taip pat numatyti nacionaliniai tikslai atskiriems sektoriams. Elektros energijos dalį, pagamintą iš AEI padidinti iki 20%, CŠT sektoriuje

pagaminamą energijos kiekį iš AEI padidinti iki 60%, namų ūkiuose šildymui sunaudojamos šilumos energijos kiekį, pagaminamą iš AEI padidinti iki 80%, transporto sektoriuje suvartojamą energijos kiekį iš AEI padidinti iki 10%. Kaip matome 2.4 paveiksle, rezultatai kiekvienais metais gerėja, tačiau sunkiausiai įgyvendinamu tikslu išlieka transporto sektoriuje AEI padidinti iki 10% [7].

## **2.2 BIOKURO IR KIETOJO ATGAUTOJO KURO INTEGRAVIMAS Į LIETUVOS ENERGETIKĄ.**

Numatoma, kad CŠT gamybos sektoriuje, pagrindinė kuro rūšis turėtų būti biokuras. Iš biokuro pagaminta šiluma turėtų sudaryti apie 60% 2017 metais, o 70% 2021 metais [8]. Gamtinės dujos liktų nebe pagrindinė, o antra pagal svarbą kuro rūšis CŠT sistemose. Siekiama šios kuro rūšies naudojimą kasmet mažinti, kadangi vartotojai už dujas sumoka milžiniškus pinigus. Šilumos, pagamintos, iš komunalinių atliekų (kietojo atgautojo kuro) dalis 2021 metais turėtų siekti 7%. Šiluma, pagaminta iš durpių turėtų siekti 5-11%, o biodujų- 4% [8]. Tiekiant pirmenybę atitinkamam kurui, pirmiausia reikia ir net būtina stebėti AEI potencialo tvarumą ir užtikrinti vartotojams, kad šilumos kaina yra pagrįsta mažiausiomis sąnaudomis.

Šiuo metu yra įsigaliojusi tendencija CŠT sistemose diegti tik biokurą naudojančius vandens šildymo katilus. Pirmenybę reikėtų teikti kogeneracinėms elektrinėms, o kuru galima pasirinkti komunalines atliekas, biokurą, biodujas. Kietojo atgautojo kuro ir biokuro kogeneraciniai įrenginiai turėtų visur, kur tik techniškai įmanoma, padengti kuo didesnius poreikius, išstumiant biokuro VŠK. Tik pikinėms apkrovoms bei rezerviniams poreikiams tenkinti pasirinkti turėtume vandens šildymo katilus, naudojančius iškastinį kurą (gamtinės dujas, krosnių kurą ir pan.).

Yra numatyta, kad tiekiant pirmenybę sąnaudų prasme patraukliems, tvariems AEI, šilumos kainos gali sumažėti penktadaliu lyginant su 2013 metais, Lietuvos prekybos balanso deficitas sumažėtų kone 200 mln.€/metus, bei būtų sukurta per 500 naujų darbo vietų [8]. Taip pat būtų įgyvendinti Nacionalinėje energetinės nepriklausomybės strategijoje CŠT sektoriui keliami tikslai šilumai mažinti.

Gamtinių dujų kaina nuo 2005 iki 2013 metų padidėjo apie 4 kartus [8]. Visas sovietinis palikimas yra grįstas gamtinės dujas deginančiais įrenginiais, deja, jį keisti nebuvo poreikio, o dujų kainai pakilus į tokias aukštumas, visą energetinį ūkį pakeisti greitai ne taip jau paprasta. Taigi, per šį laiką atitinkamai pakito ir šilumos kainos. 2014 metų pabaigoje 27 šilumą tiekiančios bendrovės 70-100% šilumos gamino iš AEI (biokuro), 14 bendrovių kūreno 40- 60% biokuro, 8 bendrovės kūreno iki 30% biokuro. Taip pat buvo bendrovių, kurios biokuro nenaudojo arba naudojo labai mažai, o tai

lėmė labai skirtingas šilumos kainas įvairiuose miestuose. Šilumos kainos miestuose, kurie naudoja biokurą lyginant šilumos kainas miestuose, kurie nenaudojo biokuro, o degino dujas, buvo apie 20% mažesnės [8].

Norint, kad centralizuotai tiekiamą šilumą būtų pagrįsta mažiausiomis sąnaudomis, būtina išlaikyti ar net padidinti dabartinį kuro balansą. Didelė dalis biokurą naudojančių šilumos generavimo įrenginių, yra įrengti iki 2013 metų ir yra eksploatuojami 10 ar daugiau metų. Deja, biokurą ir kietąjį atgautąjį kurą naudojančios įrenginiai nėra ilgaamžiai ir tarnauja iki 15- 20 metų. Taigi, dalis, jau naudojamų įrenginių iki 2021 metų turės būti pakeisti naujais. CŠT sistemoje iki 2021 metų numatoma įrengti 140 MW naujų ar modernizuoti esamų AEI naudojančių šilumą generuojančių įrenginių.

### **2.2.1 Biokuro sąvoka ir sudėtis.**

Biokuras – iš biomasės pagaminti degūs dujiniai, skystieji ir kietieji produktai, naudojami energijai gaminti [9]. Biokuru galima vadinti bet kokią organinę medžiagą, kurią ekonomiškai ir techniškai apsimoka deginti. Biokuras yra vienas iš atsinaujinančių energijos išteklių. Prie biokuro galima priskirti medieną, komunalines atliekas, žemės ūkio atliekas, popieriaus atliekas ir t. t. Kietojo ir skystojo kuro sudėtis paprastai išreiškiama jų sudarančių elementų masės procentais.

Pagal žaliavos kilmę medienos kuras gali būti skirstomas į kurą iš miškų, iš greitai augančių (energetinių) miškų ir pakartotinai naudojama mediena [11].

Ekologiškomis galime laikyti kuro rūšis, gautas iš miškų ir energetinių miškų, tačiau pakartotinai naudojamos medienos laikyti ekologiška negalime. Pakartotinai naudojama mediena būna dažyta ir impregnuota, joje būna priemaišų. Tokią medieną apdoroti yra sudėtinga, yra reikalingi specialūs trupintuvai, degimo procesui bei emisijoms keliami griežtesni reikalavimai.

Medienos kurą taip pat galima klasifikuoti, ar jis perdirbtas, ar ne. Neperdirbtas- tai toks kuras, kuris buvo tik supjaustytas arba supakuotas, tačiau jo mechaninės savybės nepakito. Neperdirbtas kuras- skiedros, medienos perdirbimo atliekos, malkos. Perdirbtos medienos kuro rūšies pavyzdžiais gali būti medžio briketai ir granulės.

Kietojo ir skystojo, vadinasi, ir biokuro, degieji elementai yra anglis C, sieras S ir vandenilis H, jų kiekis kure taip ir žymimas ir yra matuojamas procentais (%) [22]. Taip pat į kuro sudėtį įeina deguonis (O, %) ir azotas (N, %), šie sudaro vidinį kuro balastą. Kuro drėgmė (W, %) ir mineralinės priemaišos (A, %) sudaro išorinį kuro balastą. Buvo teigiama, kad medžių kamieno medienos sausoji degimo šiluma yra 18,9 MJ/kg ir nepriklauso nuo medžių rūšies, tačiau žievės degimo

šiluma, esant skirtingai medžių rūšiai, skiriasi. J. Ebeling ir B. M. Jenkis ištyrę 62 biomasės rūšių cheminę sudėtį ir šiluminę vertę nustatė, kad sausos masės aukštesnė degimo šiluma svyruoja nuo 14,5 iki 23,28 MJ/kg. Be to, biokuras, kaip ir visas kietasis kuras, yra sudarytas iš degiosios ir nedegiosios dalies. Drėgmė ir pelenai sudaro kuro nedegiąją dalį. Degiosios medžiagos ir pelenai sudaro kuro sausąją masę. Ką tik nupjauta biomasė būna 50% ar net didesnės drėgmės. Kuro didžiąją dalį (99%) sausosios masės sudaro vandenilis, anglis ir deguonis, azoto kiekis paprastai būna nedidelis ir neviršija 0,2%, sieros- iki 0,05% sausosios masės. Azoto kiekį degimo produktuose vien iš kuro cheminės sudėties yra sunku įvertinti, nes tai labai priklauso nuo degimo proceso ir katilo tipo. Sieros kiekis, esantis kure, yra vienas svarbiausių ekologiniu požiūriu, kadangi po degimo susidarantys sieros junginiai, teršia atmosferą, sukelia rūgščius lietus, taip pat, gali sukelti eroziją katilo viduje. Nors ir chloro (Cl) kiekiai kure būna labai nedideli, tačiau gali sukelti daug vargo. Šis sukelia katilo paviršių koroziją, todėl chloro kiekį kure būtina žinoti. Yra žinoma, kad chloro yra šiauduose, spygliuočių spygliuose. Į sunkiųjų metalų koncentracijas kure reikėtų atsižvelgti esant itin griežtiems aplinkosauginiams apribojimams, šiaip medienos kure sunkiųjų metalų koncentracijos yra labai neįžymios.

Pats degimo procesas kietajam kurui, yra sudėtingas procesas, sudarytas iš daugybės sudėtingų reiškinių. Kontroliuojant degimo procesą, galime kontroliuoti teršalų išmetimą į atmosferą, degimo stabilumą, konversijos efektyvumą. Anglis (C) yra pagrindinis kuro degiosios dalies elementas. Jos kiekis kure gali būti labai įvairus ir priklauso nuo kuro suanglėjimo laipsnio. Pavyzdžiui, medienoje anglies yra apie 50%, o mazute 90%, vadinasi, sudeginus 1 kg mazuto šilumos gausime daugiau, kadangi didesnis suanglėjimo laipsnis. Kuo daugiau kure anglies, tuo yra didesnė degimo šiluma, tačiau trumpesnė liepsna, o kuo mažiau anglies, tuo degimo šiluma mažesnė, tačiau ilgesnė liepsna. Kuo liepsna trumpesnė, tuo kurą uždegti sunkiau. Antrasis pagal svarbą elementas deginant kurą- vandenilis, sudeginus 1 kg vandenilio, išsiskiria daugiau nei 4 kartus daugiau šilumos, nei sudeginus 1 kg anglies. Kietajame kure jo nėra daug - 2-5%. Kuo didesnis kuro suanglėjimo laipsnis, tuo vandenilio mažiau. Skystajame kure vandenilio yra daugiausia. Siera kure būna junginių forma. Yra skiriama degioji ir nedegioji siera. Degioji - tai organinė ir sulfidinė siera, sudegus 1 kg degiosios sieros, išsiskiria 9050 kJ šilumos [10]. Nedegioji siera - sulfatinė siera, ji yra priskiriama prie pelenų. Sieros kure nebūna daug: kietajame kure iki 8%, o skystajame iki 3,5%.

Azoto ir sieros oksidams jungiantis su atmosferos drėgme susidaro azoto ir sieros rūgštys. Jos kartu su krituliais teršia žemės paviršių ir vandenį. Rūgštieji lietus rūgština dirvas, dėl to sumažėja derlingumas. Jie ypač pavojingi ežerams, nes skatina dumblių augimą.

Jeigu kure sieros yra daugiau kaip 1 %, ES direktyvų reikalavimu būtina įrengti išlakų valymo įrenginius, kad ji nesikaupytų. Sieringojo kuro (akmens anglių, mazuto) degimo produktams valyti naudojami specialūs įrenginiai bei sistemos.

Degant kurui, deguonis (O) ir azotas (N) šilumos neišskiria, todėl jų kiekis kure pageidautina kuo mažesnis. Deguonies kiekis kure būna labai įvairus ir gali būti 0,5 - 40%. Deguonies kiekis kure mažėja didėjant kuro suanglėjimo laispsniui. Azoto kiekis kure būna 0,5 - 2%. Degant kurui, azotas pereina į degimo produktus. Nedegiosios mineralinės priemaišos mažina katilo ekonomiškumą, našumą, mažina kuro degimo šilumą. Paprastai kure nurodomas ne mineralinių priemaišų kiekis, o kuro peleningumas (A, %). Likutis, susidarantis iš kure esančių mineralinių priemaišų jam visiškai sudegus, vadinamas pelenais. Jų kiekis esti labai įvairus - nuo procento dalių iki kelių dešimčių procentų. Pavyzdžiui mazute jis tesiekia 0,3%, o rusvųjų anglių gali siekti ir 40% [10]. Biokure peleningumas yra apie 1%.

Išorinį kuro balastą sudaro ir kure esanti drėgmė (W). Drėgmė yra nepageidautina, kadangi drėgną kurą yra sunkiau uždegti, kuro drėgmė žemina kūryklos temperatūrą, o dėl to prastėja šilumos mainai. Kietajame biokure kuro drėgnis gali būti 5 - 60%. Aišku, gali būti ir didesnis, bet tuomet nebeapsimokės energetiškai jį deginti. Didžiausias drėgnis būna mažesnį suanglėjimo laispnį turinčiame kure, mažiausias - didžiausią.

Esant skirtingoms džiūvimo sąlygoms, medienos drėgnis įsotinimo tašką pasiekia skirtingą. Įsotinimo taškas - pusiausvyrinis drėgnumas. Lauko sąlygomis medienos skiedros džiūna, kol drėgnis pasiekia 20- 25% [11]. Vidaus sąlygomis medieną galima išdžiovinti iki 8 - 15% drėgmės.

Biokuro šilumingumas. Yra skiriamas viršutinis ir apatinis šilumingumai. Viršutinis šilumingumas apskaičiuojamas darant prielaidą, kad vandens garai degimo produktuose (dūmuose) visiškai kondensavosi. Apatinis šilumingumas apskaičiuojamas neatsižvelgiant į vandens garų kondensacijos šilumą dūmuose (degimo produktuose). Kuo kuras drėgnesnis, tuo didenis skirtumas tarp viršutinio ir apatinio šilumingumų.

Degimo produktai iš katilo į dūmtraukį dažniausiai išmetami esant aukštesnei nei 100 °C temperatūrai. Taigi, degimo produktai išmetami kur kas aukštesnės temperatūros nei rasos taško temperatūra. Lieka neišnaudotas didžiulis energijos potencialas bei kondensacijos energija. Deginant gamtines dujas ar medienos kurą, degimo produktus ataušinus, dėl kondensacijos galime susigrąžinti apie 20% šilumos [11].

Skaičiuojant katilo naudingumo koeficientą, naudojamosi apatiniu kuro šilumingumu, tačiau esant katilams su vandens garų kondensacija, naudingumo koeficientas gali viršyti 100%. Bet tai tik susitarimas, o ne energijos tvermės dėsnio pažeidimas.[21]

Kaip jau minėjau, medienos kamieno šilumingumas nuo rūšies praktiškai nepriklauso. Tačiau žievės šilumingumas viršija pagrindinės atitinkamas medienos masės charakteristikas (2.1 lentelė).

**2.1 lentelė** Plačiausiai paplitusių medžių rūšių žemutinis šilumingumas,  $q_{net,d}$ , MJ/kg [11].

Medžio rūšis	Kamienas be žievės	Žievė	Visas kamienas	Šakos ir viršūnės	Visas medis
Paprastoji pušis	19.31	19.53	19.33	20.23	19.52
Paprastoji eglė	19.05	18.8	19.02	19.17	19.29
Plaukuotasis beržas	18.68	22.75	19.19	19.94	19.3
Karpotasis beržas	18.61	22.52	19.15	19.53	19.29
Baltalksnis	18.67	21.57	19	20.03	19.18
Juodalksnis	18.89	21.48	19.31	19.37	19.31
Drebulė	18.67	18.57	18.65	18.61	18.65

### 2.2.2 Kietasis atgautasis kuras.

Kietasis atgautasis kuras tai kietasis kuras, kuris yra paruoštas iš nepavojingų atliekų. Šis kuras naudojamas deginimo arba bendrojo atliekų deginimo įmonėse energijai gauti. KAK turi būti tinkamai apdorotas ir atitikti LST EN 15359:2012 Lietuvos standarto reikalavimus.



**2.5 pav.** Kietasis atgautasis kuras [12]



Kietasis atgautasis kuras naudojamas kaip papildas prie kuro. Naudojant KAK utilizuojame atliekas ir regeneruojame energiją. Įvairiose gamyklose KAK gali pakeisti pusę įprastai naudojamo kuro. Tačiau deginant atliekas susiduriama su problemomis. Viena iš jų - sunkieji metalai. Kita problema - emisijos į orą, bet jos yra ribojamos ES direktyva. Taigi problema išvengiama įsirengiant dūmų valymą. Jis labai brangus, tačiau pigus kuras.

Pirmoji atliekas deginanti jėgainė Lietuvoje - UAB „Fortum Klaipėda“. Šioje jėgainėje energija gaminama iš komunalinių atliekų ir biokuro. Ši jėgainė labai prisideda prie aplinkos taršos mažinimo, kadangi deginant šiukšles jos nepatenka į sąvartynus ir šios neišskiria aplinką teršiančių dujų. Taipogi, mažiau atliekų yra išvežamos į sąvartynus, todėl jie ne taip greitai „auga“ [13]. Ši jėgainė tiekia šilumą Klaipėdos miestui ir elektrą, kuri yra perduodama į nacionalinį tinklą.

Kadangi jėgainė degina KAK, kuris gali būti labai drėgnas, tam, kad geriau jį sudeginti, KAK yra maišomas su biokuru. Biokuras taip pat gali būti pakankamai drėgnas. Visumoje jėgainė degina drėgną atliekų ir biokuro mišinį. Taigi, reikia įdėti daug energijos, kad išgarinti visą šią drėgmę. Išmesti pro kaminą įdėtą energiją būtų prabanga, todėl yra naudojamas kondensacinis ekonomizeris susigrąžinti bent daliai energijos.

### **2.2.3 Ekologija.**

Energetikos ekologija reiškia siekti pagaminti šiluminę ir elektros energiją, kurios gamyba turėtų kuo mažesnę neigiamą įtaką aplinkai. Įvairių teršalų koncentracijos, susidarančios deginant vienokį ar kitokį kurą, yra normuojamos įvairiais aktais, direktyvomis ir kitais norminiais dokumentais. Tarša gali būti ne tik į atmosferą, tačiau taip pat sukelia dulkes, sukelia šiluminę taršą ir t.t. Mes kalbėsime tik apie taršą į atmosferą.

Šiuo metu griežčiausiai normuojami teršalai į atmosferą Lietuvoje yra LAND43-2013 bei 2010/75/ES direktyva. Esant dideliame energetiniame objektui, minimum turėtų būti įrengtas kondensacinis ekonomizeris, kuris šiek tiek pravalo iš katilo išeinantį dūmą. Deja, šiuo metu jo jau nebepakaktų, o reiktų įsirengti dūmų valymo įrenginius. Kondensacinis ekonomizeris vistiek yra reikalingas, kad atliktų pirminę savo funkciją - grąžinti dalį energijos kondensuojantis dūmui.

Kondensacinis ekonomizeris gali būti puiki priemonė valant dūmus nuo kietųjų dalelių. Ypač efektyvi deginant medieną, kadangi pelenai esti didesni nei deginant, tarkim, skystą kurą, taigi, pelenų sugaudymo laipsnis būtų didesnis.

### 2.3 PO DEGIMO SUSIDARIUSIOS MEDŽIAGOS.

Deginant biokurą susidaro pagrindiniai degimo produktai- vandens garas ir anglies dvideginis, tačiau taip pat susidaro daug ir žalingų medžiagų- teršalų. Po degimo susidariusius teršalus galima skirstyti į dvi grupes [14]: teršalai, kurie susidaro nepriklausomai nuo degimo proceso ir teršalai, kurie susidaro priklausomai nuo degimo proceso. Pirmuoju atveju teršalų kiekis priklauso tik nuo pirminės medžiagos deginamoje medžiagoje, pvz.: siera. Antruoju atveju teršalų kiekius galime reguliuoti reguliuojant degimo procesą, oro padavimą, temperatūrą ir pan., pvz.: CO, NO, suodžiai.

Azoto oksidai susidaro trimis keliais. Virš 1260°C temperatūros susidaro terminiai azoto oksidai. Šie susidaro iš ore esančio deguonies ir azoto. Kuro azoto oksidai susidaro iš kure esančio azoto. Šis azotas būna kure įvairių junginių pavidalu. Greitieji azoto oksidai susidaro liepsnos fronte, ten, kur dar nevyksta degimas, bet yra angliavandenilių skylimo produktų. Pagrindinis šaltinis- ore esantis deguonis ir azotas, tačiau taip pat reikalingas radikalas, pvz.: CHN. Kurių azoto oksidų yra daugiausiai, priklauso nuo deginamo kuro ir paties degimo sąlygų.

CO (smalkės) pilnai oksiduojamos, esant reikiamam deguonies kiekiui ir temperatūrai. Esant vandens garui, oksidacija vyksta greičiau, nes vandens garas veikia kaip katalizatorius. CO susidaro esant per trumpam buvimui temperatūroje arba per mažam deguonies kiekiui. Aukštesnės eilės angliavandeniliai susidaro atšaldžius liepsną.

Kietosios dalelės (KD) susidaro iš: nepilnai sudegusio kuro- susidaro suodžiai, iš nedegios neorganinės dalies- pelenai, o deginant verdančio sluoksnio tipo kūryklose taip pat būna ir smėlio dalelių. KD susidaro iš nepilnai sudegusių angliavandenilių juos atšaldant liepsnos gale (dažniausiai), taip pat susidaro esant deguonies trūkumui.

Sieros oksidai: SO<sub>2</sub> ir SO<sub>3</sub>. SO<sub>2</sub> susidaro iš kure esančios sieros. SO<sub>3</sub> priklauso nuo deguonies kiekio ir nuo fakelo temperatūros. Maksimali SO<sub>3</sub> koncentracija atsiranda, esant 1300°C ir daugiau. SO<sub>3</sub> yra žalinga katilų paviršiams ir kaminams, nes sukelia žematemperatūrinę koroziją, esant ant paviršių žemesnei nei rasos taško temperatūrai.

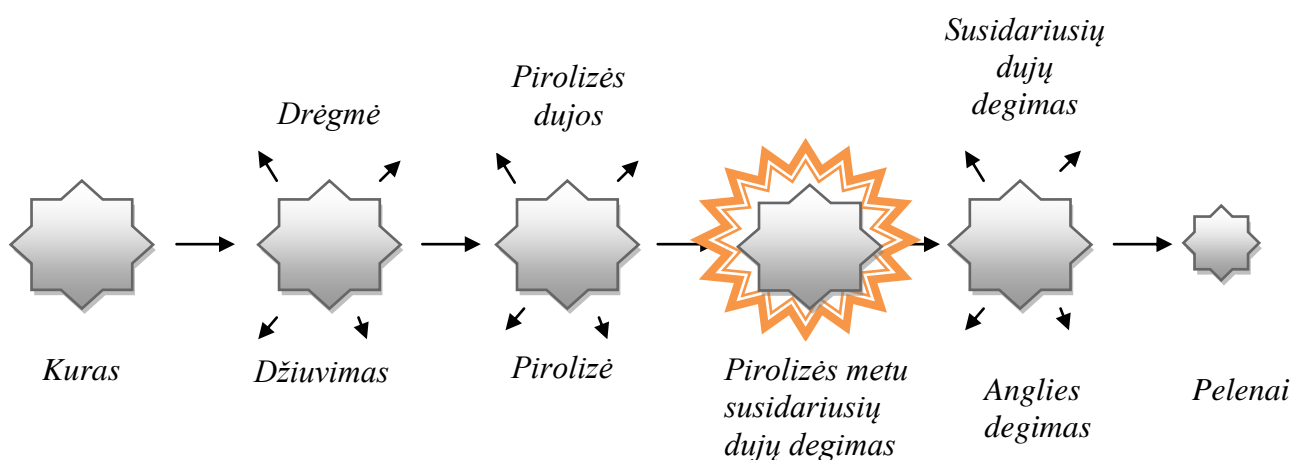
Visos šios medžiagos ne tik kad teršia atmosferą, bet ir kenkia augalams, gyvūnams ir pačiam žmogui.

Pelenai, patekdami į žmogaus vidų, paveikia kvėpavimo organus bei visą organizmą. Be to, pelenuose iš kieto kuro, dažnai būna fluoro, arseno, vanadžio junginių. Šiuo metu daug dėmesio yra skiriama azoto oksidams, o svarbiausia, kad azoto ir sieros oksidai stiprina vienas kito poveikį organizme.

Teršalų koncentracijos yra mažinamos dviem būdais: aktyviuoju ir pasyviuoju [14]. Pasyvusis- tai aukštų kaminų statymas. Tokiu būdu teršalai yra išskaidomi didesniame plote ir jų koncentracija ant Žemės būna mažesnė. Dažniausiai tokiu būdu yra išskaidomi azoto ir sieros oksidai. Didelių energetinių objektų kaminai būna aukštesni nei 300 m. Aktyviuoju teršalų koncentracijos mažinimo būdu tiesiai į kurą yra dozuojama atitinkamų medžiagų, dėl kurių teršalų koncentracijos sumažėja arba valant patį dūmą. Tačiau aktyvusis teršalų koncentracijos mažinimo būdas yra labai sudėtingas ir brangus.

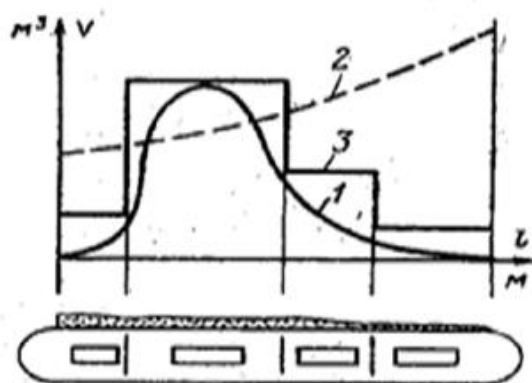
### 2.3.1 Biokuro degimas.

Biokuro degimas schematiškai gali būti pavaizduotas taip (2.6 pav.):



2.6 pav. Kieto kuro degimas [14]

Pirmiausia kuras džiūsta, vėliau išskiria lakiosios medžiagos, jos dega, o pabaigoje sudega anglis. 2.7 paveiksle pavaizduotas kietojo biokuro deginimas ant ardyno.



2.7 pav. Degimo zonos ant ardyno [14]

Kaip ir deginant bet kokį kurą, susidaro pagrindiniai degimo produktai- anglies dvideginis ir vandens garas.

Energijos gamyba deginant biokurą yra priskiriama prie ekologiškos, nes degimo metu susidaręs CO<sub>2</sub> yra gamtinės anglies dalyvis. Kitaip tariant, degimo metu susidaręs anglies dvideginis nedidina šiltnamio efekto. Taip yra todėl, kad augdama biomasė tą CO<sub>2</sub> sugeria atliekant fotosintezę. Gaunamas uždaras ratas.

NO<sub>x</sub> galima mažinti tinkamai deginant kurą, t.y. tinkamai organizuojant degimą. Azoto oksidų koncentracija dūmuose sumažėja sumažinant liepsnos temperatūrą ir atvirkščiai- liepsnos temperatūrą padidinus, azoto oksidų koncentracija dūmuose padidėja. Degimui organizuoti yra naudojami dvilaisnio degimo degikliai, naudojama dūmų recirkuliacija- t.y. į degiklį tiekiami katilė jau ataušusių dūmų, į fakelą purškiama vandens. Kūrykloje NO<sub>x</sub> susidaro mažiau, sumažinus O<sub>2</sub> koncentraciją, vadinasi, sumažinus oro pertekliaus koeficientą  $\alpha$ .

### **2.3.2 Skysčio išpurškimas energetikoje.**

Skysčio išpurškimas yra plačiai taikomas energetikoje ir pramonėje. Išpurkštas skystis turi didelį paviršiaus plotą, todėl išpurškus skystį atsiranda didelis paviršiaus plotas tarp skysčio ir dujų. Sąveika tarp skysčio ir dujų vyksta tarp šilumos ir masės procesų. Norint kuo geriau pažinti skysčio išpurškimo besiremiančias technologijas, reikia kuo geriau pažinti šilumos ir masės mainus lašelyje, bei išmokyti tinkamai juos valdyti. Sudėtingumas atsiranda tame, kad sudėtiniai pernašos procesai ir procesų intensyvumą lemiančios tarpusavio sąveikos vyksta kintančiose kraštinėse sąlygose. Tarkim, lašelis garuoja, vadinasi jo dydis pastoviai kinta- mažėja. Norint kuo geriau suprasti pernašos procesų dėsningumus išpurkštam skysčiui, pirmiausia juos reikia išsamiai pažinti paprasčiausiose kraštinėse sąlygose.

Šių dienų aktualija- aplinkosauga ir ekologija. Beveik kiekvieną dieną žiniasklaidoje girdime minint su ja susijusias problemas. Tai lėmė pastoviai augantis reikalingas energijos kiekis, o šis aplinkosauginės politikos orientavimąsi į aplinkos taršos profilaktiką. Didžiausi teršalų išmetimai esti transporto sektoriuje, antroje vietoje pramonės ir energetikos objektuose, tačiau pagal šiluminį gamtos teršimą pirmauja energetika ir pramonė. Taigi, labai svarbu kuo labiau tobulinti skysčio išpurškimo grindžiamas termines technologijas. Labai plačiai energetikoje naudojamas ne tik išpurškimas deginant skystąjį kurą, bet ir plačiai pritaikomas vandens išpurškimas. Šis pritaikomas dujų srauto temperatūrai reguliuoti, dūmuose sukauptai fazinių virsmų šilumai utilizuoti ir juos išvalyti, paviršius apsaugančioms dvifazio srauto priedangoms sudaryti, orui ataušinti tarp turbokompresoriaus pakopų ir t.t. [15]. Fazinių virsmų šilumos utilizavimo iš išmetamų dūmų technologijos remiasi dvifazių srautų termohidromechanikos ir dūmuose esančio vandens garo

iškondensavimo bei dūmų ataušinimo procesais. Taigi, utilizuojamą šilumą iš šalinamų biokuro dūmų galime susigrąžinti naudojant kontaktinį arba rekuperacinį šilumokaitį - kondensacinį ekonomazerį. Abejais atvejais reikalingas vandens išpurškimas: kontaktiniame vandens garas iš dūmų iškondensuojamas tiesios ant į juos įpurškto vandens lašelių, o rekuperaciniame vanduo purškiamas virš vamzdelių retinės, kad pagerinti vamzdelių vidumi tekančios gravitacinės kondensato plėvelės hidrodinamiką. Akivaizdu, kad vandens išpurškimo technologijos biokuro deginime yra labai svarbus aspektas, todėl būtina jį gerai pažinti ir įsisavinti. Optimizavus vandens išpurškimą į išmetamus dūmus tobulinamas rekuperacinių ekonomazerių naudojimas bei sudaromos prielaidos kontaktinių ekonomazerių pritaikymui.

### **3 ŠILUMOS IŠ ŠALINAMŲ BIOKURO DŪMŲ UTILIZAVIMAS.**

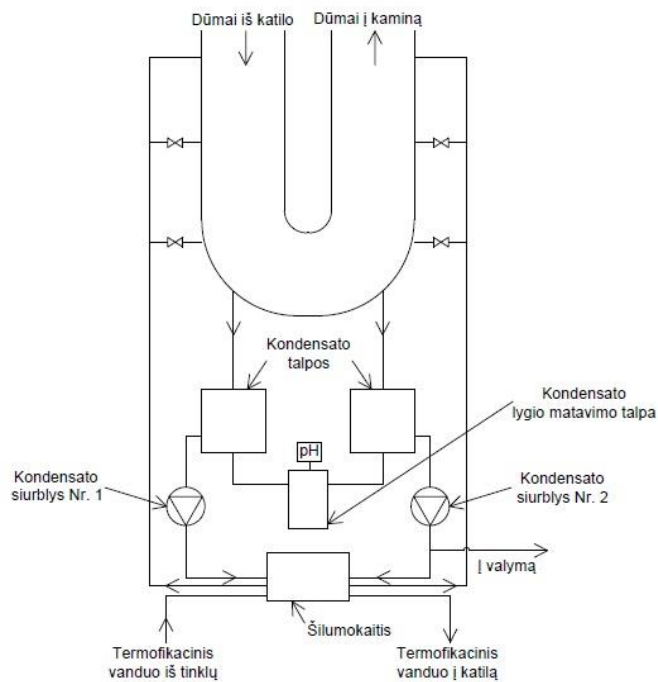
#### **3.1 KONTAKTINIŲ IR REKUPERACINIŲ KONDENSACINIŲ EKONOMAIZERIŲ PRINCIPINĖS SCHEMOS IR JŲ ANALIZĖ.**

Biokuro deginimo technologijose, kaip minėjome, tradiciškai pritaikomi kontaktinio tipo ir rekuperaciniai kondensaciniai ekonomazeriai. Juose iš principo skiriasi kontakto tarp biokuro dūmų ir kondensacijos paviršiaus sudarymas bei išsiskyrusios kondensacijos šilumos perdavimo šildomam fluidui (dažniausia tai būna į katilinę grįžtantis termofikacinis vanduo) principas.[24]

Kontaktinio tipo kondensaciniuose ekonomazeriuose garo iškondensavimo iš biokuro dūmų procesas ir termofikacinio vandens pašildymo procesas yra vykdomi atskirai, sąlyginai galima sakyti atskiruose kontūruose. Pirmajame kontūre pritaikomas tiesioginis vandens išpurškimas į biokuro dūmų srautą ir garo kondensacijos procesas vyksta tiesiog ant šylančių vandens lašelių paviršiaus. Antrajame kontūre iš pirmojo kontūro lašelių susidariusio kondensato srautas plokštelyje pašildo termofikacinio vandens srautą.

Rekuperacinio tipo kondensaciniame ekonomazeriulyje vandens garas iš biokuro dūmų iškondensuojamas jiems tekant spalvotų metalų vamzdelių vidumi kartu jų pluoštą aptekant šildomam termofikaciniam vandeniui. Dūmų ir gravitacinės kondensato plėvelės tekėjimo hidrodinamikai užtikrinti viršutinėje kondensacinio ekonomazerio dalyje virš vamzdelių retinės yra purškiamas vanduo (dažniausia tai būna vandens garo kondensatas).[25]

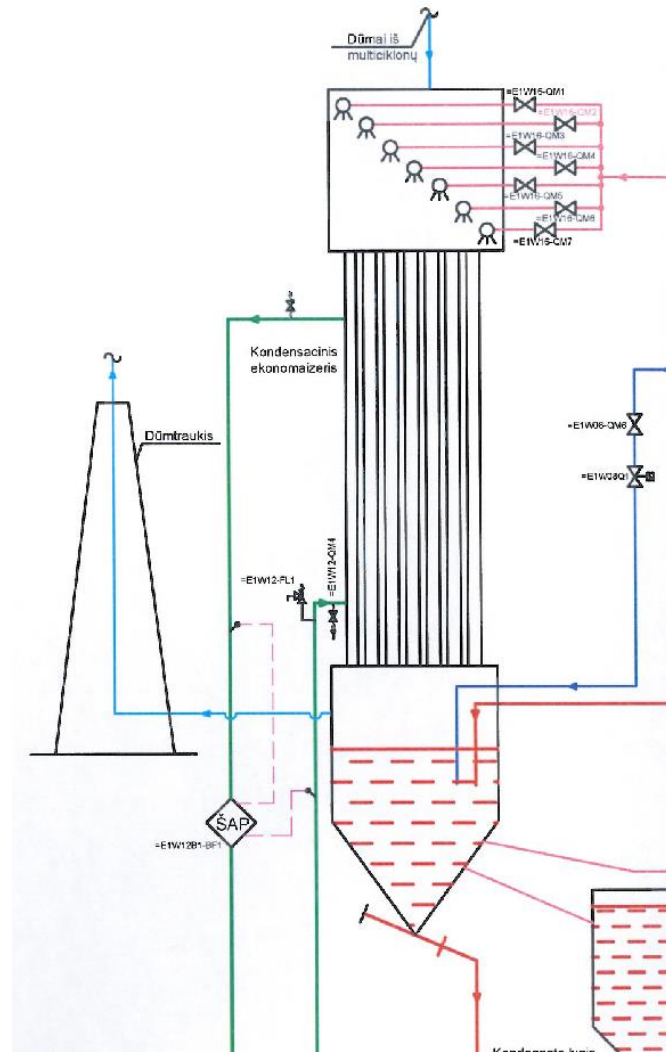
Pirmiausia, panagrinėkime kontaktinio tipo kondensacinį ekonomazerį (3.1 pav.)



**3.1 pav. Kontaktinio kondensacinio ekonomizerio principinė schema.**

Kaip matome, dūmai, atėję iš katilo į kondensacinį ekonomizerį, yra ataušinami į juos išpurškiant vandens lašelius. Vėliau, jau vėsesni ir sausesni dūmai keliauja į kaminą ar į dūmų valymo įrenginius. Tuo metu susidaręs kondensatas susirenka į kondensato talpas, iš kurių yra siurbliais paduodamas į šilumokaitį, kuriame juo pašildomas iš tinklų paduodamas termofikacinis vanduo, kuris vėliau keliauja į katilą, kuriame reikia idėti jau mažiau energijos.

6 priede pateiktoje kondensacinio ekonomizerio srautų principinėje schemoje Ignalinos Šilumos tinkluose, matome, kad kontaktinio tipo KE principas toks pats, kaip ir 3.1 paveiksle. Pati schema yra smulkesnė: prieš purkštukus yra nurodyti avariniai vožtuvai, bei nurodyta, iš kur vanduo yra imamas- iš vandentiekio. Kadangi surenkamas kondensatas gali būti rūgštinės terpės, jo pH yra stebimas ir dozuojamas NaOH. Be to, už KE stovi lašų gaudytuvas, kuris sugaudo nenusėdusius lašelius, kadangi šie gali stipriai sugadinti toliau stovinčius įrenginius, net ir paprasčiausią dūmsiurbį.



**3.2 pav. Rekuperacinio tipo kondensacinio ekonomizerio iškarpa iš kondensato valymo schemos.**

UAB „Vilniaus energija“ kondensacinio ekonomizerio eksploatavimo instrukcijoje šilumos mainų teorija aprašoma taip:

„Kondensatoriaus šilumos mainų paviršiaus plotą tarp dūmų ir kondensato sudaro vandens lašelių, sukurtų purkštukų pagalba, plotas. Bendras vandens lašelių plotas yra be galo didelis, tuo metu kai lašeliai dideliu greičiu patenka į dūmus. Vandens lašelius sugeriantis paviršius atlieka mechaninio šilumos nešėjo vaidmenį. Dūmų šiluma kondensato vandeniu perduodama į kondensato surinkimo talpą, o toliau siurblių pagalba į šilumokaitį, kur pašildo grįžtamą termofikacinį vandenį, taip perduodant šilumos energiją iš dūmų į termofikacinį vandenį.

Kai drėgni dūmai tokiu būdu yra aušinami, pasiekiamas rasos taškas ir dūmuose esantys vandens garai kondensuojasi, t.y. iškrenta kaip skystis. Kuo daugiau dūmai yra aušinami, tuo daugiau kondensato yra sukuriama. Kondensato kiekį galima laikyti šilumos regeneravimo matu. Matuojant kondensato tūrį, galima paskaičiuoti perduotos energijos kiekį. Kondensatas yra naudojamas kaip technologinis vanduo, kuris aušina dūmus uždaroje sistemoje. Perteklinis kondensatas yra išvalomas vandens valymo moduliuose ir pašalinamas iš sistemos.

Dėl intensyvaus dūmų apipurškimo, kondensatas taip pat veikia kaip valantis filtras. Stambios dulkių dalelės yra pašalinamos iš dūmų kondensato pagalba.

Kondensato surinkimo talpoje matuojamas ir reguliuojamas kondensato pH, dozuojant į kondensatą atitinkamai šarmą arba rūgštį.“

3.2 paveiksle yra pateiktas kito tipo- rekuperacinio kondensacinio ekonomaizerio principinė schema. Šiame KE šilumos mainai tarp dūmų ir termofikacinio vandens vyksta ne tiesiogiai, o per vamzdines sienes. Kaip matome, į kondensacinį ekonomaizerį dūmai patenka iš viršaus. Čia į juos yra įpurškiama vandens (šiuo atveju tai iš dūmų atgautas kondensatas). Taip yra daroma, kad pagerinti dūmų ir gravitacinės kondensato plėvelės tekėjimo hidrodinamiką. Toliau dūmai leidžiasi žemyn vamzdeliais, o besikondensuojančio garo plėvelė storėja, kol vyksta kondensacijos procesas. Jei kondensacinio ekonomaizerio darbo režimas nėra tinkamai sureguliuotas, tai vandens garo kondensacija gali pasibaigti iki tol kol dūmai dar neištekėję iš vamzdelio. Tuomet kondensato plėvelė gali pradėti garuoti ir plonėti. Taip būtų vėl prarandama jau utilizuotos šilumos dalis. Kondensatas susirenka į talpą ekonomaizerio apačioje. Vamzdelius apiplauna iš šilumos tinklų grįžtantis termofikacinis vanduo. Šis yra paduodamas kondensacinio ekonomaizerio apačioje. Pašilęs termofikatas yra nuvedamas KE viršuje, kur vėliau atgautoji šiluma yra apskaitoma šilumos apskaitos prietaisu. Toliau termofikatą iki reikiamų parametrų šildo katilas.

### **3.2 PRAKTIKOJE NAUDOJAMOS TECHNOLOGINĖS SCHEMOS IR JŲ ANALIZĖ.**

Paanalizuokime praktikoje naudojamas technologines schemas, su kondensaciniais ekonomaizeriais.

4 priede pateikta AB „Kauno Energija“ Inkaro katilinės šiluminė schema. Katilinė kaip kurą naudoja biokurą. Pašildytas termofikacinis vanduo yra paduodamas į Vilijampolės ir Šilainių linijas. Grįžtantis termofikacinis vanduo praeina šilumos apskaitos prietaisą. Grįžtantis termofikacinis vanduo, nesvarbu, iš kurios linijos, prieš patekdamas į katilą, dar yra papildomai pašildomas dūmų kondensaciniame ekonomaizeryje. Šis KE yra rekuperacinio tipo. Po termofikacinio vandens pašildymo dūmų kondensaciniame ekonomaizeryje, šilumos kiekis yra nuskaitomas ir pro ventilių paduodamas į katilą, prieš kurį šilumos kiekis vėl yra nuskaitomas. Pašilusio iki reikiamų parametrų vandens šilumos kiekis vėl yra nuskaitomas. Šilumos kiekis šiluminėje schemoje yra nuskaitomas dar keletose vietų, tačiau tai nelabai žymūs kiekiai. Tačiau juos būtina žinoti, kad sudaryti šilumos balansą visai katilinei. Labai panašiai kondensacinis ekonomaizeris yra įterptas ir į Petrašiūnų elektrinę (5 priedas). Šis KE yra taip pat rekuperacinio tipo.



Kitokio tipo (kontaktinis) kondensacinis ekonomaizeris yra instaliuotas Šilko katilinėje (7 priedas). Šioje schemoje mus dominantis KE yra pažymėtas „VŠK-5,6 ekonomaizeris“. Šis KE fazinių virsmų šilumą susigrąžina iš VŠK-5 ir VŠK-6 biokuro katilų dūmų ir pašildo Vilijampolės linijos grįžtantį termofikacinį vandenį.

### **3.3 VANDENS IŠPURŠKIMO VIETA UTILIZUOJANT ŠILUMĄ IŠ ŠALINAMŲ DŪMŲ.**

Pramonėje ir energetikoje labai plačiai yra taikomas skysčio išpurškimas. Taikymo platumą lemia tai, kad išpurkštas skystis turi didelį paviršiaus plotą, todėl padidėja skysčio ir dujų kontaktas, o tai lemia efektyvias skysčio išpurškimo grindžiamas technologijas. Norint ištirti šilumos ir masės mainus tarp skysčio lašelių ir dujų, reikia tirti fazinių virsmų kitimą atskiro lašelio paviršiuje. Tai aiškina „lašo“ uždavinys. Šis uždavinys nėra naujas, o tyrinėjamas jau daugiau nei šimtmetį. Tačiau lašelių šilumos ir masės mainai sukelia nemažai problemų ne tik juos teoriškai skaičiuojant, bet ir skaičiavimus pritaikant praktikoje. Tai lemia dar didesnę susidomėjimą, kadangi skysčio išpurškimas yra labai plačiai taikomas ir dar bus taikomas ilgai ir ateityje. Skysčio išpurškimas plačiai taikomas branduolinėje energetikoje, šilumos energetikoje, chemijos pramonėje, medicinoje ir t.t. Mokslininkų publikacijos apie skysčio išpurškimą būna daugiausia apie vandenį ir skystąjį kurą. Teorinių „lašo“ uždavinio tyrimų nepakanka, būtini ir eksperimentiniai, šiems kelių atveria aukštas šiuolaikinės matavimo ir skaičiavimo technikos lygis, o norint pasiekti norimą rezultatą, būtina matavimo ir skaičiavimo sintezė. Teoriniai tyrimai atliekami analizuojant fundamentines lygtis pernašos procesams, o skaitiniai tyrimai atliekami lyginant modeliavimo rezultatus su eksperimentiniais tyrimų rezultatais.

#### **3.3.1 Kondensaciniuose ekonomaizeriuose vykstantys pernašos procesai, naudojant vandens išpurškimą.**

Po kūryklos ir tarpinių dūmų šilumą išnaudojančių įrenginių  $T_d$  temperatūros ir  $\bar{p}_g$  drėgnumo dūmų srautas prieš patekdamas į kaminą nukreipiamas į kondensacinį ekonomaizerį. Dūmų drėgnumas apibrėžiamas juose esančio vandens garo dalinio  $p_{g,d}$  slėgio ir dūmų  $p$  slėgio santykiu:  $\bar{p}_g = p_{g,d} / p$ . Šiluma iš šalinamų biokuro dūmų atgaunama juos ataušinant ir iš jų iškondensuojant vandens garą. Kondensacijos procesui vykti drėgni dūmai privalo kontaktuoti su paviršiumi, kurio  $T_p$  temperatūra yra žemesnė už rasos taško  $T_n$  temperatūrą. Rasos taško temperatūrą apibrėžia dūmų drėgnumas:  $T_n = T_{sot}(p_{g,d})$ . Tarp paviršiaus ir jį apiplaunančių dūmų srauto vyksta intensyvūs šilumos ir masės pernašos procesai. Kadangi dūmų temperatūra yra aukštesnė už paviršiaus temperatūrą, todėl dūmai paviršiui šilumą bendruoju atveju atiduoda šilumos laidumu, konvekcija ir spinduliavimu. Šilumos

atidavimo proceso varančiąją jėgą užtikrina dūmų ir paviršiaus temperatūrų skirtumas  $\Delta T = T_d - T_p$ , o dūmų šilumokaita paviršiui perduodamos šilumos srautą apibrėžia suminis šilumos atidavimo  $\alpha_\Sigma$  koeficientas ir kontakto paviršiaus  $A$  plotas:

$$Q_a = A \cdot \alpha_\Sigma \cdot (T_d - T_p); \quad (3.1)$$

Kartu su šilumokaitos procesais vyksta ir masės pernašos procesas, susijęs su vandens garo kondensacija ant paviršiaus. Jo varančiąją jėgą apibrėžia dūmuose esančio vandens garo  $p_{g,d}$  slėgio ir vandens garo prie paviršiaus  $p_{g,p}$  slėgio skirtumas:  $\Delta p_g = p_{g,d} - p_{g,p}$ . Su paviršiumi kontaktuojančio vandens garo slėgis apibrėžiamas kaip paviršiaus temperatūrą turinčio vandens sočiojo garo slėgis:  $p_g = p_{sat}(T_p)$ . Kondensacijos proceso intensyvumą galima apibrėžti vandens garo srauto paviršiuje  $m_{g,p}$  tankiu, kurį galima aprašyti analitiškai [16]:

$$m_{g,p} = \frac{D_{gd}\mu_v}{T_p R_\mu l_p} \left[ p_{g,p} - p_{v,d} + \frac{\mu_g}{\mu_d} \cdot \left( p \ln \frac{p - p_{g,d\infty}}{p - p_{g,p}} - p_{g,p} + p_{g,d} \right) \right]; \quad (3.2)$$

Čia:

$D_{gd}$  - vandens garo difuzijos dūmuose koeficientas;

$R_\mu$  - dujų pastovioji;

$\mu_g$  ir  $\mu_d$  - garo ir dūmų molekulinė masė atitinkamai;

$l_p$  - būdingas matmuo, kuriuo numatomas difuzinio sluoksnio storis  $l_p=R$ .

Garų srauto tankis apibrėžia ant paviršiaus susikondensuojančio garo  $G_{g,p} = m_{g,p} \cdot A$  srautą. Garo srauto ir vandens fazinių virsmų  $L$  šilumos sandauga savo ruožtu apibrėžia kondensacinio ekonomaizerio šiluminį našumą:

$$Q_a = G_{g,p} \cdot L; \quad (3.3)$$

Kondensacinio ekonomaizerio paviršius yra padengtas jame susikondensuojančio garo kondensato plėvele. Todėl visumoje kondensacinį procesą įtakos ne ekonomaizerio paviršiaus, o jį gaubiančios kondensato plėvelės paviršius. Kondensacijos procesas vyks tol, kol kondensato plėvelės  $A_{pl}$  paviršiaus  $T_{pl}$  temperatūra išaugs iki rasos taško temperatūros. Sudėtingumas yra tame, jog išsikondensuojant iš dūmų vandens garui biokuro dūmai sausėja. Todėl aukščiau aptarti šilumos ir masės mainų  $P$  parametrai (tame tarpe ir plėvelės  $A_{pl}$  paviršius) yra laiko  $P \equiv P(\tau)$  funkcijos, t.y. kondensacijos eigoje kinta ir jų kontrolė yra pakankamai sudėtinga. Todėl realiomis kondensacinio ekonomaizerio eksploatavimo sąlygomis yra galima vandens garo kondensacinio fazinių virsmų

režimo savaiminė kaita į kondensato plėvelės garavimo režimą jai pašilus virš rasos taško temperatūros. Tai galima traktuoti kaip kondensacinio ekonomaizerio šiluminį efektyvumą mažinantį veiksnį.

Taigi, biokuro dūmų šilumos utilizavimo technologijose vandens išpurškimo procesas vaidina svarbų vaidmenį. Kad tinkamai organizuoti vandens įpurškimą ir optimaliai jį valdyti, būtina gerai pažinti vandens lašelio šilumokaitos biokuro dūmų sraute dėsningumus bei lašelių paviršiuje vykstančių fazinių virsmų kondensacinio ir garavimo režimų savitumus. Juos apibrėžti eksperimentuojant realiomis kondensacinių ekonomaizerių eksploatavimo sąlygomis yra labai keblu. Todėl belieka eksperimentuoti laboratoriniuose stenduose arba teoriškai modeliuoti išpurkšto vandens lašelių sudėtinius šilumos ir masės pernašos procesus. Šiame darbe pasirinkta "lašo" uždavinio analizė.

### 3.3.2 Lašelio fazinių virsmų ciklas.

Išpurkšto lašelio gyvavimo ciklas yra suskaidomas nuo skysčio išpurškimo į dujas iki lašelio išnykimo. Skysčio išpurškimas žymimas  $\tau \equiv \tau_0 = 0$ , o išnykimas  $\tau \equiv \tau_f$ . Kadangi pernašos procesai aktualūs ne tik lašelio gyvavimo pradžioje ir pabaigoje, dar yra išskiriami kondensacinis  $\tau_{ko}$ , nestacionariojo (pereinamojo) garavimo  $\tau_{nf}$  ir pusiausvirojo garavimo  $\tau_{ef}$  režimai.

Pusiausviro garavimo režime garuoja visas skysčio paviršius procese dalyvaujant visai lašeliui teikiamai šiluminei energijai. Itin svarbu skaičiuojant fazinius virsmus cikle apibrėžti lašelio paviršiaus temperatūrą. Kondensacinio režimo metu būtina  $T_R(\tau) < T_{rt}$  sąlyga. Nuo lašelio išpurškimo iki kondensacinio režimo pabaigos, lašelio paviršius pašyla nuo išpurkšto skysčio temperatūros  $T_0$  iki rasos taško temperatūros  $T_{rt}$ . Išpurkšto vandens lašeliai kondensaciniame režime yra labai intensyviai šildomi. Šilumos srauto  $q_{\Sigma}^+$  tankis lašelio paviršiaus išorinėje pusėje rodo lašeliui šilumos teikimo šilumokaita intensyvumą. Fazinių virsmų kondensacijos procese dalyvaujančios šilumos srauto intensyvumą rodo garo srauto  $m_g^+$  tankio ir fazinių virsmų  $L$  šilumos sandauga  $m_g^+L \equiv q_f^+$ . Taigi, kondensaciniame režime skystį lašelyje šildo  $q_h = q_{\Sigma}^+ + q_{f=k}^+$  šilumos srautas.

Nestacionariojo garavimo režimo metu lašelis pašyla nuo rasos taško temperatūros iki pusiausviro garavimo sąlygas užtikrinančios  $T_{R,eg}$  temperatūros. Šio režimo trukmė-  $\tau \equiv \tau_{ko} - \tau_{eg}$ . Šio režimo metu skysčio (vandens) lašelyje šildymo intensyvumas sumažėja iki nulio, o lašelio temperatūra asimptotiškai artėja prie pusiausviro garavimo sąlygas užtikrinančios  $T_{R,eg}$  temperatūros, kuri yra apibrėžiama lašelių supančių dujų temperatūra ir garo tūrine dalimi drėgnose dujose.

Yra skiriamas vidinis ir išorinis „lašo“ uždavinys. Išoriniu uždaviniu yra apibrėžiamas lašelio šildymas ir faziniai virsmai. Todėl lašo išorinis uždavinys tradiciškai yra laikomas pagrindiniu. Šio uždavinio sprendimo pagrindiniais rezultatais yra lašelio šildymo intensyvumas ir garo srauto tankis lašelio paviršiuje. Vidiniu uždaviniu apibrėžiamas skysčio lašelyje šildymo intensyvumas. Kartais vidinį uždavinį galima ignoruoti. Tokio "lašo" uždavinio išoriniai modeliai skirti lašelio pusiausviram garavimo režimui modeliuoti, o lašelio paviršiaus temperatūra yra laisvai pasirenkama  $T_R(\tau) \equiv T_R$ . Tuo metu kondensacinio ir nestacionariojo režimo  $T_R(\tau)$  funkcijos ignoruoti negalima ir jai apibrėžti reikia įvertinti šilumos srautus abejose lašelio paviršiaus pusėse. Lašelio fazinių virsmų ciklo esmė yra ta, kad leidžia sistemingai pažvelgti į fazinių virsmų lašelio paviršiuje kaitą ir įvertinti kiekvieno režimo trukmę [15].

Šilumos nuvedimo į lašelį intensyvumą nusako suminis šilumos srautas lašelio paviršiaus vidinėje pusėje:

$$q_{\Sigma}^{-} = q_c^{-} + q_r^{-}; \quad (3.4)$$

(3.4) išraiškoje ir vėliau sutinkamuose parametrų žymėjimuose "+" nurodo parametro priklausomumą lašelio paviršiaus išorinei pusei, o "-" nurodo priklausomumą vidinei pusei.

Kai skystis lašelyje nejuda, tada  $q_c^{-} = q_K^{-}$ . Kai apsuptis lašelį neša be slydimo joje, tuomet  $q_c^{+} = q_K^{+}$  ir tuomet šiluma lašeliui teikiama laidumu.

Taigi, išpurkšto skysčio lašelių gyvavimo trukmę galima atspindėti lašelio gyvavimo ciklu:

$$0 \div \tau_{KO} \div \tau_e \div \tau_f; \quad (3.5)$$

čia  $\tau$ - laikas, s;

„0“ – atspindi skysčio išpurškimo laiką.

$0 \div \tau_{KO}$  – atspindi kondensacinio fazinių virsmų režimo laiką.

$\tau_{KO} \div \tau_e$  – nestacionariojo garavimo režimo pradžia ir pabaiga.

$\tau_e \div \tau_f$  – pusiausviro garavimo režimo pradžia ir pabaiga.

$$\tau_{KO} - 0 = \tau_{KO} \text{ (I 0-1 režimo trukmė);}$$

$$\tau_e - \tau_{KO} = \tau_{n.g.} \text{ (II 1-2 režimo trukmė);}$$

$$\tau_f - \tau_e = \tau_{p.g.} \text{ (III 2-3 režimo trukmė);}$$

Visame lašelio gyvavimo cikle garo srautą lašelio paviršiuje apibrėžia garo srauto tankio ir lašelio paviršiaus ploto sandauga:

$$g_g = m_g^{+} \cdot S_{lašelio} = 4\pi R^2 \cdot m_g^{+}; \quad (3.6)$$

### 3.3 pav. Lašelio fazinių virsmų ciklo seka.

Kai spinduliuotės procesų nepaisoma, tuomet kondensaciniame režime išpurkštas lašelis yra šildomas konvekcija ir kondensacijos metu išsiskiriančia fazinių virsmų šiluma. Šilumos srauto lašelyje tankis  $q_c^-$  apibrėžia vidinę šilumos konvekciją lašelyje, o ši užtikrina vandens šildymą lašelyje. Kondensaciniame režime:

$$q_{c,0-1}^- = q_c^+ + q_{f=ko}^+; \quad (3.7)$$

Nestacionariojo garavimo režime išorinė konvekcija šildo lašelį ir kartu lašelio paviršiuje garina vandenį:

$$q_{c,1-2}^- = q_c^+ - q_{f=ng}^+; \quad (3.8)$$

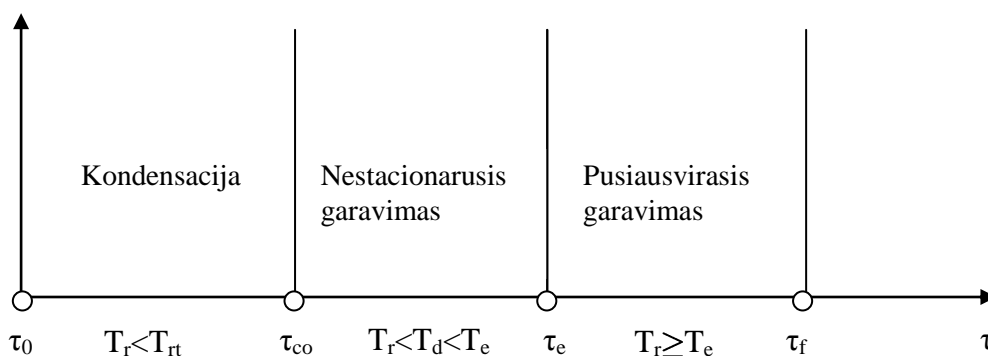
Nestacionariojo garavimo režime išorinės konvekcijos intensyvumas mažėja. Taip nutinka todėl, kad mažėja temperatūrų skirtumas:

$$\Delta T(\tau) \equiv T_g - T_R(\tau); \quad (3.9)$$

Pusiausviru garavimu suvokiamas procesas, kurio metu visa paviršiuje tiekama energija garina skystį.

#### 3.3.3 Lašo uždavinys.

Išpurkšto skysčio lašelio šilumos ir masės mainai yra nusakomi „lašo“ uždaviniu. Šio uždavinio sprendiniais gali būti skysčio šilumokaitos ir fazinių virsmų intensyvumas. Šis uždavinys gali būti pritaikomas skaičiuojant automobilio purkštuką, kontaktinį kondensacinį ekonomaizerį, dažymo įrenginį ir pan. Čia tik keleta pavyzdžių, tačiau akivaizdu, kad „lašo“ uždavinys aktualus labai plačiu mastu.



### 3.4 pav. Lašelio fazinių virsmų ciklo seka.

Kai spinduliuotės procesų nepaisoma, tuomet kondensaciniame režime išpurkštas lašelis yra šildomas konvekcija ir kondensacijos metu išsiskiriančia fazinių virsmų šiluma. Šilumos srauto lašelyje tankis  $q_c^-$  apibrėžia vidinę šilumos konvekciją lašelyje, o ši užtikrina vandens šildymą lašelyje. Kondensaciniame režime:

$$q_{c,0-1}^- = q_c^+ + q_{f=ko}^+; \quad (3.7)$$

Nestacionariojo garavimo režime išorinė konvekcija šildo lašelį ir kartu lašelio paviršiuje garina vandenį:

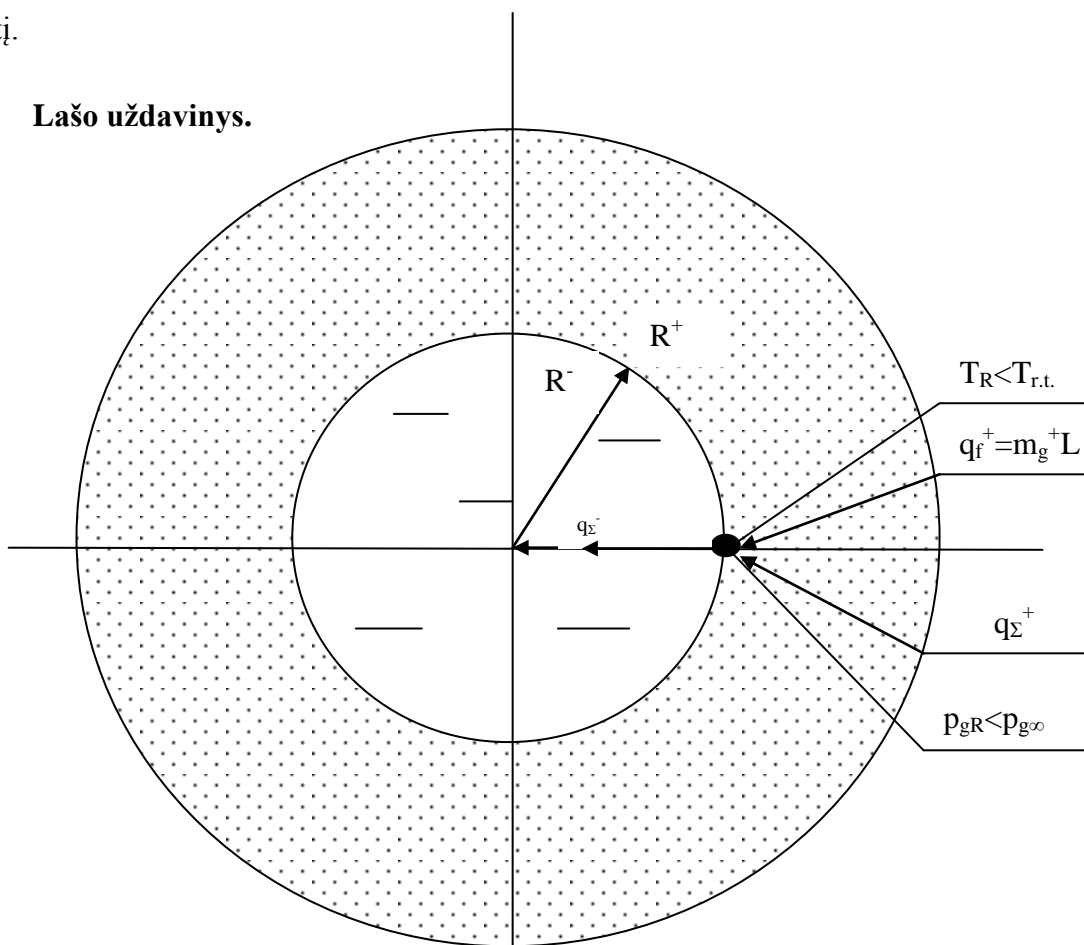
$$q_{c,1-2}^- = q_c^+ - q_{f=ng}^+; \quad (3.8)$$

Nestacionariojo garavimo režime išorinės konvekcijos intensyvumas mažėja. Taip nutinka todėl, kad mažėja temperatūrų skirtumas:

$$\Delta T(\tau) \equiv T_g - T_R(\tau); \quad (3.9)$$

Pusiausviro garavimu suvokiamas procesas, kurio metu visa paviršiuje tiekama energija garina skystį.

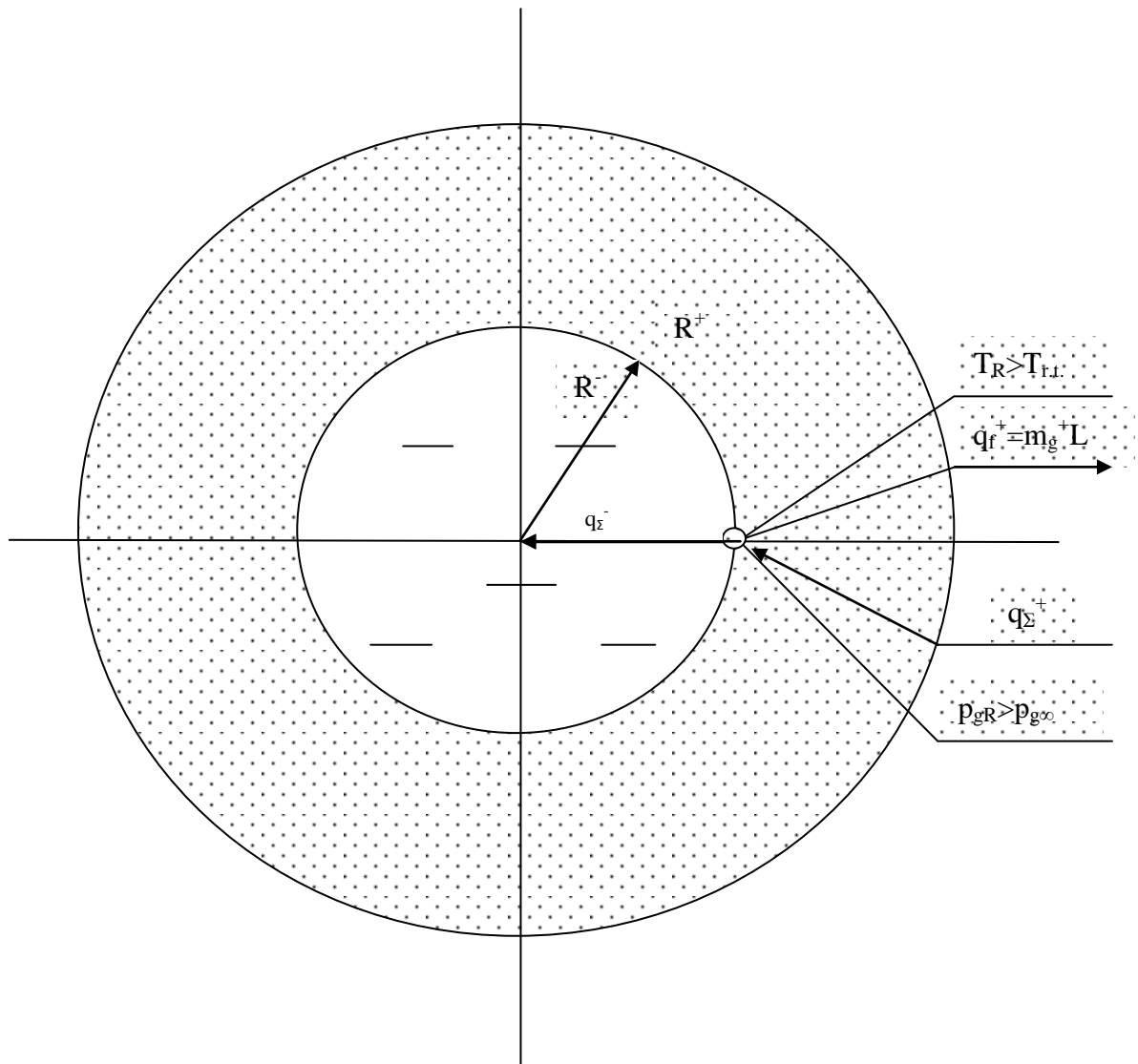
### 3.3.4 Lašo uždavinys.



3.5 pav. Lašo schema, esant kondensaciniam režimui.

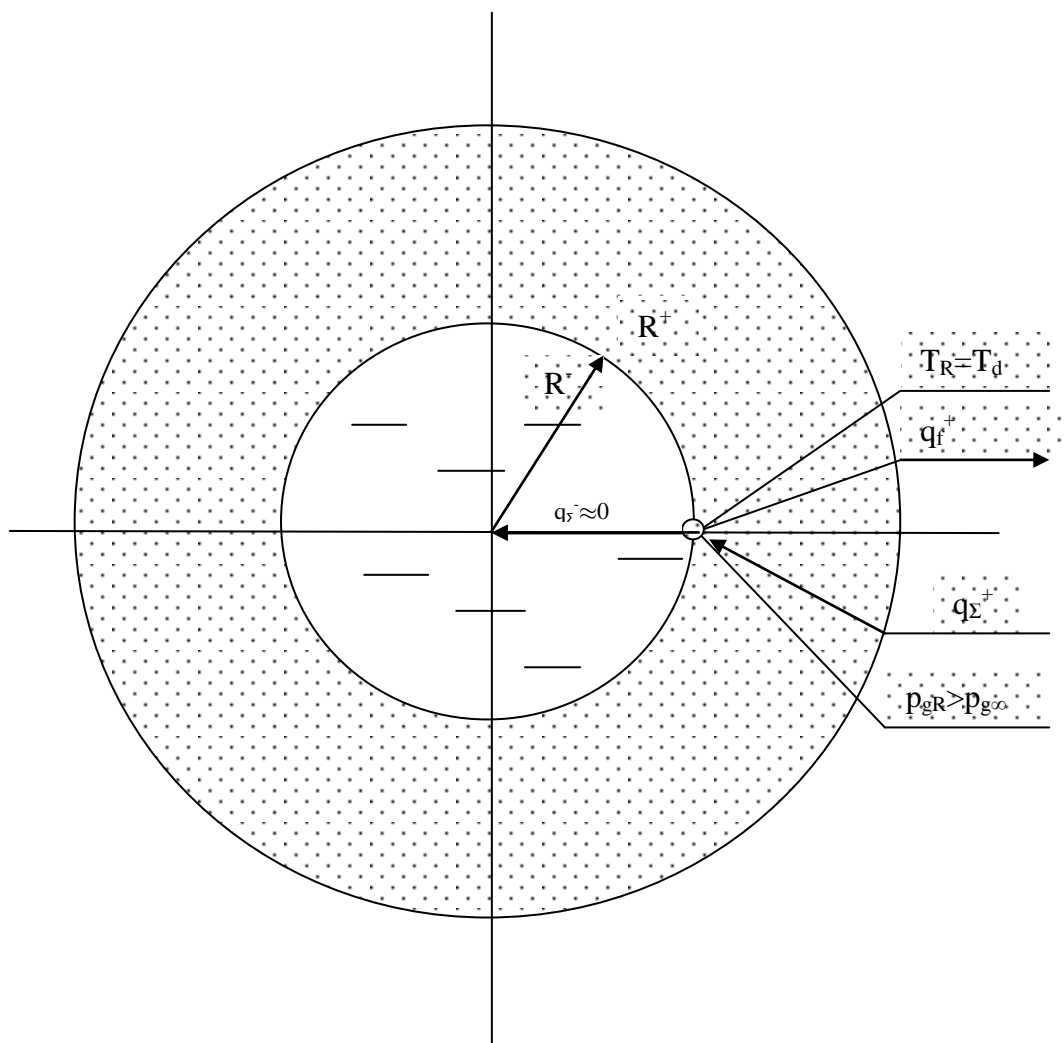
Išpurkšto skysčio lašelio šilumos ir masės mainai yra nusakomi „lašo“ uždaviniu. Šio uždavinio sprendiniais gali būti skysčio šilumokaitos ir fazinių virsmų intensyvumas. Šis uždavinys gali būti pritaikomas skaičiuojant automobilio purkštuką, kontaktinį kondensacinį ekonomizerį, dažymo įrenginį ir pan. Čia tik keleta pavyzdžių, tačiau akivaizdu, kad „lašo“ uždavinys aktualus labai plačiu mastu.

3.4 paveikslas iliustruoja lašo uždavinio schemą, esant kondensaciniam režimui. Kaip matome, dūmų santykinis drėgnis yra didesnis nei drėgnis ant lašelio paviršiaus. Fazinių srautų šilumos srautas  $q_f$ , yra nukreiptas į lašelio vidų ir yra lygus masės srauto tankio ir skysčio garavimo šilumos sandaugai. Viena iš sąlygų, kad vyktų kondensacinis procesas- lašelio temperatūra žemesnė už rasos taško temperatūrą. Šio fazių virsmo režime visa išorinė šilumokaitos šiluma ir fazinių virsmų šiluma, kuri išsiskyrė kondensacijos procese, yra nuvedama į lašelį.



3.6 pav. Lašo schema, esant nestacionariojo garavimo režimui.

3.5 paveiksle pavaizduotoje lašelio schemoje, esant nestacionariajam garavimo režimui, matoma, kad fazinių virsmų šilumos srautas yra kitokios krypties nei 3.4 paveiksle ir yra nukreiptas nuo lašelio į išorę. Šio režimo metu santykinis drėgnis ant lašelio paviršiaus yra didesnis nei dūmuose esantis drėgnis, nes kondensacinio proceso metu drėgmė kondensavosi ant lašelio paviršiaus ir lašelis pašilo iki rasos taško temperatūros. Viena iš sąlygų garavimo režimui vykti - lašelio paviršiaus temperatūra didesnė nei rasos taško temperatūra. Nestacionariojo garavimo režime į lašelį nuvedama šiluma yra lygi išorinės šilumokaitos šilumos ir fazinių virsmų šilumos skirtumui.



**3.7 pav. Lašo schema, esant pusiausvirojo garavimo režimui.**

Pusiausvirojo garavimo metu santykinis drėgnis ant lašelio paviršiaus yra didesnis nei santykinis drėgnis, esantis dūmuose. Lašelis nestacionariojo garavimo režime jau būna pašilęs iki pusiausviro garavimo temperatūros, kuri priklauso nuo dūmų parametrų ir dalinai priklauso ir nuo lašelio šildymo būdo. Kai lašelis šildomas laidumu, tai jis pradeda pusiausvirai garuoti prie žemesnės temperatūros negu sudėtinio šildymo atveju. Sudėtinio šildymo sąlygas apibrėžia lašelio slydimas dujose ir galimas spinduliuotės poveikis. Šio režimo metu skystį garina visa išorinės šilumokaitos energija.



### 3.3.5 Energijos srautų lašelio paviršiuje balanso sąvoka.

Labai svarbu teisingai nustatyti energijos srautus lašelio paviršiuje. Tai padaryti nėra itin paprasta, kadangi lašelis šyla ir garuoja vienu metu. Šie energijos srautai nulemia lašelio paviršiaus temperatūrą ir jos kitimą.

Pirmajame fazinių virsmų režime  $T_R > T_{r,t}$  ;

Antrajame fazinių virsmų režime:  $T_e > T_R > T_{r,t}$  ;

Trečiajame fazinių virsmų režime:  $T_R = T_e$  ;

Bet kurio proceso metu, momentinė temperatūra lašelio paviršiuje yra tokia, kad užtikrintų momentinį srautų balansą. Šis balansas reikalauja atitikti prie paviršiaus pritekančius ir nuo paviršiaus nutekančius srautus. Šio balanso bendra forma:

$$\overrightarrow{q_{\Sigma}^+}(\tau) + \overrightarrow{q_{\Sigma}^-}(\tau) + \overrightarrow{q_f}(\tau) = 0 ; \quad (3.10)$$

Šilumos srautai lašelio paviršiuje yra vektoriniai dydžiai, todėl aprašant šilumos srautų balansą lašelio paviršiuje tenka atsižvelgti į srautų dydį ir į jų tekėjimo kryptį..

Kai  $T_d > T_R$ , šis balansas atrodo taip:

$$q_r^+(\tau) + q_c^+(\tau) - q_r^-(\tau) \pm q_c^-(\tau) \pm q_f^+(\tau) = 0 ; \quad (3.11)$$

(3.11) išraiškoje prie vidinės šilumos konvekcijos srauto ir fazinių virsmų srauto esantis "plis" ir "minus" ženklas nurodo, jog šie srautai lašelio fazinių virsmų cikle gali keisti savo kryptį. Fazinių virsmų srautas keis savo kryptį iš kondensacinio režimo pereinant į garavimo režimą. Lašeliui šylant jo paviršius pradžioje šyla sparčiau ir temperatūros laukas lašelyje yra teigiamo gradiento. Neigiamo gradiento temperatūros laukas gali lašelyje susidaryti spinduliavimo poveikyje lašelio centriniams sluoksniams pašilus daugiau už paviršinius.

### 3.3.6 Šiluminių srautų lašelio paviršiuje matematinis aprašymas.

1. Fazinių virsmų šilumos srautas  $q_f^+$  :

$$q_f^+ = m_g^+ \cdot L ; \quad (3.12)$$

$$m_g^+ = \frac{D\mu_g}{R \cdot T_R \cdot R_\mu} \cdot p \cdot \ln \frac{p - p_{g^\infty}}{p - p_{gR}} ; \quad (3.13)$$

2. Šilumos srautas, kurį dujos lašeliui teikia išorine šilumos konvekcija  $q_c^+$  :

$$q_c^+ = \alpha \cdot (T_g - T_R); \quad (3.14)$$

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \rightarrow l = 2R \rightarrow \alpha = \frac{Nu_f \cdot \lambda_{gd}}{2R}; \quad (3.15)$$

$$Nu_f = Nu \cdot f(B_t); \quad (3.16)$$

Čia  $Nu_f$  - garuojančio lašelio konvekcinio šildymo intensyvumas, o  $Nu$  yra negaruojančio lašelio šildymo intensyvumas. Spoldingo šilumos pernašos parametro funkcija:

$$f(B_t) = \ln \frac{1 + B_t}{B_t}; \quad (3.17)$$

yra atsižvelgiama į lašelio fazinius virsmus lydinčio Stefano hidrodinaminio srauto poveikį lašelio šildymui: Stefano hidrodinaminis srautas lašelio garavimo intensyvumą slopina, o kondensaciniame režime spartina [17, 19, 20]. Čia  $f(B_t)$  - Spoldingo šilumos pernašos parametro pataisa, kai [17]

$$B_t = \frac{c_{pgd}(T_d - T_R)}{L} \cdot \left( 1 + \frac{q_c^-}{q_c^+} \right); \quad (3.18)$$

3. Šilumos srautas, nuvedamas į lašelio vidų  $q_c^-$

aprašomas pagal šilumos laidumo Furje dėsnį:

$$q_c^- = -\lambda \text{grad}T = -\lambda \frac{dT(r, \tau)}{dr}; \quad (3.19)$$

t.y. šio šilumos srauto apibrėžimas reikalauja žinoti lašelio temperatūros lauko gradiento kitimą fazinių virsmų cikle. Kai šiluma lašelyje plinta laidumu arba laidumu ir kartu spinduliavimu, tuomet lašelio temperatūros laukas ir jo gradientas aprašomi pagal [17] darbo metodiką. Tuo atveju, jei skystis lašelyje cirkuliuoja, tuomet atsižvelgiame ir į konvekcijos įtaką efektyviuoju šilumos laidžio parametru  $\lambda = \lambda_{ef}$ , efektyvųjį parametru apibrėžiant pagal [18] metodiką:

$$\lambda_{ef} = \lambda \cdot k_c, (k_c = 1 \div 2,6); \quad (3.20)$$

### 3.4 LAŠELIŲ IŠPURŠKIMO Į DŪMŲ SRAUTĄ FUNDAMENTINIS TYRIMAS.

#### 3.4.1 Lašelių išpurškimo į dūmų srautą modeliavimo principas.

Vandens lašelių ir biokuro dūmų dvifazis srautas apibrėžiamas dūmų  $T_d$  temperatūra ir  $\bar{p}_{g,d}$  drėgnumu bei išpurškiamo vandens  $T_0$  temperatūra, lašelių  $R$  dispersiškumu bei pradiniu slydimo dūmų sraute  $\Delta w_l = w_l - w_d$  greičiu. Daroma prielaida, jog vandens įpurškimas dūmų parametru nepakeis, t.y. modeliuojamas santykinai nedidelio vandens srauto išpurškimo atvejis.

Vandens garo srauto lašelio paviršiuje  $m_{g,R}$  tankis aprašomas pagal (3.13) modelį, kai  $T_p$  atitinka lašelio paviršiaus  $T_R$  temperatūrą, o difuzinio sluoksnio  $l_p$  storis yra proporcingas sferiškai

simetriško lašelio  $R$  spinduliui. Svarbu pastebėti, jog garo srauto (3.13) modelis ne tik galioja visam lašelio fazinių virsmų ciklui bet ir užtikrina galimą savaiminę fazinių virsmų režimų lašelio paviršiuje kaitą iš kondensacinio į garavimo režimą. Tai patogu nepertraukiamam šylančio lašelių fazinių virsmų ciklui modeliuoti [17]. Lašelio paviršiuje vykstančių fazinių virsmų šilumos srauto tankis fazinių virsmų cikle apibrėžiamas pagal analogiją su (3.12) išraiška taip:

$$q_{f,R}(\tau) = m_{g,R}(\tau) \cdot L(\tau); \quad (3.21)$$

Spinduliuotės įtaka paneigiama ir dūmų šilumokaita lašeliui teikiamos šilumos srauto tankis apibrėžiamas pagal konvekcinio šildymo modelį pagal analogiją su (3.14) išraiška:

$$q_{c,d}(\tau) = \lambda_{gd}(\tau) \frac{T_d - T_R(\tau)}{2R(\tau)} Nu_f(\tau); \quad (3.22)$$

Nuselto  $Nu_f = 2\alpha / \lambda_{gd}$  kriterijus lašeliui apibrėžiamas pagal [18] metodiką, papildomai įvertinus fazinius virsmus Stefano hidrodinaminio srauto poveikį konvekciniam šildymui pagal [19] rekomendacijas.

Šilumos pernešimo į lašelį intensyvumą nusako konvekcinės šilumos srauto lašelyje  $q_{c,l}$  tankis. Jis apibrėžiamas pagal šilumos plitimo laidumu lašelyje Furje dėsnio modifikuotą formą pagal analogiją su (3.19) išraiška taip:

$$q_{c,l}(\tau) = -\lambda_l(\tau) grad T_l(\tau) \cdot k_c(\tau) \quad (3.23)$$

kurioje lašelio temperatūros lauko gradientas imamas gerai žinomam šilumos laidumo atvejui, o lašelio slydimo poveikyje kilusios priverstinės vandens cirkuliacijos poveikis įvertinamas kaip jau aptarėme efektyviojo šilumos laidumo  $k_c$  parametru pagal [18] metodiką.

Lašelio kondensacinis ir garavimo režimai modeliuojami pagal darbe [17] išvystytą ir išsamiai aptartą lašelio fazinių virsmų universalus ciklo skaitinio tyrimo metodiką. Jos esmė yra ta, jog įvedama bematė lašelio radialinė

$$\eta = r / R(\tau); \quad (3.24)$$

užtikrinti visame lašelio fazinių virsme cikle vienetinį lašelio bematį matmenį. Realus laiko mastelis pakeičiamas Furje kriterijumi išreikštu universalus laiko masteliu:

$$Fo = (a_0 / R_0^2) \cdot \tau; \quad (3.25)$$

Realaus laiko ir Universalaus Furje laiko mastelių tarpusavio ryšio  $a_0 / R_0^2$  parametras apibrėžiamas temperatūros laidumo  $a_0$  koeficientą parinkus 278 K temperatūros vandeniui [17].

Numatoma kontrolinė modeliujama lašelio fazinių virsmų  $Fo_i$  trukmė ir apibrėžiami tarpiniai kontroliniai  $Fo_i$ , tenkinant sąlygą:

$$\sum_{i=2}^I (Fo_i - Fo_{i-1}) = Fo_I; \quad (3.26)$$

Kiekvienam  $Fo_i$  vykdomas iteracinis  $it \equiv 1 \div IT$  ciklas, kuriame apibrėžiama šylančio lašelio paviršiaus momentinė  $T_{R,i}$  temperatūra, kuriai keliamas reikalavimas  $IT$ -oje iteracijoje užtikrinti šilumos srautų balanso lašelio paviršiuje sąlygą:

$$\left[ 1 - \frac{q_{c,l,i,it=IT} - q_{f,l,i,it=IT}}{q_{c,d,i,it=IT}} \right] \times 100\% < 0.05\%; \quad (3.27)$$

Iteraciniame cikle  $it$ -oje iteracijoje šilumos srautams pagal (3.21-3.27) modelį apibrėžti reikalingas, bet dar nežinomas lašelio  $R_{i,it}$  matmuo, prilyginamas ankstesnėje iteracijoje jau apibrėžtam lašelio  $R_{i,it-1}$  matmeniui. Prielaida  $R_{i,it} \equiv R_{i,it-1}$  taikoma ir lašelio nestacionariojo temperatūros lauko gradientui apibrėžti pagal sudėtinio šilumos plitimo laidumu ir spinduliavimu šilumokaitos lašelyje modelį [19], jam pritaikius  $q_{r,i} = 0$  sąlygą. Lašelio matmuo patikslinamos po kiekvieno iteracinio ciklo skaitiškai pagal lašelio  $M_l$  masės kitimo lygtį, jai pritaikius lašelio sferiškumo  $M_l = 4\pi R^3 \rho_l / 3$  atvejui:

$$\frac{dM_l(\tau)}{d\tau} = -g_{g,p}; \rightarrow \frac{dR^3(\tau)}{d\tau} = -3g_{g,p} - R^3 \frac{d\rho_l(\tau)}{d\tau}; \quad (3.28)$$

Sumodeliuoti  $T_0 = 273$  K temperatūros vandens lašelių šilimas ir faziniai virsmai biokuro  $T_d = 370; 400; 470; 570$  K temperatūros vidutinio ( $\bar{p}_{g,d} = 0.25$ ) drėgnumo dūmuose silpno ( $Re_0 = 5$ ), vidutinio ( $Re_0 = 15$ ) ir stipraus ( $Re_0 = 45$ ) lašelio slydimo, esant lašelių dispersiškumui  $R = 75; 100; 125 \mu m$  dūmų sraute atvejais. Visais modeliuotais atvejais buvo užtikrinta  $T_0 < T_n$  sąlyga, todėl buvo apibrėžti kondensacinis, pereinamojo garavimo ir pusiausviro garavimo režimai.

### 3.4.2 Atskiro lašelio, išpurškiamo į dūmų srautą, modeliuto atvejo apžvalga.

Pirmiausia, išnagrinėkime, kai modeliujamas atvejis, esant tokioms kraštinėms sąlygoms:

Vandens temperatūra:  $T_0 = 278$  K;

Dūmų temperatūra:  $T_d=470\text{K}$ ;

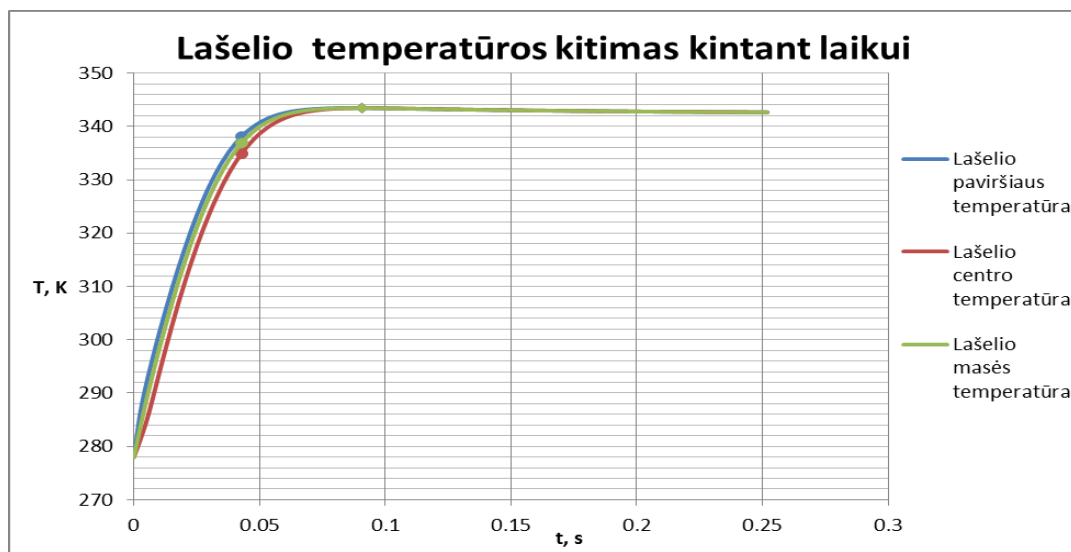
Dūmų drėgnumas:  $p_{g,d}= 0,25$ ;

Reinoldso kriterijus:  $Re=15$ ;

Lašelio skersmuo:  $R=75\mu\text{m}$ .

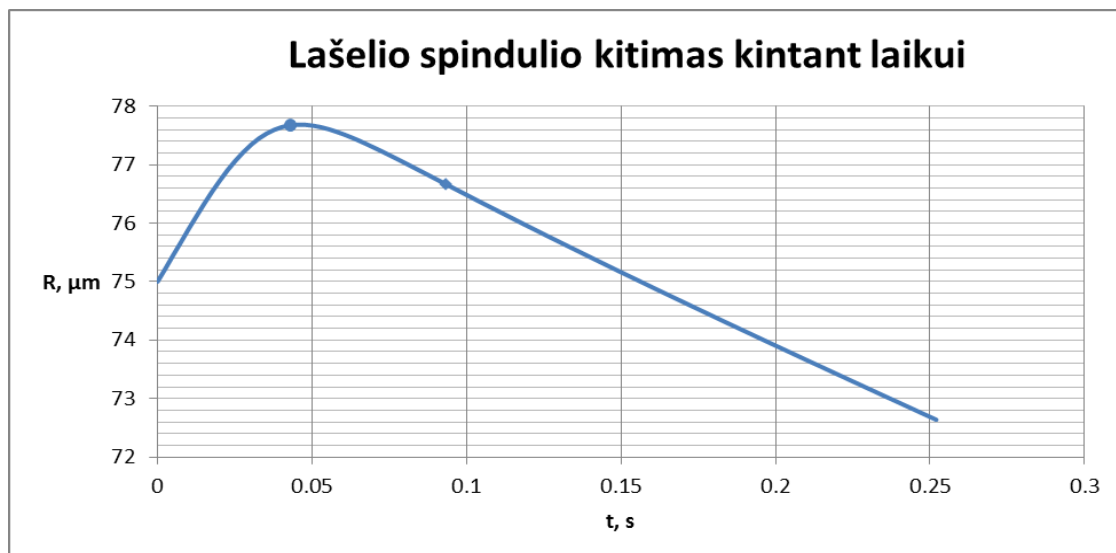
Šio modeliavimo rezultatai yra pateikti 1 priede. Panagrinėkime įvairius parametrus grafiškai.

3.7 paveiksle pateiktas lašelio centro, paviršiaus ir masės temperatūros kitimas. Šis grafikas rodo lašelio paviršiaus centro ir masės vidutinės temperatūrų kitimą pereinamųjų fazinių virsmų režime.



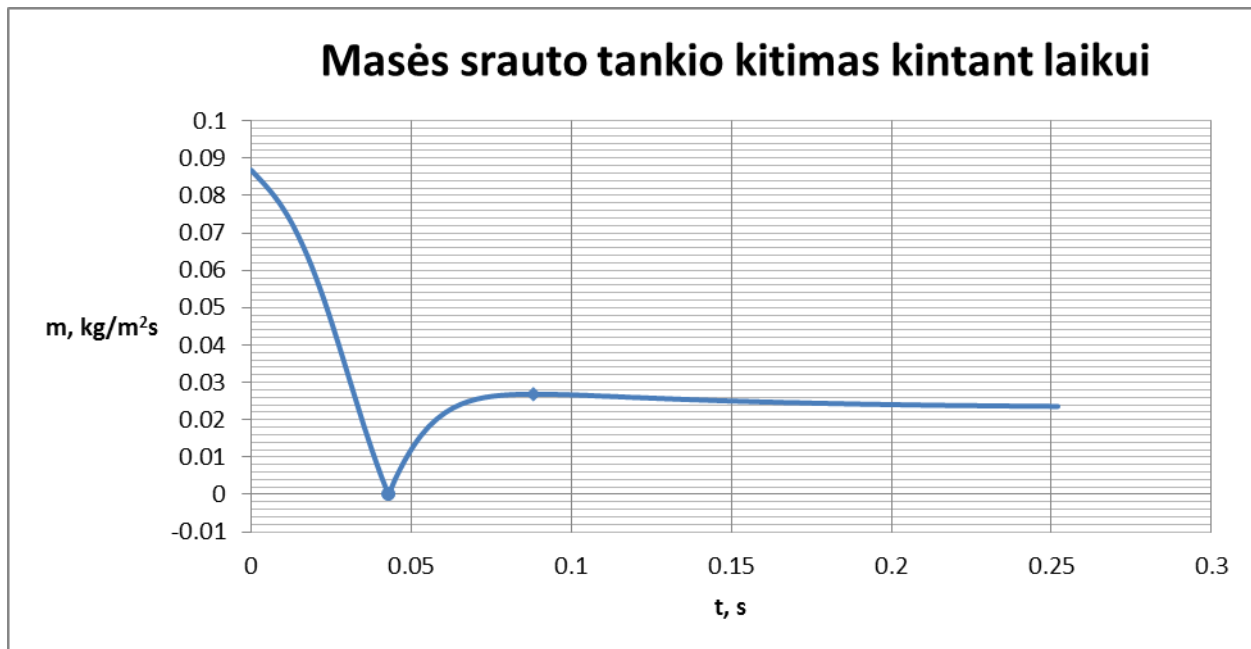
**3.8 pav. Lašelio temperatūros kitimas, kai  $T_0=278\text{K}$ ,  $T_d=470\text{K}$ ,  $p_{g,d}=0,25$ ,  $Re=15$ ,  $R=75\mu\text{m}$ .**

Šiame paveiksle kondensacinio režimo pabaiga yra žymima rutuliuku, o nestacionariojo garavimo pabaiga žymima rombu. Turbūt nenuostabu, kad lašelio paviršius šyla greičiau nei lašelio centras ar visa lašelio masė. Maždaug nuo nestacionariojo garavimo pabaigos, t.y. prasidedant pusiausvirajam garavimui, lašelio paviršiaus, centro ir masės temperatūra tampa vienoda ir po truputį mažėja.



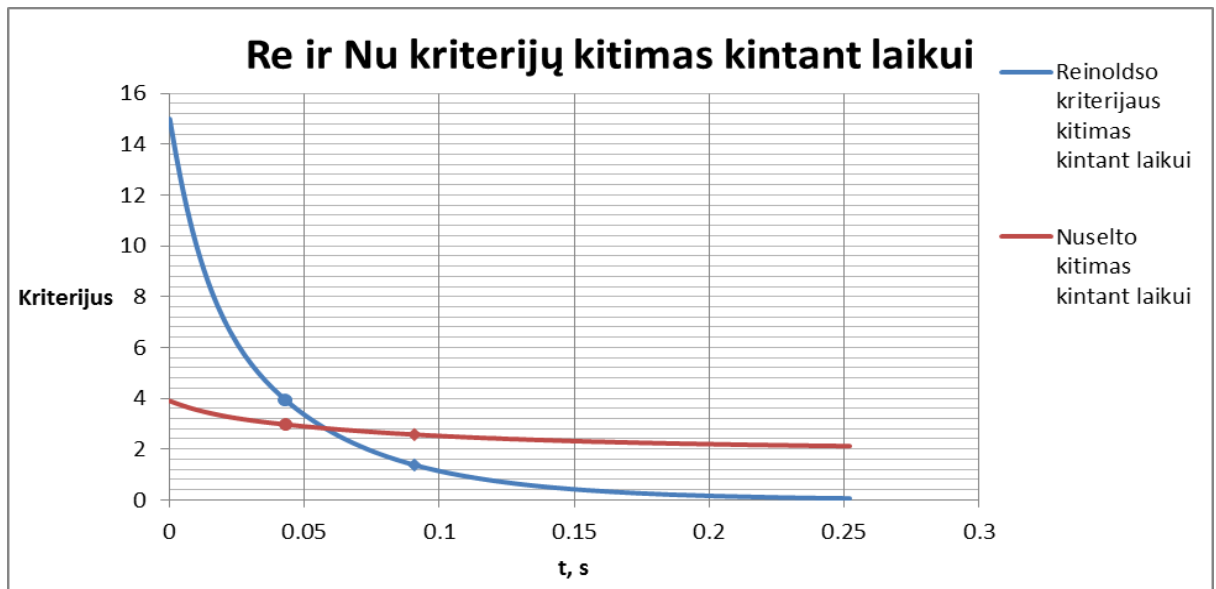
**3.9 pav. Lašelio spindulio kitimas, kai  $T_0=278\text{K}$ ,  $T_d=470\text{K}$ ,  $p_{g,d.}=0,25$ ,  $Re=15$ ,  $R=75\mu\text{m}$ .**

Kaip matome 3.8 paveiksle, lašelio spindulys esant kondensaciniam režimui auga, pasiekia piką esant laikui  $\tau_{KO}$ , vėliau visą laiką mažėja, nuo pusiausvirojo garavimo pradžios lašelio spindulys mažėja tiesiškai. Įdomus faktas, kad lašelio spindulys pasiekia pradinį dydį praėjus net 0,156s nuo išpurškimo pradžios.

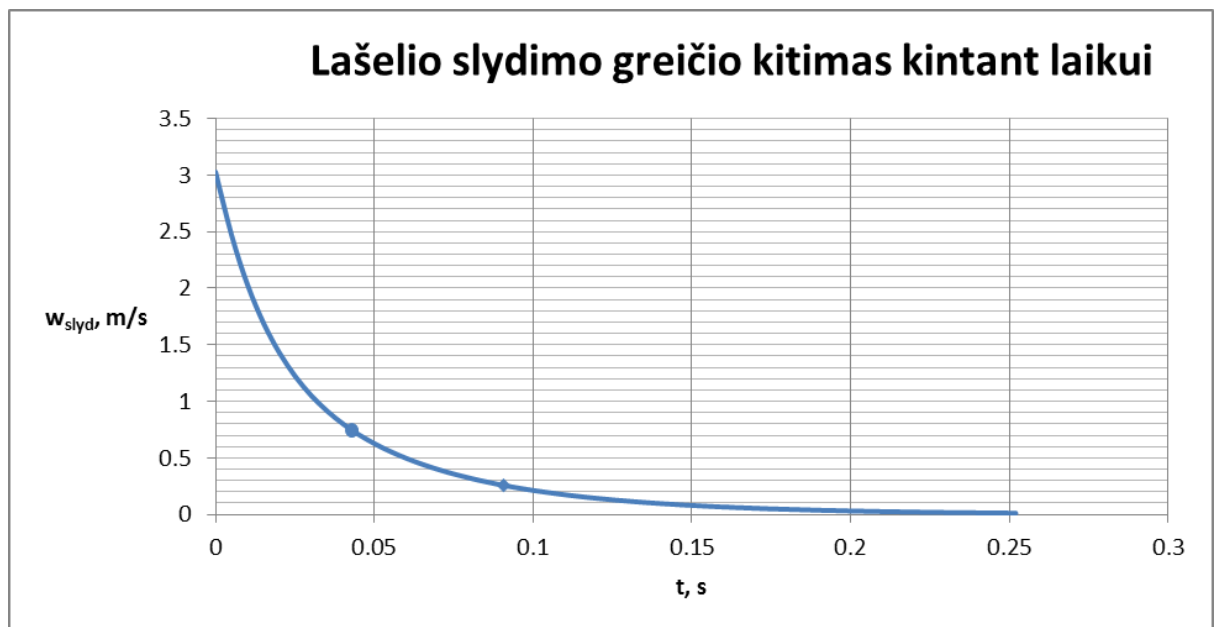


**3.10 pav. Masės srauto tankio kitimas, kai  $T_0=278\text{K}$ ,  $T_d=470\text{K}$ ,  $p_{g,d.}=0,25$ ,  $Re=15$ ,  $R=75\mu\text{m}$ .**

Masės srauto tankio grafikas (3.9 pav.) rodo, kad esant kondensaciniam režimui, lašelio masės srauto tankis mažėja iki kol pasiekia reikšmę lygią nuliui. Iki tol visa lašeliui teikiama energija patenka į lašelio vidų. Prasidėjus nestacionariojo garavimo režimui (grafike už burbuliuko iki rombo), masės srauto tankis vėl auga tik iki jau mažesnės reikšmės, o jo augimas laikinai nusistovi iki prasidedant pusiausviram garavimui. Esant pusiausvirajam garavimui masės srauto tankis po truputėlį mažėja (tikėtina vėliau pradės augti, kai lašelis dėl garavimo pradės sparčiai mažėti ir jo plotas taip pat mažės).

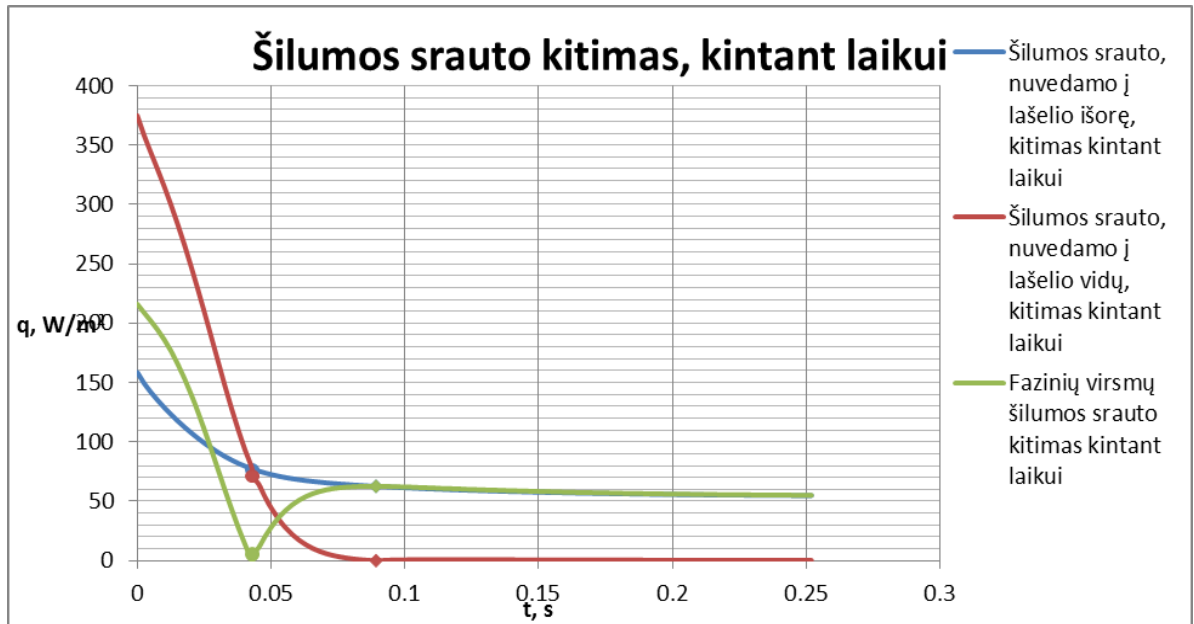


3.11 pav. Re ir Nu kriterijų kitimas, kai  $T_0=278\text{K}$ ,  $T_d=470\text{K}$ ,  $p_{g,d}=0,25$ ,  $Re=15$ ,  $R=75\mu\text{m}$ .



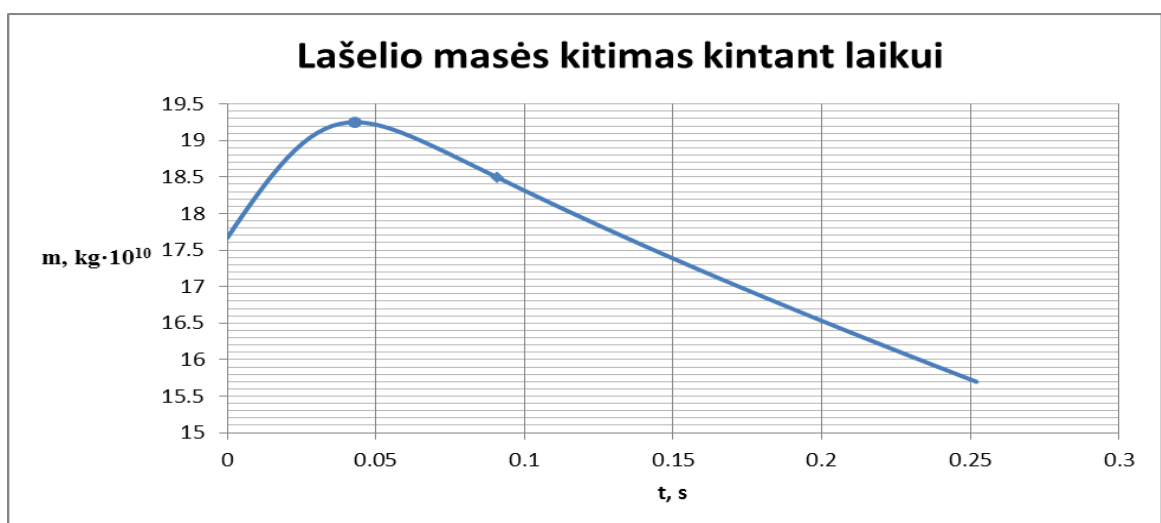
3.12 pav. Lašelio slydimo greičio kitimas, kai  $T_0=278\text{K}$ ,  $T_d=470\text{K}$ ,  $p_{g,d}=0,25$ ,  $Re=15$ ,  $R=75\mu\text{m}$ .

Nagrinėjant 3.10 paveikslą, matomas Reinoldso ir Nuselto kriterijų mažėjimas. Reinoldso kriterijus yra tiesiogiai susijęs su lašelio slydimu, taigi nieko keisto, kad 3.11 paveiksle pateiktame lašelio slydimo greičio kitimo grafike matome beveik identišką kreivę. Lašelio slydimas, taigi ir Reinoldso kriterijus lašelio gyvavimo laike mažėja, kol tampa lygus nuliui.



**3.13 pav. Šilumos srauto kitimas, kai  $T_0=278K$ ,  $T_d=470K$ ,  $p_{g,d}=0,25$ ,  $Re=15$ ,  $R=75\mu m$ .**

Nagrinėjant šilumos srautų kreives 3.12 paveiksle aiškiai matome, kad esant kondensaciniam režimui, šilumos srautas, nuvedamas į lašelio vidų, yra šilumos srauto, nuvedamo į lašelio išorę ir fazinių virsmų šilumos srauto suma. Esant laikui  $\tau_{KO}$  fazinių virsmų šilumos srautas yra lygus nuliui, o šilumos srautas nuvedamas į lašelio vidų yra lygus šilumos srautui, nuvedamam į lašelio išorę. Nestacionariojo garavimo režime šilumos srautas, nuvedamas į lašelio vidų ( $q^+$ ) mažėja, kol esant laikui  $\tau_e$ , tampa lygus nuliui. Tuo metu fazinių virsmų šilumos srautas didėja ir esant laikui  $\tau_e$  yra apie  $62,6W/m^2$ . Šilumos srautas, nuvedamas į lašelio išorę mažėja, o laikui  $\tau_e$  yra lygus fazinių virsmų šilumos srautui, t.y.  $62,6 W/m^2$ . Esant pusiausvirajam garavimui šilumos srautas, nuvedamas į lašelio vidų yra lygus nuliui, o fazinių virsmų šilumos srautas yra lygus šilumos srautui, nuvedamui į lašelio išorę.



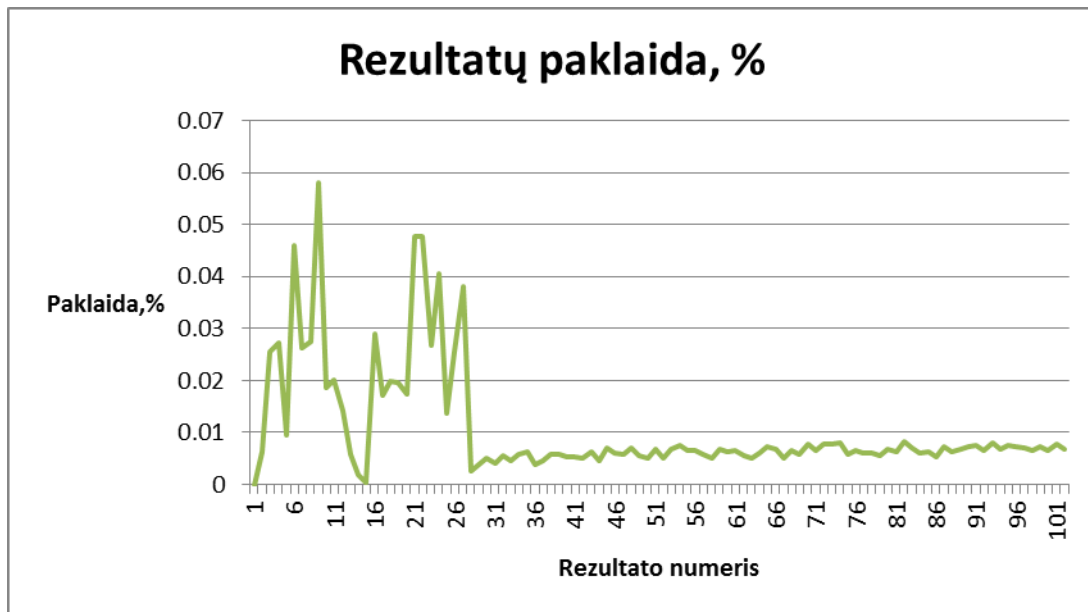
**3.14 pav. Lašelio masės kitimas, kai  $T_0=278K$ ,  $T_d=470K$ ,  $p_{g,d}=0,25$ ,  $Re=15$ ,  $R=75\mu m$ .**



Drėgnuose dūmuose šylančio lašelio masės kitimą lemia skysčio garo srautas jo paviršiuje [20]. Tai iliustruoja 12 formulė:

$$\frac{dM_l(\tau)}{d\tau} = -g_{g,p}; \quad (3.29)$$

3.13 paveikslėlyje matyti, kad esant kondensaciniam procesui lašelio masė išauga, visai, kaip ir vandens garo srauto tankis  $g$ , žr. 1 priede 14 stulpelyje. Kai laikas yra lygus  $\tau_{KO}$ , lašelio masė pasiekia maksimalią reikšmę, o nestacionariojo ir pusiausvirojo garavimo režimų metu tik mažėja.



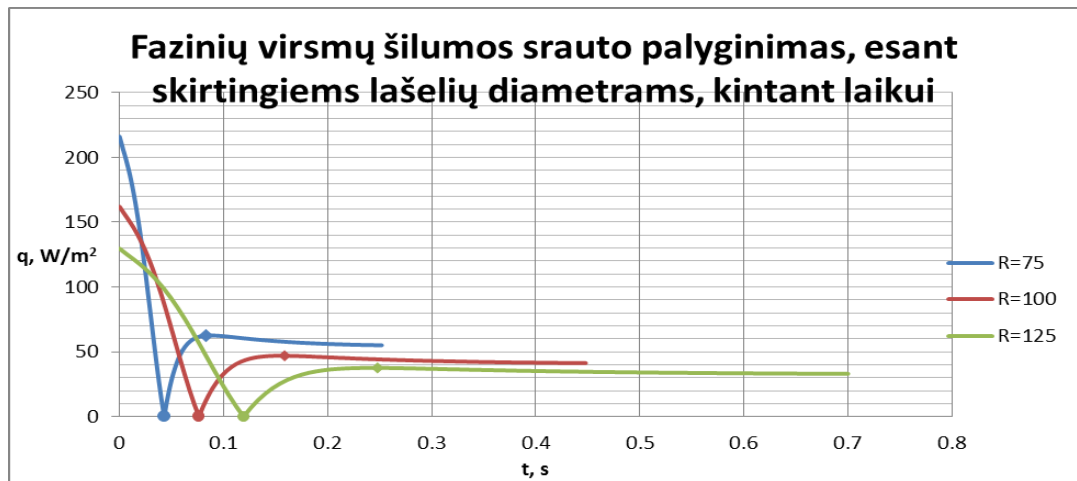
### 3.15 pav. Rezultatų paklaida, kai $T_0=278K$ , $T_d=470K$ , $p_{g,d}=0,25$ , $Re=15$ , $R=75\mu m$ .

Šis modeliavimas buvo atliktas labai tiksliai. 3.14 pav. matome, kad didžiausia apskaičiuotųjų šilumos srautų neatitikimo (skaičiavimo) paklaida yra 0,058186%, o mažiausia- 0,000322%. Iš 102 reikšmių vos 14- os rezultatų paklaida yra didesnė nei 0,02%, kas yra labai mažas dydis.

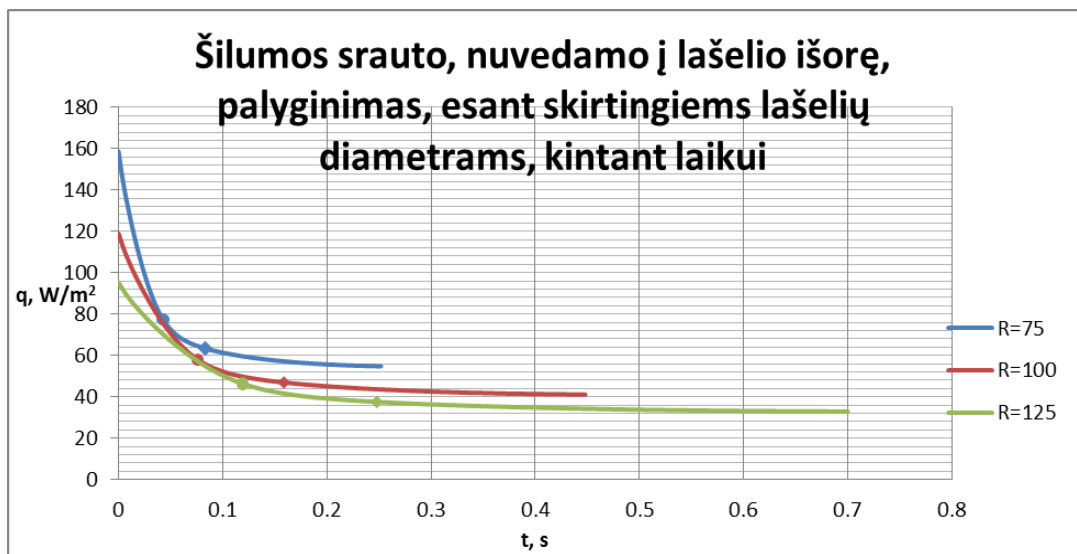
### 3.4.3 Modeliuojamų rezultatų palyginimas, keičiant vieną kraštinę sąlygą.

#### 3.4.3.1 Modeliuojamų rezultatų palyginimas, keičiant lašelio spindulį.

Palyginkime modeliavimo rezultatus, kuomet kraštinės sąlygos esti vienodos (vandens temperatūra 278K, dūmų temperatūra 470K, dūmų drėgnumas 0,25, Reinoldso kriterijus 15), su skirtingais lašelio spinduliais ( $R=75, 100, 125\mu m$ ).



a



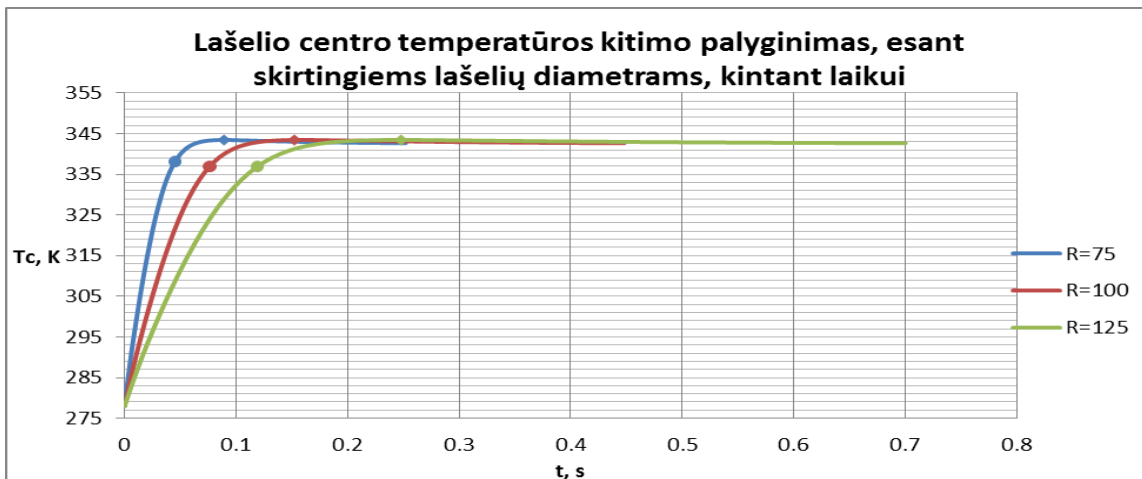
b



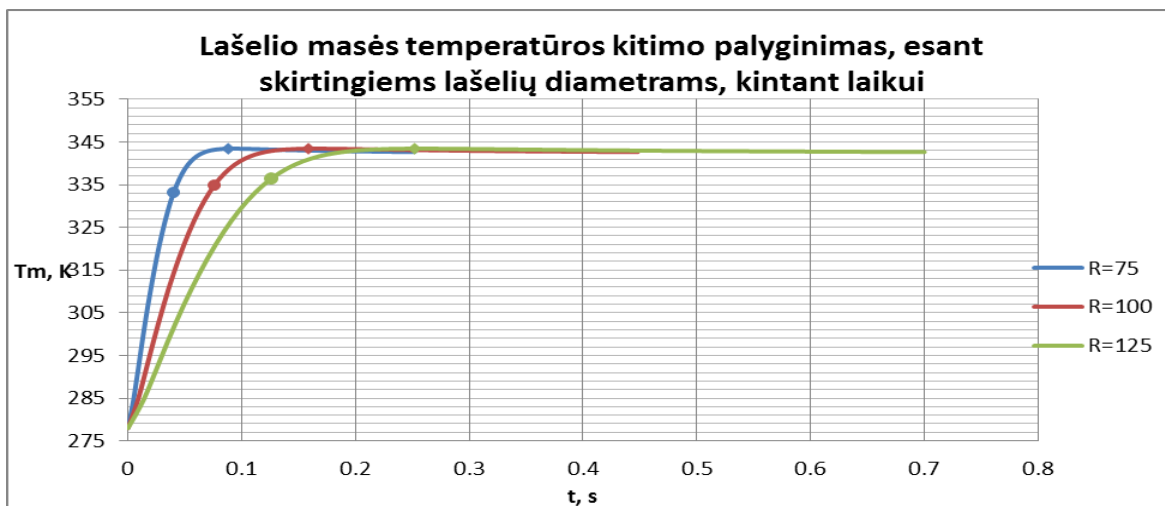
c

3.16 pav. Šilumos srautų palyginimas keičiant lašelio spindulį, a- fazinių virsmų, b- nuvedamo į lašelio išorę, c- nuvedamo į lašelio vidų, kai  $T_0=278\text{K}$ ,  $T_d=470\text{K}$ ,  $p_{g,d}=0,25$ ,  $Re=15$ ,  $R=75, 100, 125\mu\text{m}$ .

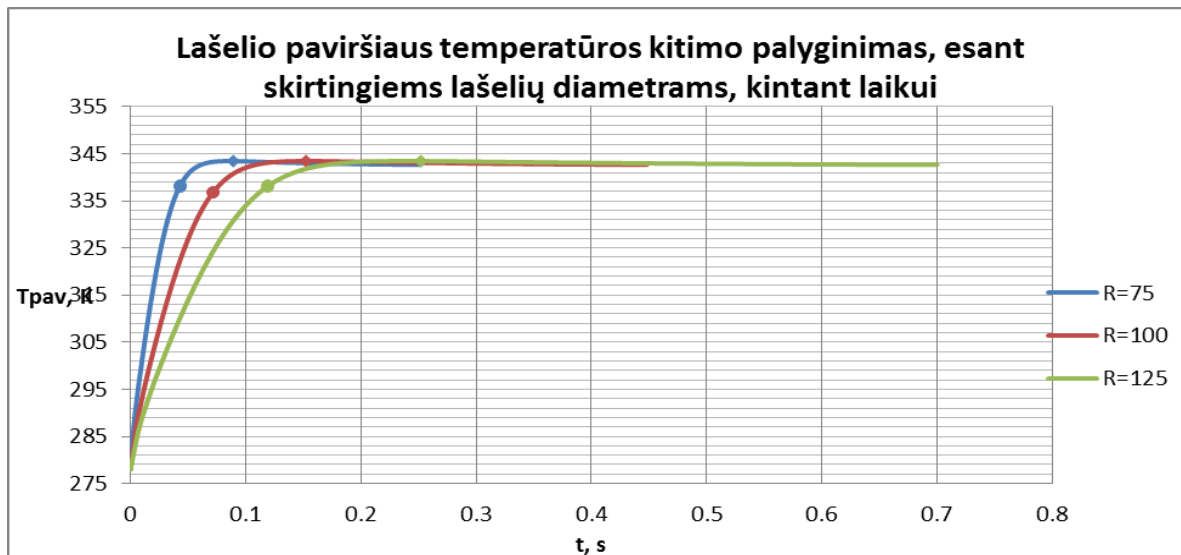
3.15 paveiksle pavaizduoti šilumos srautai, esant lašelio spinduliui 75, 100 ir 125 $\mu$ m. Pirmiausia panagrinėkime fazinių virsmų šilumos srautus (3.15 pav. a). Kuo lašelis yra didesnis, tuo procesai vyksta ilgiau. Tačiau fazinių virsmų šilumos srautą intensyviausią „atsineša“ lašelis, kurio spindulys yra mažiausias. 3.15 pav. b rodomas šilumos srautas, nuvedamas į lašelio vidų taip pat procesų pradžioje yra didžiausias, kuomet lašelis yra mažiausias, o procesai vyksta greičiau. 3.15 pav. c matome, kad šilumos srautas, nuvedamas į lašelio vidų esant kuo mažesniai lašeliui staigiau tiesiškai mažėja, pasiekęs laiką  $\tau_{KO}$  nebe taip staigiai mažėja, bet mažėja, kol pasiekęs laiką  $\tau_e$ , tampa lygus nuliui.



a



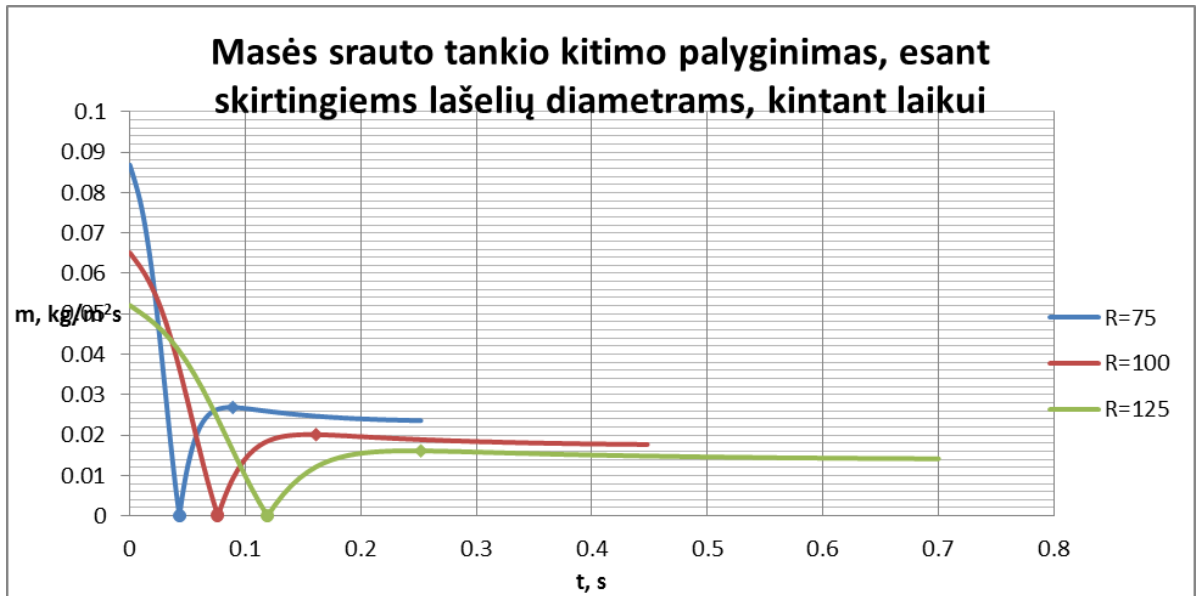
b



c

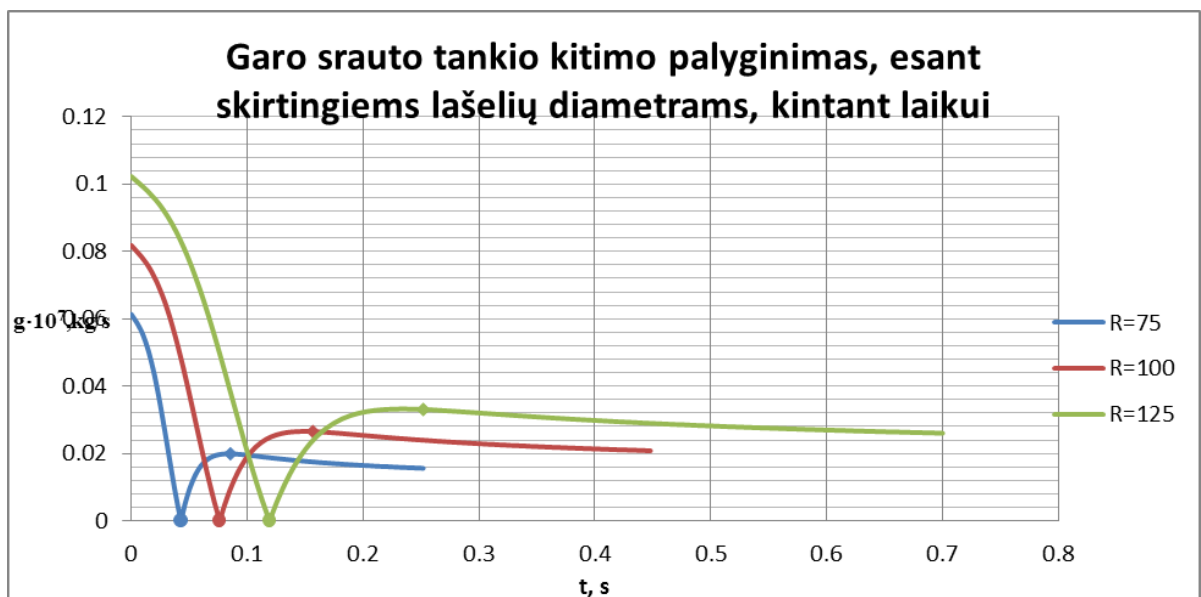
**3.17 pav. Lašelio temperatūros kitimo palyginimas keičiant lašelio spindulį, a-lašelio centro temperatūros, b- lašelio masės temperatūros, c- lašelio paviršiaus temperatūros, kai  $T_0=278\text{K}$ ,  $T_d=470\text{K}$ ,  $p_{g,d}=0,25$ ,  $Re=15$ ,  $R=75, 100, 125\mu\text{m}$ .**

3.16 paveiksle pavaizduotas lašelio temperatūros kitimas. Lašelio paviršiaus temperatūra kyla šiek tiek staigiau nei lašelio centro ar masės temperatūra, tačiau priklausomybė esti beveik vienoda. Esant lašelio spinduliui  $75\mu\text{m}$ , kondensacinis procesas pasibaigia esant laikui apie  $0.0429\text{s}$ , tuo metu temperatūra būna išaugusi iki  $338,15\text{K}$  lašelio paviršiuje,  $334,977\text{K}$  lašelio centre ir  $336,937\text{K}$  visos lašelio masės. Kai lašelio spindulys yra  $100\mu\text{m}$ , kondensacinis procesas pasibaigia, kai  $\tau_{KO}=0.076\text{s}$ , tuo metu temperatūra lašelio paviršiuje būna pasiekusi  $338,15\text{K}$ , lašelio centre ji būna  $334,98\text{K}$ , o lašelio masės temperatūra siekia  $336,94\text{K}$ . Kai lašelio spindulys yra  $125\mu\text{m}$ , kondensacinis procesas baigiasi esant laikui  $0,119\text{s}$ . Lašelio paviršiaus temperatūra tuo metu būna  $338,15\text{K}$ , centro  $334,98$ , o masės  $336,94$ . Lygiai tokiu pačiu principu galima būtų surašyti lašelių su skirtingu spinduliu reikšmes, nestacionariojo garavimo pabaigoje. Taigi, esant laikui  $\tau_c$ , nesvarbu, koks lašelio spindulys, jo temperatūra paviršiuje yra  $343,4498\text{K}$ , centre  $343,4386\text{K}$ , o lašelio masės temperatūra yra lygi  $343,4475\text{K}$ .



**3.18 pav. Masės srauto tankio kitimo palyginimas keičiant lašelio spindulį, kai  $T_0=278\text{K}$ ,  $T_d=470\text{K}$ ,  $p_{g,d.}=0,25$ ,  $Re=15$ ,  $R=75, 100, 125\mu\text{m}$ .**

Žvelgiant į masės srauto tankio palyginimą esant skirtingiems lašelių dydžiams (3.17 pav.), matoma, kad kuo lašelis yra mažesnis, tuo masės srauto tankis procesų pradžioje yra didesnis ir staigiau mažėja kondensacinio proceso pabaigoje pasiekdamas reikšmę lygią nuliui. Esant nestacionariojo garavimo procesui, mažesnio lašelio masės srauto tankis staigiau auga, o pusiausvirojo garavimo pradžioje turi didžiausią reikšmę lyginant su lašeliais, kurių spindulys 100 ir  $125\mu\text{m}$ .

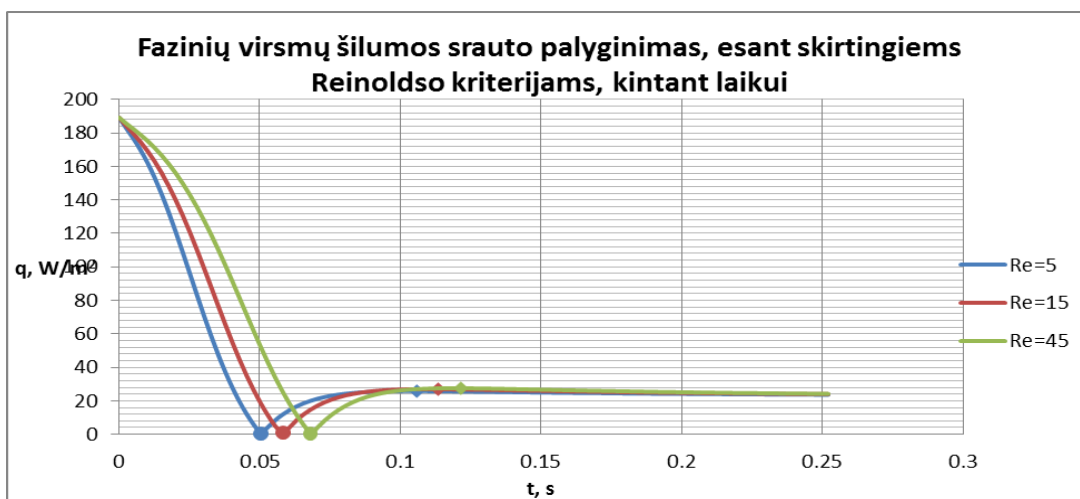


**3.19 pav. Garo srauto tankio kitimo palyginimas keičiant lašelio spindulį, kai  $T_0=278\text{K}$ ,  $T_d=470\text{K}$ ,  $p_{g,d.}=0,25$ ,  $Re=15$ ,  $R=75, 100, 125\mu\text{m}$ .**

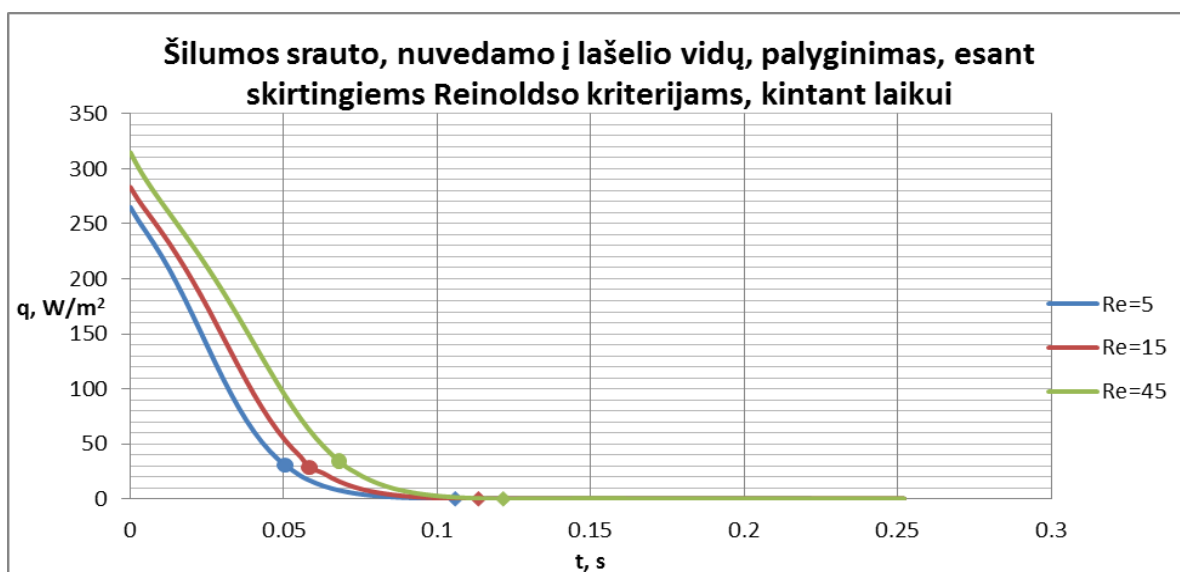
Kitaip nei masės srauto tankis, garo srauto tankis procesų pradžioje yra didesnis to lašelio, kurio spindulys yra didesnis. Kondensacinio proceso pabaigoje garo srauto tankis yra lygus nuliui ir nestacionariojo garavimo režime auga iki laiko  $\tau_c$ . Čia didžiausią garo srauto tankį turi lašelis, kuris ir procesų pradžioje turėjo didžiausią garo srauto tankį, šiuo atveju, kai  $R=125\mu\text{m}$ . Tai reiškia, kad labiausiai masė kinta to lašelio, kurio ir garo srauto tankis kinta labiausiai.

### 3.4.3.2 Modeliuojamų rezultatų palyginimas, keičiant Re kriterijų.

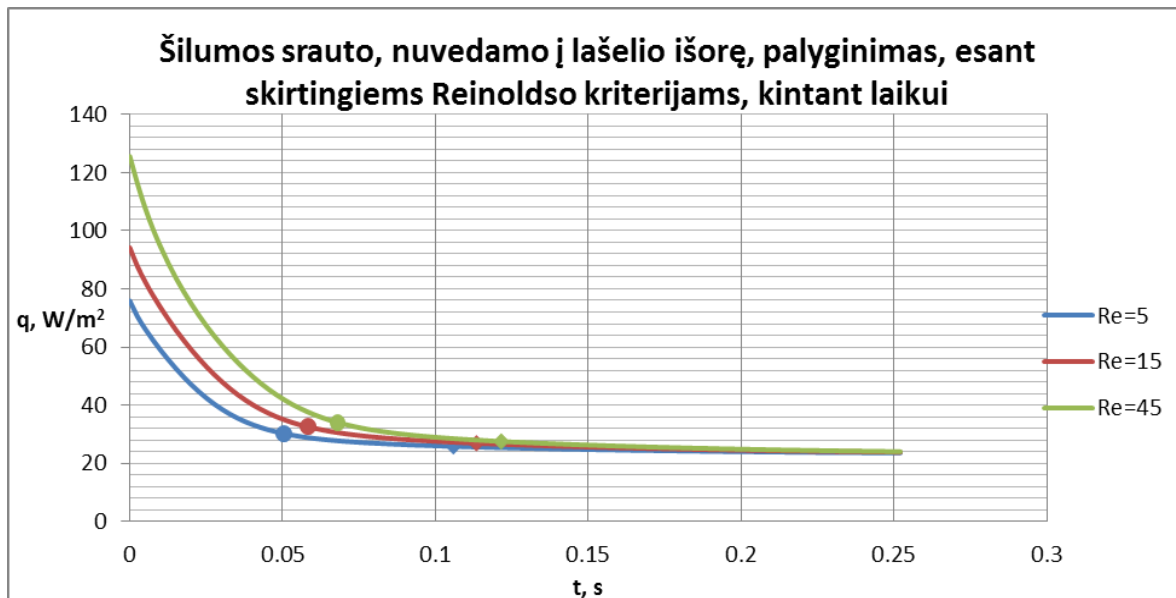
Palyginkime modeliavimo rezultatus, kuomet kraštinės sąlygos esti vienodos (vandens temperatūra 278K, dūmų temperatūra 400K, dūmų drėgnumas 0,25, lašelio spindulys  $R=75\mu\text{m}$ ), tačiau keičiame Re kriterijų ( $Re=5, 15, 45$ ). Modeliavimo rezultatų skaitinių reikšmių į darbą nekelsiu, kadangi jų yra labai daug ir reikėtų labai įsigilinti. Naudingiau yra pateikti modeliavimo rezultatus grafine forma, būtent taip ir padarysiu.



a



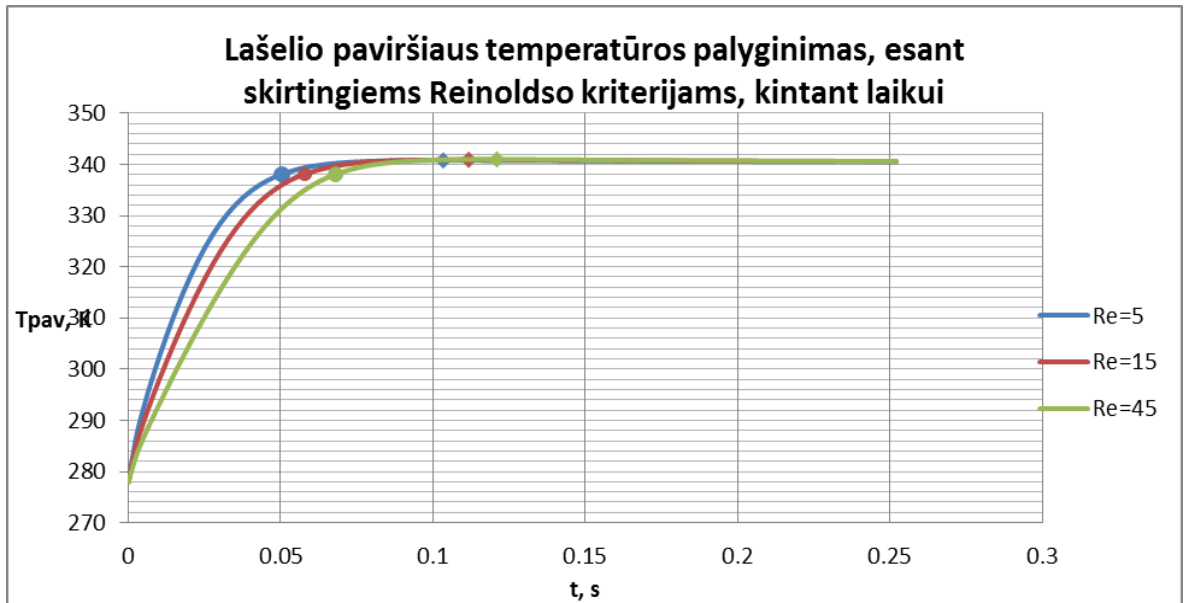
b



c

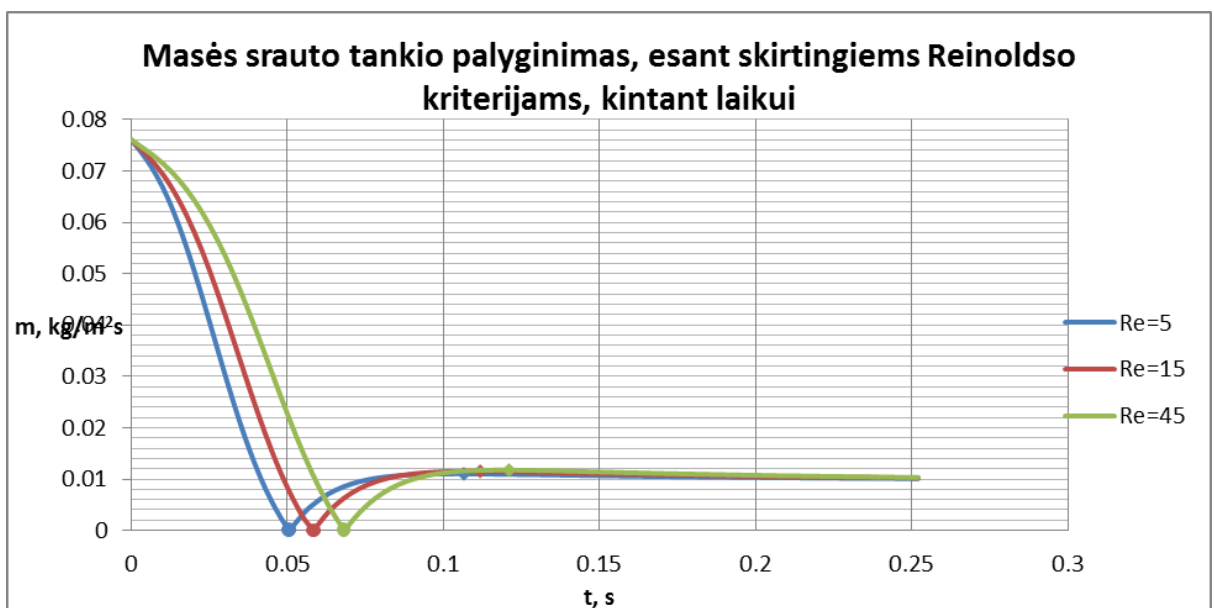
**3.20 pav. Šilumos srautų palyginimas keičiant Re, a- fazinių virsmų, b- nuvedamo į lašelio vidų, c- nuvedamo į lašelio išorę, kai  $T_0=278K$ ,  $T_d=470K$ ,  $p_{g.d.}=0,25$ ,  $Re=5, 15, 45$ ,  $R=75\mu m$ .**

Išanalizavus 3.19 paveikslą, galime daryti išvadą, kad esant kuo didesniai Re kriterijai, šilumos srautai bus vis didesni, tačiau procesai vyks ilgiau. Kaip matome a dalyje, fazinių virsmų šilumos srautas procesų pradžioje, koks bebūtų Re kriterijus, yra vienodas ir lygus  $189,23W/m^2$ , pasibaigus kondensaciniam procesui, reikšmės taip pat yra vienodos ir lygios nuliui, tačiau skirtingu laiku baigiasi pats procesas. Kondensacinis ir kiti procesai įvyksta greičiausiai, kai  $Re=5$ . Šilumos srautas, nuvedamas į lašelio išorę, esant skirtingiems Re kriterijams, kinta, t.y. mažėja lygiagrečiai. Kaip matome 3.19 pav. b dalyje, žalia, raudona ir mėlyna kreivės yra praktiškai lygiagrečios. Esant nestacionariojo garavimo režimui reikšmės tarp skirtingų Re kriterijų artėja, kol procesui pasibaigus pasiekia 0. Šilumos srauto, nuvedamo į lašelio išorę reikšmės labiausiai skiriasi procesų pradžioje, o bėgant laikui kreivės vis artėja viena prie kitos.



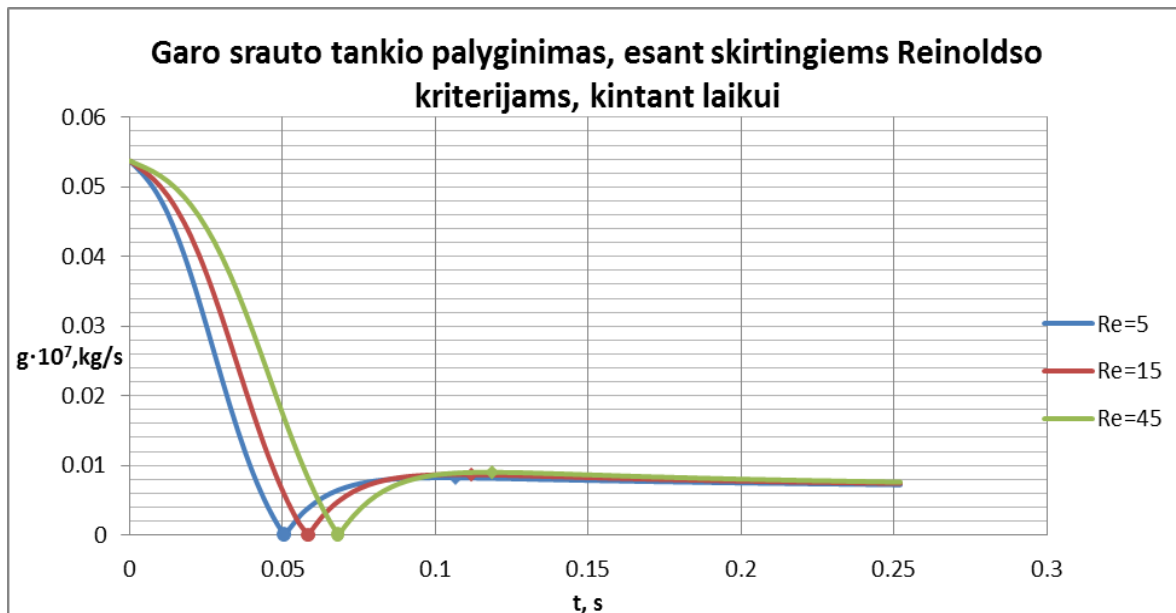
**3.21 pav. Lašelio paviršiaus temperatūros palyginimas keičiant Re, kai  $T_0=278\text{K}$ ,  $T_d=470\text{K}$ ,  $\rho_{g,d}=0,25$ ,  $\text{Re}=5, 15, 45$ ,  $R=75\mu\text{m}$ .**

Kitaip nei lyginant lašelius su skirtingais spinduliais (3.16 pav. c), esant skirtingiems Re kriterijams, lašelio paviršiaus temperatūros kreivės kintant laikui yra nuožulnesnės ir ne taip staigiai kyla. Esant kondensaciniam procesui aukščiausiai yra mėlyna kreivė, kuri nurodo paviršiaus temperatūrą, kai  $\text{Re}=5$ . Taigi, aukščiausia paviršiaus temperatūra kondensacinio ir nestacionariojo garavimo procesu metu yra lašelio, kurio Re yra mažiausias. Taip pat yra ir su lašelio centro temperatūra ir lašelio masės temperatūra tik jos yra šiek tiek mažesnės, nes sunkiau yra pašildyti visą lašelį ar pašildyti lašelį iki jo centro, tačiau kreivės būtų praktiškai tokios pačios tik šiek tiek žemiau.



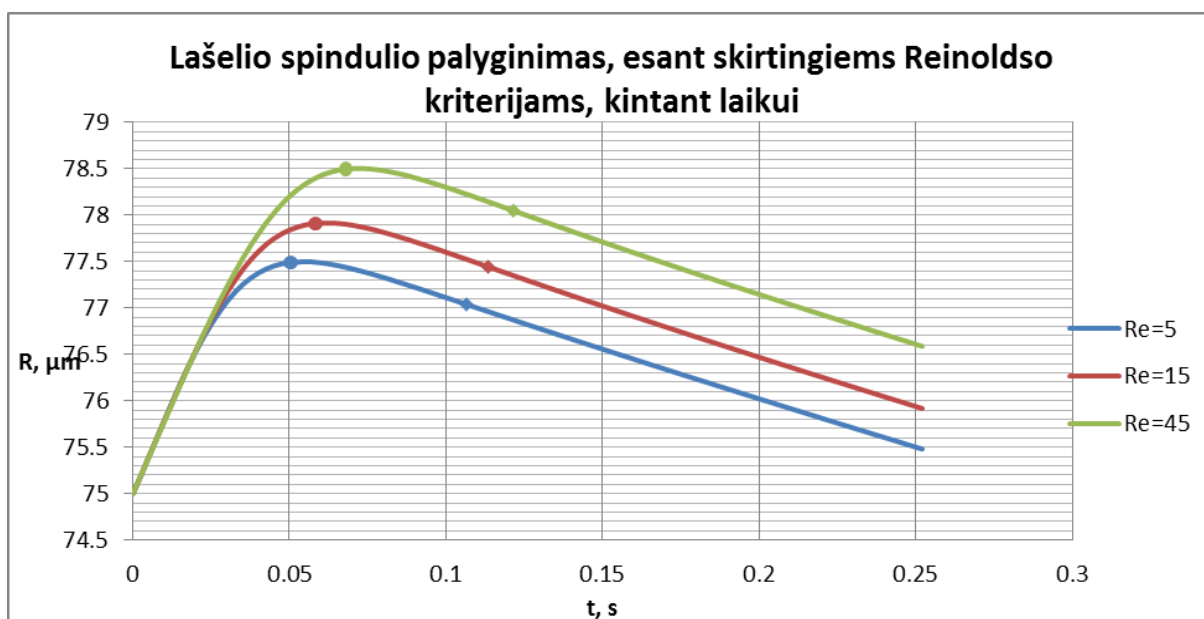
**3.22 pav. Lašelio masės srauto tankio palyginimas keičiant Re, kai  $T_0=278\text{K}$ ,  $T_d=470\text{K}$ ,  $\rho_{g,d}=0,25$ ,  $\text{Re}=5, 15, 45$ ,  $R=75\mu\text{m}$ .**





**3.23 pav. Lašelio garo srauto tankio palyginimas keičiant Re, kai  $T_0=278\text{K}$ ,  $T_d=470\text{K}$ ,  $p_{g,d}=0,25$ ,  $Re=5, 15, 45$ ,  $R=75\mu\text{m}$ .**

Lašelio masės srauto tankio kitimas prie skirtingų Reinoldso kriterijų grafiškai labai panašus į lašelio garo srauto tankio kitimą prie skirtingų Reinoldso kriterijų (3.21 ir 3.22 pav.). Aukščiausia kreivė ir masės srauto tankio, ir garo srauto tankio, yra esant didžiausiam Re kriterijui (šiuo atveju  $Re=45$ ). Vadinasi, intensyviausiai lašelis garuoja, kai Reynoldsas yra didesnis. Tai būdinga esant kondensaciniam procesui, tačiau nestacionariojo garavimo režime viskas apsiverčia ir masės ir garo srautai didesni tampa to lašelio, kurio Re yra mažesnis. Pusiausvirojo garavimo režime reikšmės susilygina.



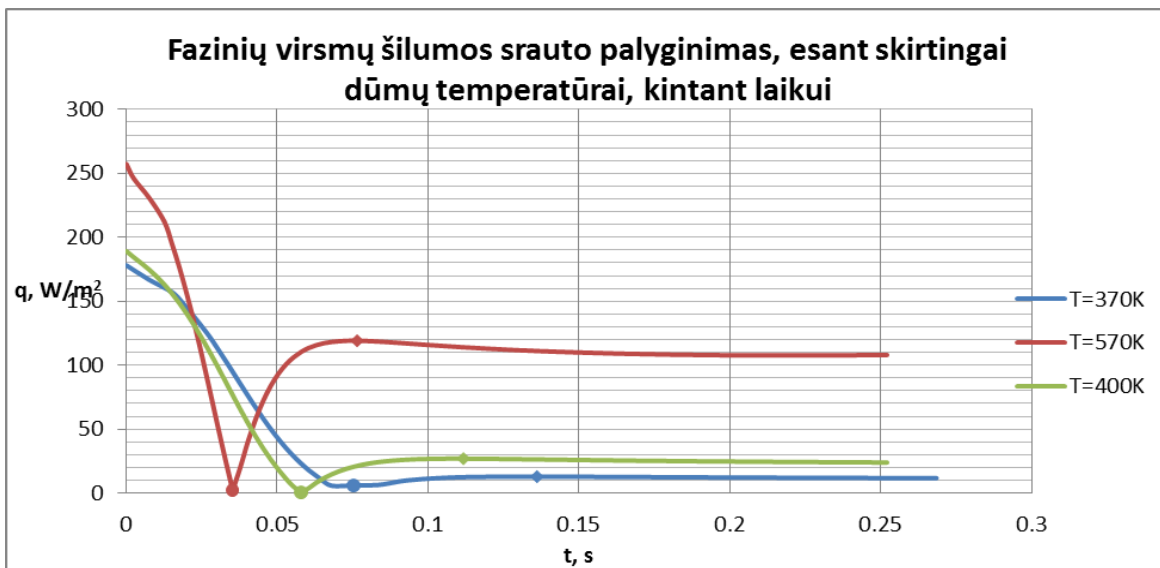
**3.24 pav. Lašelio spindulio palyginimas keičiant Re, kai  $T_0=278\text{K}$ ,  $T_d=470\text{K}$ ,  $p_{g,d}=0,25$ ,  $Re=5, 15, 45$ ,  $R=75\mu\text{m}$ .**

Pradinis lašelio spindulys, nesvarbu, koks Re kriterijus, yra  $75\mu\text{m}$ . Vykstant kondensaciniam procesui, reikšmės apie pusę laiko skiriasi labai neženkliai, o antroje pusėje išsiskiria gana ženkliai.  $\tau_{\text{KO}}$  laike išaugęs skirtumas laikosi ir toliau. Labiausiai išauga spindulys to lašelio, kurio Re yra didžiausias.

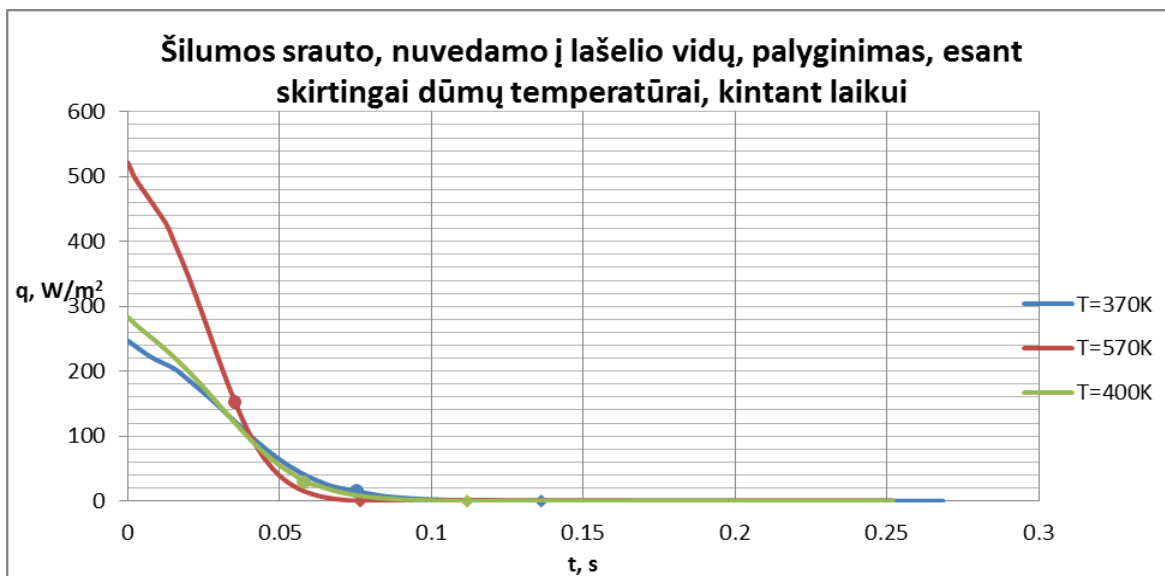
### 3.4.3.3 Modeliuojamų rezultatų palyginimas, keičiant pradinę dūmų temperatūrą.

Palyginkime modeliavimo rezultatus, kuomet kraštinės sąlygos esti vienodos (vandens temperatūra 278K, dūmų drėgnumas 0,25, lašelio spindulys  $R=75\mu\text{m}$ , Reinoldso kriterijus  $Re=15$ ), o dūmų temperatūra imame tris reikšmes- 370, 400, 570K.

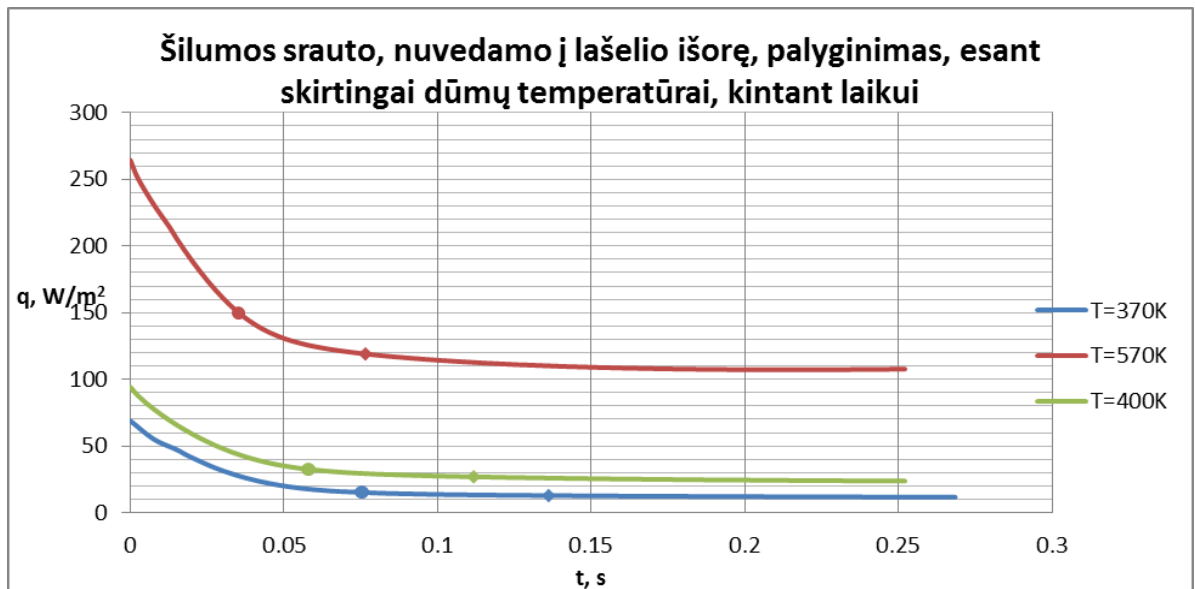
Modeliavimo rezultatus pateiksiu grafine forma, kadangi skaitinių rezultatų yra labai daug ir juos pateikti būtų neracionalu.



a



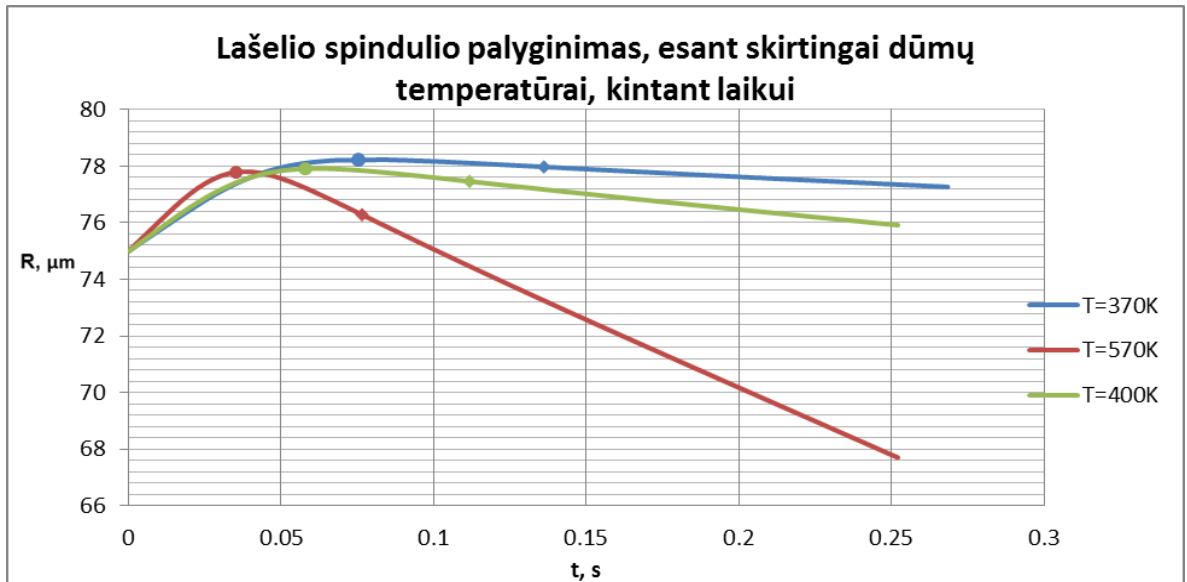
b



c

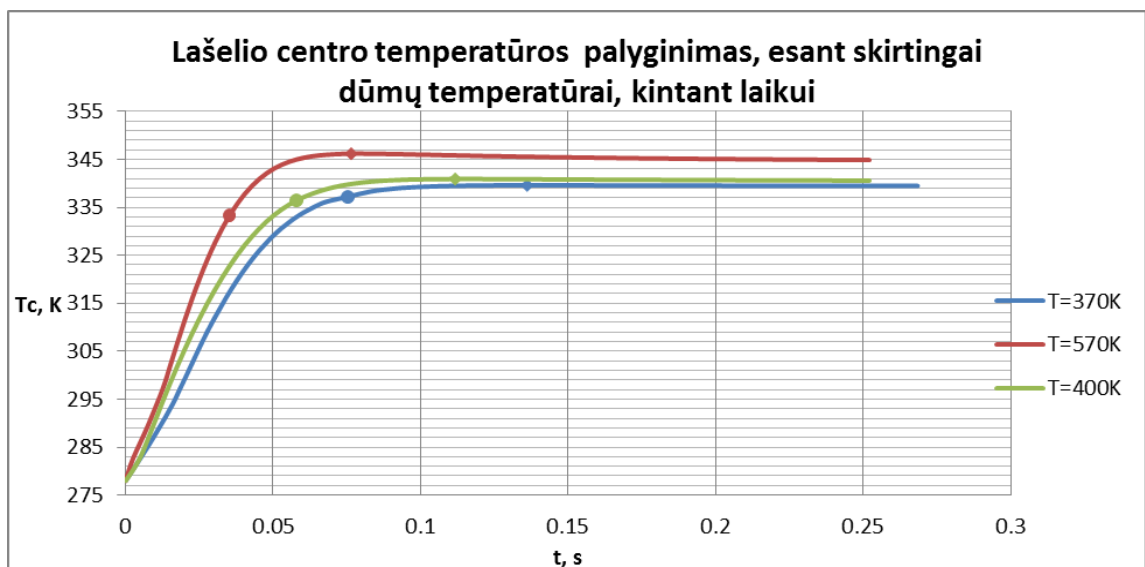
**3.25 pav. Šilumos srautų palyginimas keičiant dūmų temperatūrą, a- fazinių virsmų, b- nuvedamo į lašelio vidų, c- nuvedamo į lašelio išorę, kai  $T_0=278\text{K}$ ,  $T_d=370, 570, 400\text{K}$ ,  $p_{g,d}=0,25$ ,  $Re=15$ ,  $R=75\mu\text{m}$ .**

3.24 paveiksle lyginami šilumos srautai su trimis skirtingomis dūmų temperatūromis. Sumodeliuotos reikšmės skiriasi gana ženkliai. Labiausiai šilumos srautai kinta esant aukščiausiai dūmų temperatūrai, šiuo atveju  $T=570\text{K}$ . Fazinių virsmų šilumos srautas esant dūmų temperatūrai  $570\text{K}$ , prasidedant procesams yra  $257,4\text{W/m}^2$ , tuo metu fazinių virsmų šilumos srautas, kai dūmų temperatūra  $400\text{K}$ , yra  $189,24\text{W/m}^2$ , o esant  $370\text{K}$ , yra  $178,2\text{W/m}^2$ . Kai laikas yra lygus  $\tau_{KO}$ , fazinių virsmų šilumos srautas yra lygus nuliui. Taigi, esant kondensaciniam procesui, didžiausias fazinių virsmų šilumos srauto pokytis yra esant didžiausiai dūmų temperatūrai. Šilumos srautas, nuvedamas į lašelio išorę ir lašelio vidų, yra taip pat didžiausias procesų pradžioje kai dūmų temperatūra didžiausia. Nestacionariojo garavimo režime taip pat labiausiai šilumos srautai pakinta esant didžiausiai dūmų temperatūrai: fazinių virsmų (3.24 pav. a) labiausiai išauga, o srautų, nuvedamų į lašelio vidų ar išorę labiausiai sumažėja. Pusiausvirojo garavimo režime šilumos srautai mažėja.



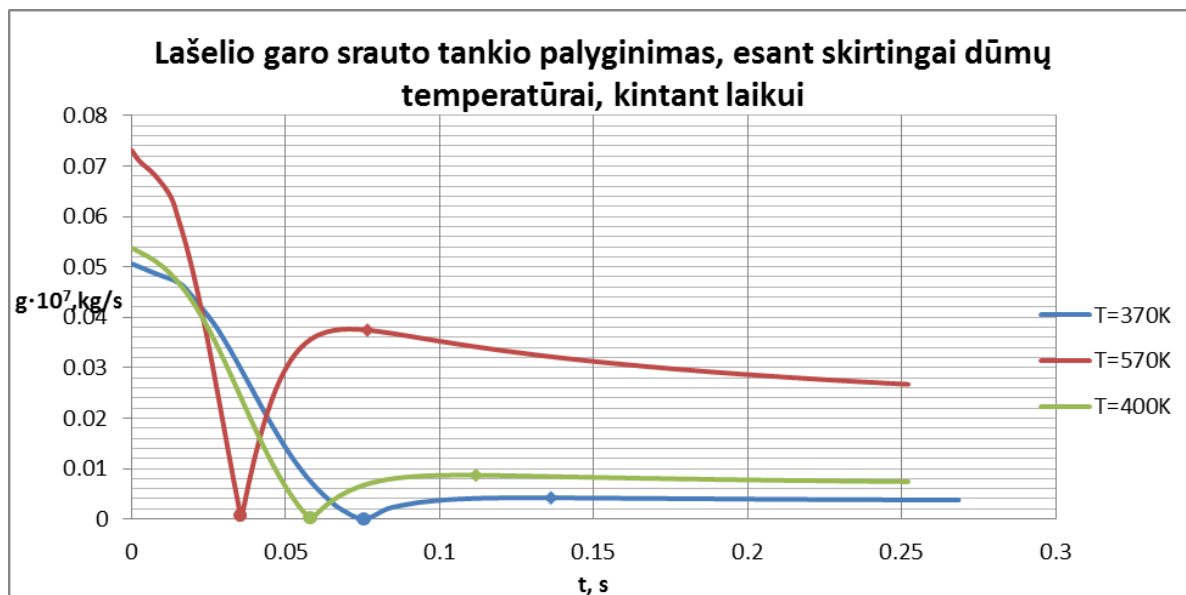
**3.26 pav. Lašelio spindulio palyginimas keičiant dūmų temperatūrą, kai  $T_0=278\text{K}$ ,  $T_d=370, 570, 400\text{K}$ ,  $p_{g,d.}=0,25$ ,  $Re=15$ ,  $R=75\mu\text{m}$ .**

Labai ryškiai matomas lašelio spindulio kitimas prie skirtingų dūmų temperatūrų 3.25 paveiksle. Kondensacinio proceso metu lašelio spindulys šiek tiek išauga dėl drėgmės esančios dūmuose. Kaip matome, labiausiai pakyla mėlyna kreivė, kuri iliustruoja lašelio spindulio kitimą, kuomet dūmų temperatūra yra 370K. Tuo metu lašelio spindulys yra lygus  $78,22\mu\text{m}$ . Pats procesas vyksta ilgiau, tačiau lašelis išauga labiausiai. Kuomet dūmų temperatūra yra 570K, lašelis išauga staigiausiai, bet iki reikšmės mažesnės, nei esant mažesniai lašeliui. Nestacionariojo ir pusiausvirojo garavimų metu lašelis mažėja staigiausiai, kai dūmų temperatūra yra 570K. Natūralu, nes lašelis garuoja labiausiai, taigi ir mažėja, kai aplinkos temperatūra (šiuo atveju dūmų) yra aukščiausia. Praėjus 0,2s, lašelio spindulys esant 370K dūmų temperatūrai, yra apie  $78\mu\text{m}$ , 400K-  $76\mu\text{m}$ , o 570K-  $68\mu\text{m}$ . Taigi, lašelio spindulys skiriasi net apie  $10\mu\text{m}$ !



**3.27 pav. Lašelio centro temperatūros palyginimas keičiant dūmų temperatūrą, kai  $T_0=278\text{K}$ ,  $T_d=370, 570, 400\text{K}$ ,  $p_{g,d.}=0,25$ ,  $Re=15$ ,  $R=75\mu\text{m}$ .**

3.26 paveiksle iliustruojamas lašelio centro temperatūros kitimas, prie skirtingų dūmų temperatūrų. Labiausiai ir staigiausiai sušyla visas lašelis, o taip pat ir lašelio centras, kai dūmų temperatūra yra 570K. Lašelio centro temperatūra kyla iki laiko  $\tau_e$ . Po jo, temperatūra po truputėlį krenta. Kai dūmų temperatūra yra 570K, lašelio centro temperatūra pakinta nuo 278 K iki 346,2K. Kitais atvejais lašelio centro temperatūra pakyla ne tiek daug.



**3.28 pav. Lašelio garo srauto tankio palyginimas keičiant dūmų temperatūrą, kai  $T_0=278K$ ,  $T_d=370, 570, 400K$ ,  $p_{g,d}=0,25$ ,  $Re=15$ ,  $R=75\mu m$ .**

Nenuostabu, kad esant dūmų temperatūrai didžiausiai (570K), lašelio garo srauto tankis kinta labiausiai. 3.27 paveiksle matome, kaip greitai ir intensyviai leidžiasi ir kyla raudona kreivė, kuri iliustruoja lašelio garo srauto tankį esant dūmų temperatūrai 570K. Tuo metu žalia ir mėlyna kreivės, iliustruojančios garo srauto tankį, kai dūmų temperatūra 370K ir 400K, yra žemiau ir turi keleta kartų mažesnes skaitines reikšmes.

#### 4 „LAŠO“ ŠILUMOS IR MASĖS MAINŲ PARAMETRAI IR JŲ GRUPAVIMAS.

##### 4.1 LAŠELIŲ DISPERSIŠKUMAS.

„Išpurkšto skysčio lašelių šilumokaitą ir masės mainus nusakančius parametrus pažymėkime bendru „P“ simboliu.“[15] ŠMM parametrus galime suskirstyti į terminius ( $P_T$ ), energinius ( $P_q$ ) ir fazinių virsmų ( $P_f$ ).

Terminiai parametrai nurodo lašelio terminės būsenos kitimą fazinių virsmų procese. Nestacionarųjį temperatūros lauką  $T(\eta, Fo)$  geriausiai apibūdina jam būdingos lašelio paviršiaus:

$$T_R(F_0) \equiv T(\eta = 1, Fo); \quad (4.1)$$

lašelio centro:

$$T_C(Fo) \equiv T(\eta = 1, Fo); \quad (4.2)$$

ir lašelio masės vidutinė:

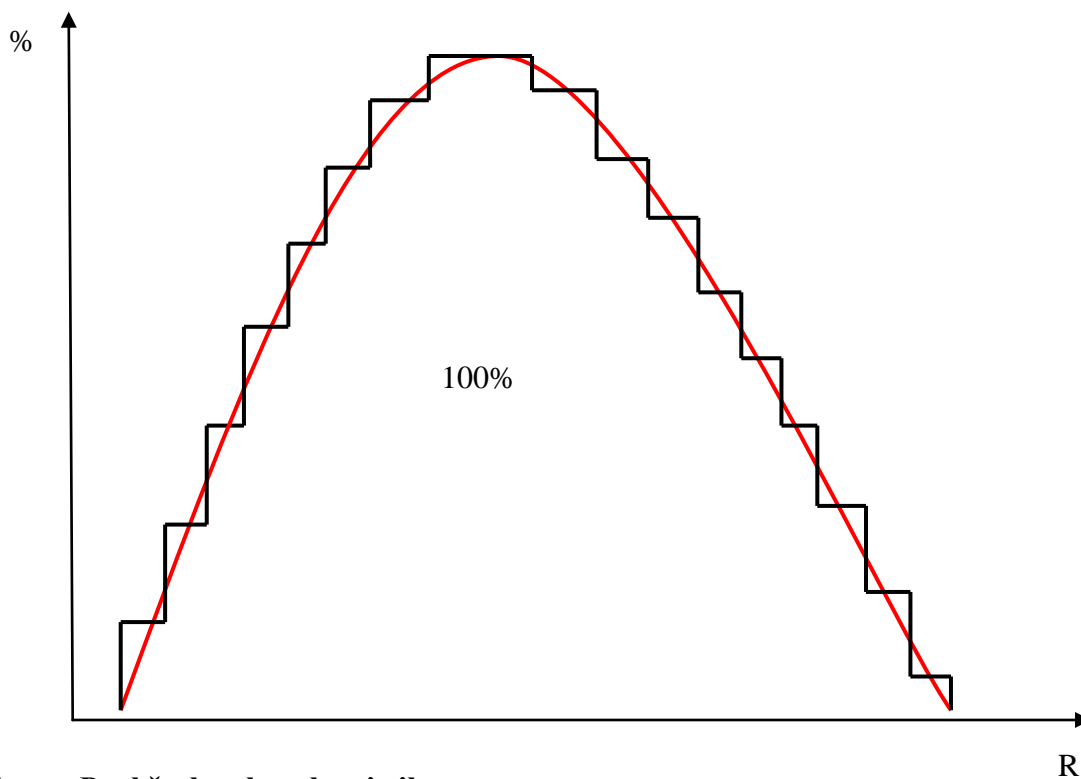
$$T_m(Fo) \equiv \int_0^1 T(\eta, Fo) \cdot \rho_f(\eta, Fo) d\eta / \int_0^1 \rho_f(\eta, Fo) d\eta; \quad (4.3)$$

temperatūros. Lašelio paviršiaus temperatūra pavaizduota 3.16 c pav. Kaip matome, ji auga nuo pat išpurškimo iki laiko  $\tau_e$ . Šis terminis parametras lemia fazinių virsmų režimą, nes kol  $T_R < T_{r.t.}$ , lašelio paviršiuje vyksta kondensacija, o esant lašelio paviršiaus temperatūrai didesnei nei rasos taško temperatūra, vyksta nestacionariojo garavimo režimas ir paviršiaus temperatūra auga, kol užtikrina pusiausvirą garavimą užtikrinančią temperatūrą. 3.16 pav. a ir b dalyse pavaizduotos lašelio centro ir lašelio masės temperatūros. Neizotermiškumą lašelyje apibrėžia lašelio centro temperatūra  $\Delta T_l = T_R - T_C$ . Pagal lašelio masės temperatūrą galime įvertinti lašelio terminę būseną.

Energiniai parametrai leidžia giliau pažinti išpurkšto lašelio šilumokaitą ir fazinius virsmus. Labai svarbu gerai suprasti ir apskaičiuoti suminius šilumos srautus lašelio viduje ir lašelį supančioje aplinkoje  $q_{\Sigma}^-$  ir  $q_{\Sigma}^+$ . Turbūt pats svarbiausias iš suminius šilumos srautus sudarančių šilumos srauto dedamųjų yra fazinių virsmų šilumos srautas  $q_f$ . Būtent jis yra pavaizduotas 3.15 a pav. kaip matome, iš pradžių  $q_f$  mažėja, kol esant laikui  $\tau_{KO}$ , pasiekia reikšmę lygią nuliui, esant nesatcionariajam garavimui šiek tiek auga, o esant pusiausviram garavimui- po truputėlį mažėja.

Fazinių virsmų parametrais  $P_f$  laikome garo srautą ir jo tankį ir lašelio matmens (R) kitimą. Būtent šie parametrai mus domina labiausiai. Norint išmokti tinkamai reguliuoti didelę dalį terminių technologijų, reikia pažinti ir suprasti garo srauto  $g(\tau)$  funkciją, kuri apibrėžia lašelio gyvavimo ciklą  $R(\tau)$ . Kaip matome iš 3.18 pav., kur yra lyginami garo srauto tankiai, esant skirtingiems lašelių dydžiams, garo srauto tankis esant laikui  $\tau_{KO}$ , yra lygus 0, o po šio laiko auga, kol pasiekia laiką  $\tau_e$ . Esant pusiausvirajam garavimui, garo srauto tankis po truputį mažėja. Lašelio matmuo (šiuo atveju spindulys) lašelio gyvavimo laike iš pradžių auga (iki laiko  $\tau_{KO}$ ), o po jo mažėja. Taigi, apibendrinus galime teigti, kad fazinių virsmų parametras lašelio spindulys kondensacijos režime auga, o jam pasibaigus- mažėja. Kitas fazinių virsmų parametras- garo srauto tankis didžiausias yra kondensacinio režimo pradžioje, o šiam režimui pasibaigus yra lygus nuliui- garas nėra nuvedamas nei į lašelio vidų, nei į lašelio išorę.

Įvairiose technologijose naudojami purkštukai skystį išpurškia nevienodo dydžio lašeliais. 4.1 paveiksle matome purkštuko charakteristiką. Juoda kreivė vaizduoja skaitinius eksperimentus. Matome, kad norėdami gauti kuo tikslesnę charakteristiką, su kuo mažesniu žingsniu, skaitinių tyrimų tyrimų kiekį turime paimti be galo didelį, jis turi artėti prie begalybės. Lašelio dispersiškumas labai išplečia skaitinio tyrimo apimtį. Todėl būtina skaitinį tyrimą optimizuoti.



**4.1 pav. Purkštuko charakteristika.**

## 4.2 LAŠELIŲ GRUPAVIMAS.

Būtina lašelius sugrupuoti. Kriterijus, pagal kurį lašelius grupuojame yra vienodas pradinis Reinoldso  $Re$  kriterijus. Lašeliai su vienodu  $Re$  kriterijumi sudaro lašelių debesėlį (ansamblį). Kartu su lašelių grupavimu pritaikome universalus laiko Furje mastelį.

Modeliuojame lašelių fazinių virsmų ciklą, kai Paimame lašelius, kai  $Re=15$ . Kitos kraštinės sąlygos:

**4.1 lentelė Sugrupuotų lašelių kraštinės sąlygos, kai  $Re=15$ .**

$T_0$	$T_d$	$p_g$	$R$
273	470	0,25	75
273	470	0,25	100
273	470	0,25	125

Kitame skyrelyje pateiksime grafinius palyginimus Furje mastelyje naudojantis būtent šiuo lašelių debesėliu.

### 4.3 FURJE MASTELIS.

„Vandens ir kuro lašelių garavimo tyrimais pagrįstas glaudus lašelio šilumokaitos ir jo fazinių virsmų ryšys. Sudėtinių pernašos procesų tarpusavio sąveikos įvertinimo aspektu vertėtų lašelio gyvavimo ciklą pateikti Furje kriterijumi išreikštu laiko masteliu.:

$$0 - \tau_f \rightarrow 0 \div Fo_f ; \quad (4.4)$$

Tik klasikinė Furje kriterijaus  $Fo = (a/R^2) \cdot \tau$  forma  $0 - \tau_f$  ciklui transformuoti netinka, nes lašeliui šylant ir jo paviršiuje vykstant faziniams virsmams, kistų ir realaus laiko bei Furje mastelių sąsajų  $a/R^2$  parametras. Todėl pritaikomas modifikuotos formos Furje kriterijus  $Fo = (a_0/R_0^2) \cdot \tau$ . Jame  $a_0/R_0^2$  parametras suformuojamas pagal pradinę lašelio būseną, todėl vykstant faziniams virsmams nepakinta. Šio tipo cikle išryškėja laidumu šildomų lašelių „k“ šilumokaitos šilumos ir masės parametrų kitimo savitumai. Jie sudaro prielaidas sudėtinių pernašos procesų tarpusavio sąveikos intensyvumą įvertinti palyginamuoju būdu. Dujų temperatūra  $T_d$  ir skysčio garo jose tūrine  $\overline{p_g} \equiv p_{g\infty} / p$  dalimi apibrėžtai lašelių apsupties būsenai, stambesniems už keletą mikrometrų lašeliams šis ciklas „k“ šilumokaitos atveju yra neįjautrus išpurškiamo skysčio lašelių dispersiškumui. Atskirų fazinių virsmų režimo trukmė šiame cikle yra nevienoda. Todėl skaitinio tyrimo metu keblu sudėtinius pernašos procesus modeliuoti taip, kad išlaikytume vienodo lygmens požiūrį į jų sąveikos svarbą atskiruose fazinių virsmų režimuose.“[17]

Lašelio ciklas realaus laiko mastelyje yra pervedamas į Furje laiko mastelį. Furje kriterijus yra išreiškiamas taip:

$$F_0 = \frac{a}{l^2} \cdot \tau ; \quad (4.5)$$

Čia  $l$ - būdingas matmuo;  $a = \frac{\lambda}{\rho c_p}$  - temperatūrinis laidumo koeficientas;

$$F_0 = \frac{a_0}{R_0^2} \cdot \tau; \frac{a_0}{R_0^2} \rightarrow const., \text{ tam tikram lašelių dispersiškumui.}; \quad (4.6)$$

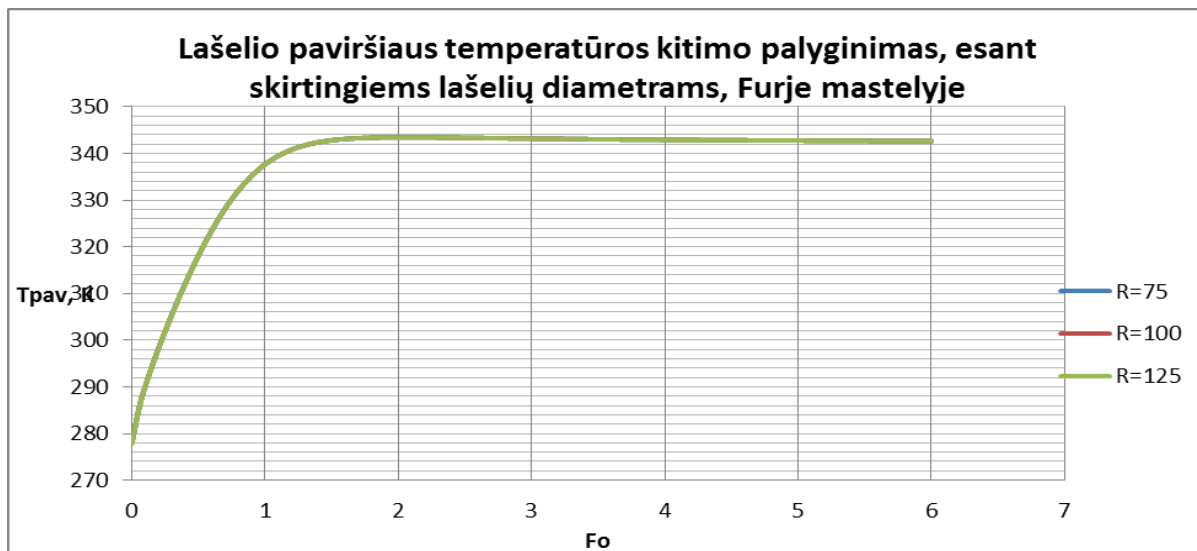
Pervedus lašelio ciklą į Furje mastelį, gauname išraišką:

$$0 \div F_{0KO} \div F_{0e} \div F_{0f} ; \quad (4.7)$$



Universalaus garavimo ciklas Furje mastelyje patogus naudoti analizuojant lašelių šildymo laidumą. Ciklas Furje mastelyje visiems lašeliams būna vienodas ir nepriklauso nuo jų dispersiškumo. Norint sudaryti tokį ciklą, užtenka išnagrinėti vieną lašelį, o po to pasinaudojant Furje kriterijumi ir  $\tau$  ryšiu galima nagrinėti bet kurį lašą.

Panagrinėkime lašelius Furje mastelyje, su skirtingais spinduliais.

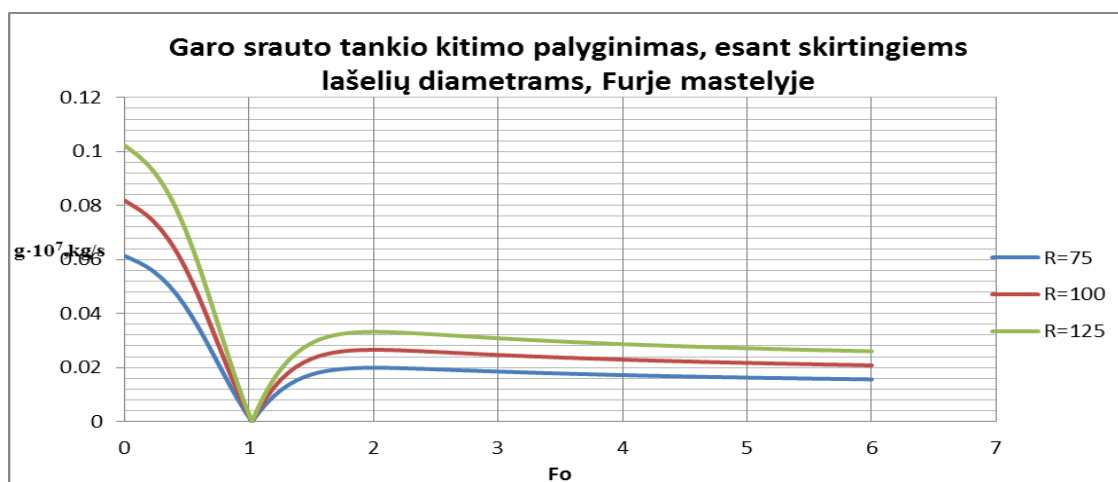


**4.2 pav. Lašelio paviršiaus temperatūros kitimas Furje mastelyje, kai  $T_0=278\text{K}$ ,  $T_d=470\text{K}$ ,  $p_{g,d}=0,25$ ,  $Re=15$ ,  $R=75, 100, 125\mu\text{m}$ .**

4.2 paveiksle matome, kad pervedus laiką į Furje mastelį, kreivės sutampa ir yra visiškai identiškoms.

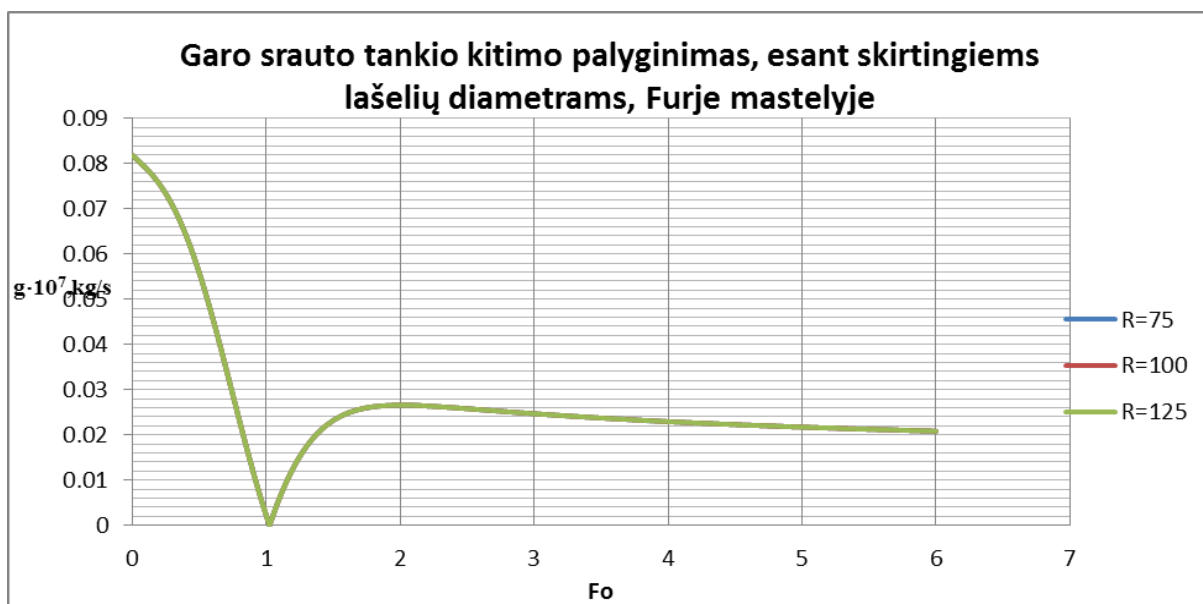
3.16 c paveiksle matome, kaip lygiai tokių pačių lašelių, esančių su tokiomis pačiomis kraštinėmis sąlygomis, paviršiaus temperatūros priklausomybės kreivės skiriasi ir anaiptol nėra identiškoms.

Lygiai taip pat panagrinėkime garo srauto tankio priklausomybę Furje mastelyje.



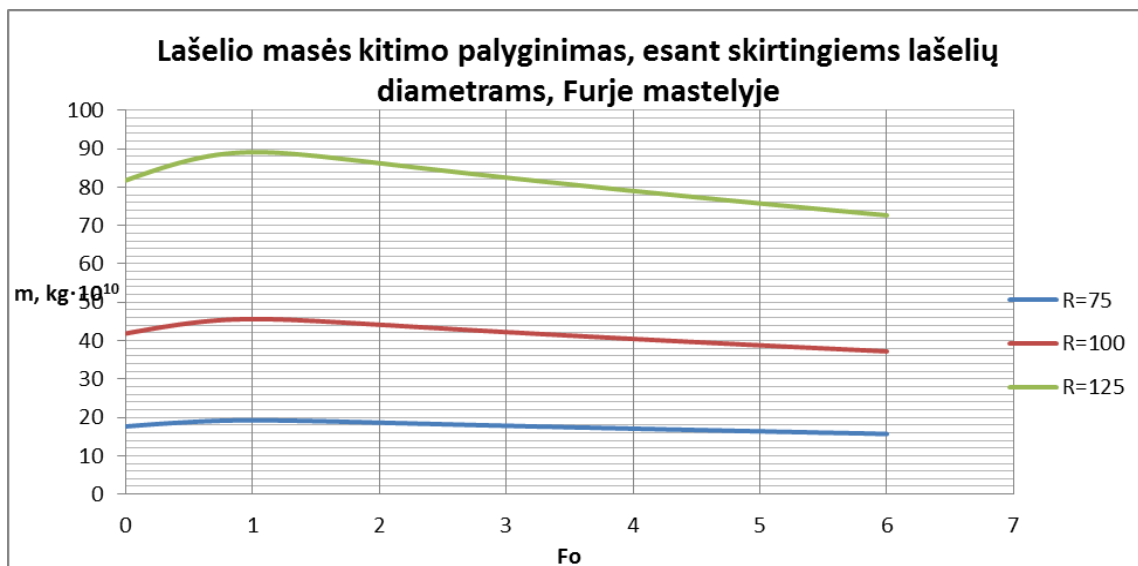
**4.3 pav. Lašelio garo srauto tankio kitimas Furje mastelyje, kai  $T_0=278\text{K}$ ,  $T_d=470\text{K}$ ,  $p_{g,d}=0,25$ ,  $Re=15$ ,  $R=75, 100, 125\mu\text{m}$ .**

4.3 paveiksle matome, kad lašelio garo srauto tankio priklausomybę pervedus į Furje mastelį, kreivės, esant 75, 100 ir 125 $\mu\text{m}$ , skiriasi. Jos yra labai panašios, tačiau nėra lygios. Padalinę kiekvieną reikšmę esant lašelio spinduliui 75 $\mu\text{m}$  iš kiekvienos reikšmės, esant lašelio spinduliui 100 $\mu\text{m}$ , gauname visada tokį patį santykį- 1,33333. Lygiai taip pat kiekvieną reikšmę esant lašelio spinduliui 100 $\mu\text{m}$ , padalinę iš kiekvienos reikšmės esant lašelio spinduliui 125 $\mu\text{m}$ , gauname santykį 1,25. Visas garo srauto tankio reikšmes lašelio spinduliui esant 75 $\mu\text{m}$ , padauginame iš 1,33333, o visas reikšmes esant 125 $\mu\text{m}$ , padaliname iš 1,25 (reikšmes esant lašelio spinduliui 100 $\mu\text{m}$  paliekame tokias pačias). Atidėję perskaičiuotas garo srauto tankio reikšmes Furje laiko mastelyje, gauname, kad visos kreivės sutampa ir yra identiškios (4.4 pav.)



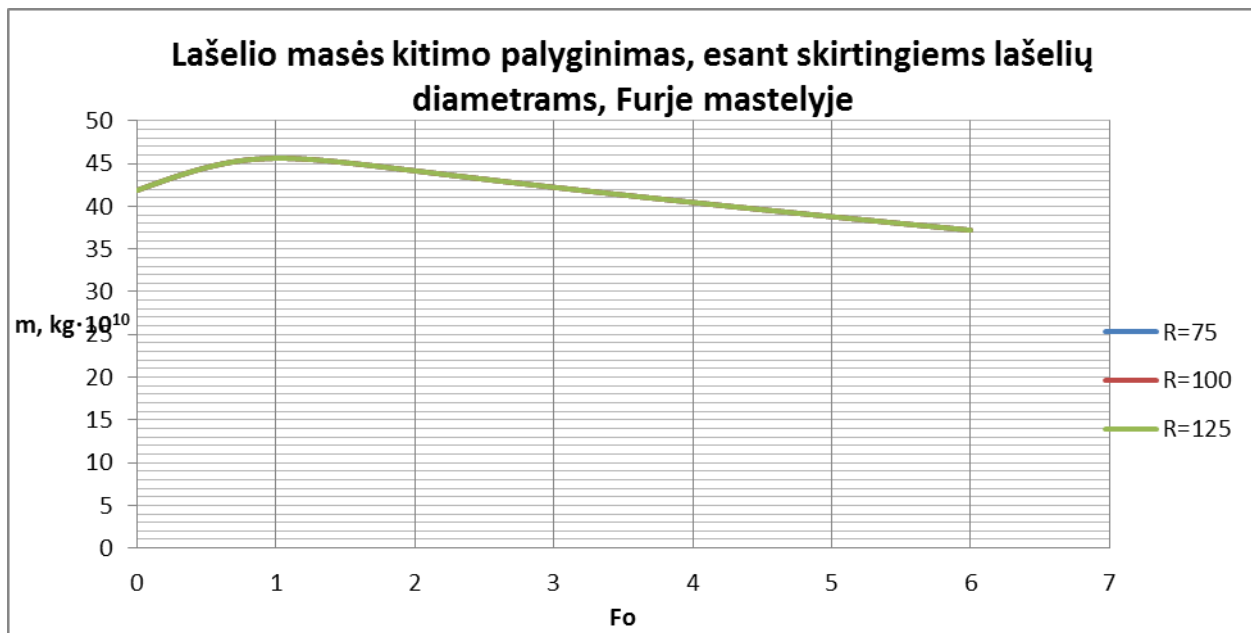
4.4 pav. Lašelio garo srauto tankio kitimas Furje mastelyje (perskaičiavus), kai  $T_0=278\text{K}$ ,  $T_d=470\text{K}$ ,  $p_{g,d}=0,25$ ,  $Re=15$ ,  $R=75, 100, 125\mu\text{m}$ .

Taip pat panagrinėsime lašelių, turinčių skirtingus spindulius, masės kitimą Furje mastelyje.



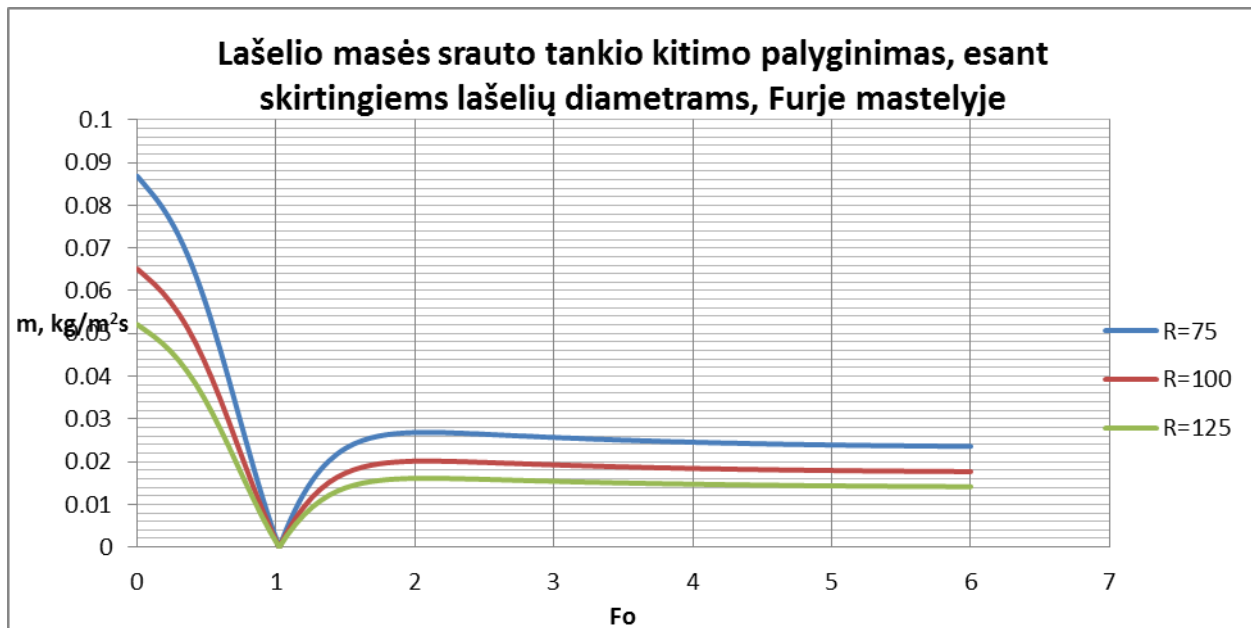
**4.5 pav. Lašelio masės kitimas Furje mastelyje, kai  $T_0=278\text{K}$ ,  $T_d=470\text{K}$ ,  $p_{g.d.}=0,25$ ,  $Re=15$ ,  $R=75, 100, 125\mu\text{m}$ .**

Kaip matome 4.4 paveiksle, lašelių masės kitimo priklausomybės Furje mastelyje nesutampa, tačiau yra panašios. Lašelių masės reikšmes padaliname taip kaip darėme perskaičiuojant garo srauto tankio reikšmes. Reikšmes prie lašelio spindulio  $75\mu\text{m}$ , padalinę iš reikšmių prie lašelio spindulio  $100\mu\text{m}$ , gauname santykį  $0,4218$ . Reikšmes prie lašelio spindulio  $100\mu\text{m}$ , padalinę iš reikšmių prie lašelio spindulio  $125\mu\text{m}$ , gauname santykį  $0,512$ . Perskaičiavę lašelio masės reikšmes prie kiekvienos  $Fo$  reikšmės, gauname, kad priklausomybės kreivės sutampa (4.5 pav.)



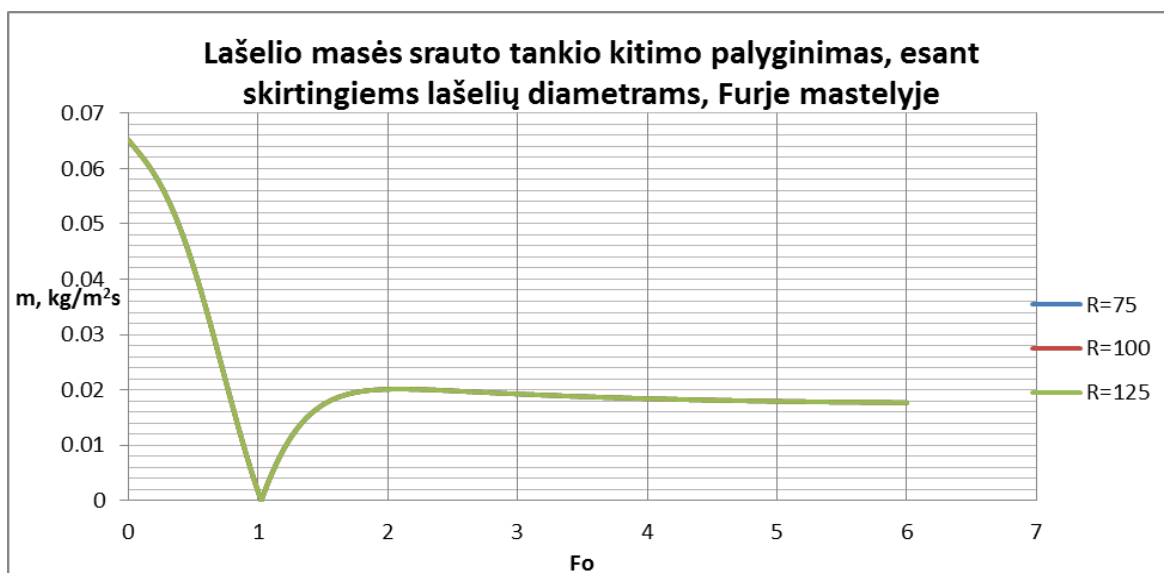
**4.6 pav. Lašelio masės kitimas Furje mastelyje (perskaičiuotas), kai  $T_0=278\text{K}$ ,  $T_d=470\text{K}$ ,  $p_{g.d.}=0,25$ ,  $Re=15$ ,  $R=75, 100, 125\mu\text{m}$ .**

Panagrinėkime lašelių, turinčių skirtingus spindulius, masės srauto tankio kitimą Furje mastelyje.



**4.7 pav. Lašelio masės srauto tankio kitimas Furje mastelyje, kai  $T_0=278\text{K}$ ,  $T_d=470\text{K}$ ,  $p_{g,d}=0,25$ ,  $Re=15$ ,  $R=75, 100, 125\mu\text{m}$ .**

Masės srauto tankio kitimas Furje mastelyje (4.7 pav.) labai panašus į garo srauto tankio kitimą Furje mastelyje. Kaip matome, kreivės vėlgi labai panašios, bet nėra identiškios. Padalinę visas masės srauto tankio reikšmes lašelio spinduliui esant  $75\mu\text{m}$  iš visų masės srauto tankio reikšmių lašelio spinduliui esant  $100\mu\text{m}$ , visada gauname vienodą santykį- lygų  $1,3333$ . Taip pat atlikę veiksmus su lašelių reikšmėmis, kai  $R=100\mu\text{m}$  ir  $R=125\mu\text{m}$ , santykį gauname  $1,25$ . Perskaičiavę masės srauto tankio reikšmes, ir jas atidėję, gauname, kad kreivės sutampa (4.8 pav.)



**4.8 pav. Lašelio masės srauto tankio kitimas Furje mastelyje (perskaičiuotas), kai  $T_0=278\text{K}$ ,  $T_d=470\text{K}$ ,  $p_{g,d}=0,25$ ,  $Re=15$ ,  $R=75, 100, 125\mu\text{m}$ .**

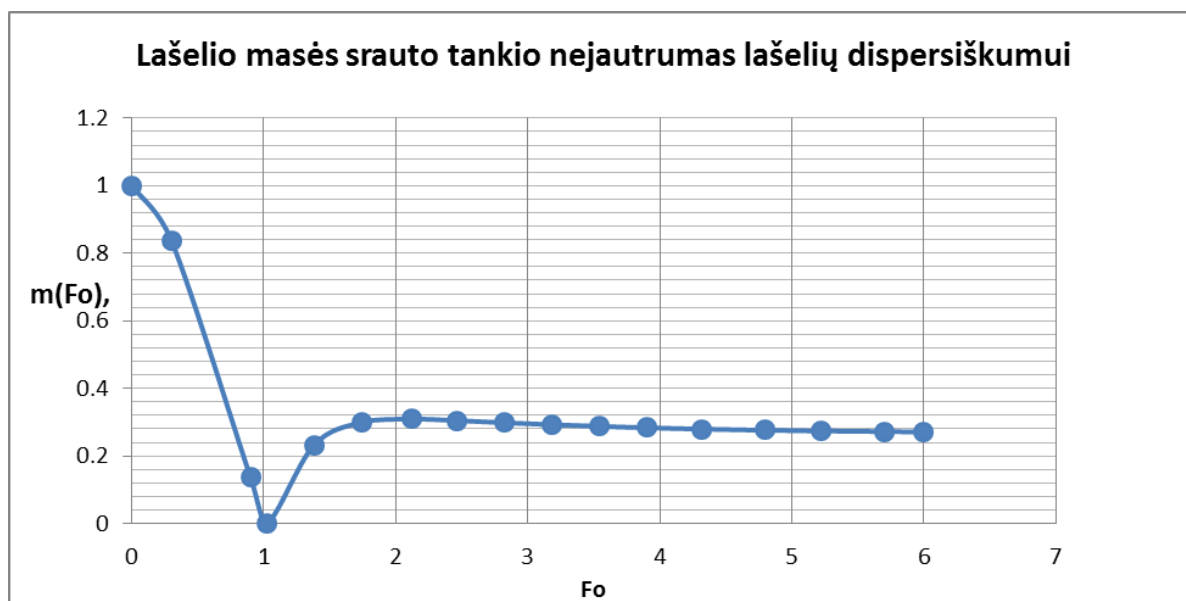
Įsitikinome, kad įvairius lašelio parametrus, esant skirtingam jų spinduliui, pervedus į Furje mastelį, reikšmės sutampa arba skiriasi kažkoku nekintančiu daugikliu. Taigi, iš čia darome išvadą, kad

lašeliai yra nejautrūs vandens išpurškimo dispersiškumui, jeigu skirtingo skersmens lašelius apjungti vienodo Reinoldso  $Re_0$  kriterijaus grupėje ir apibrėžti lašelių matmenis siejančius daugiklius.

## 5 „LAŠO“ MODELIAVIMO REZULTATŲ APIBENDRINIMAS IR IŠPLĖTIMO PLATESNIAM LAŠELIŲ DISPERSIŠKUMUI INŽINERINĖ METODIKA.

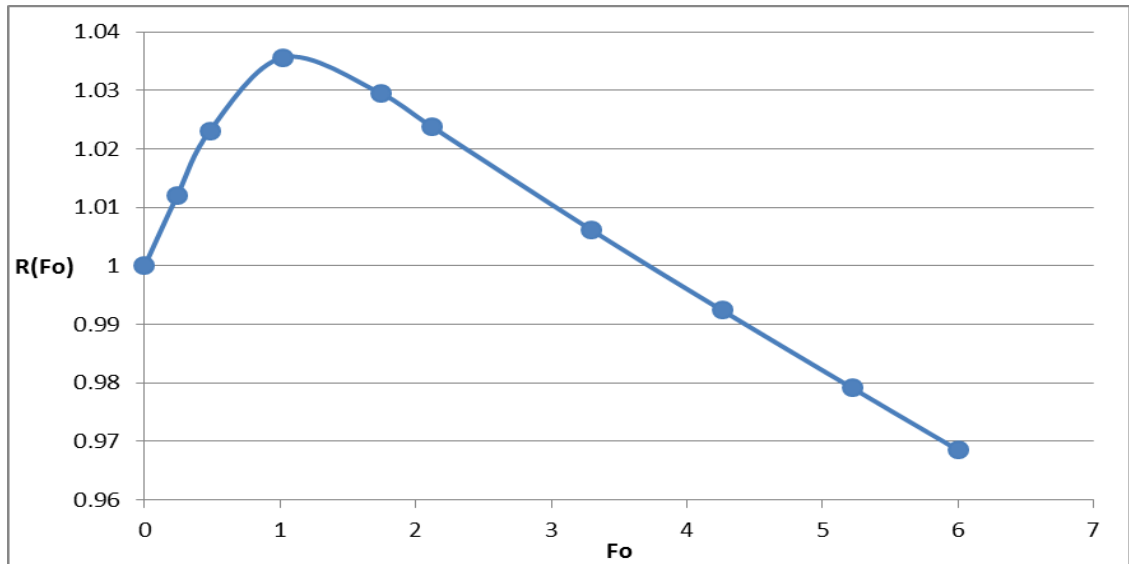
Kaip jau buvo minėta ankstesniame skyrelyje, būtina lašelius sugrupuoti į vienodo  $Re$  kriterijaus debesėlius (ansamblius). Tik esant vienodam Reinoldso kriterijui, lašelius galima perversi į  $Fo$  mastelį ir jie tampa nejautrūs dispersiškumui.

4.2 - 4.8 paveiksluose nagrinėjami įvairūs lašelių parametrai Furje mastelyje. Pabandykime lašelių parametrus  $y$  ašyje imti kaip santykį  $P(Fo)/P_0$ , kur  $P(Fo)$  yra lašelio šilumos ir masės mainų parametro vertė laisvai parinktu laiko momentu, o  $P_0$  yra pradinis parametras, kai laikas  $t$  yra lygus nuliui. Santykis  $P(Fo)/P_0$  parodo, kiek pasikeitė parametras, kai praėjo tam tikras laikas.  $P_0$  ir  $P(Fo)$  parametrai kiekvienam lašeliui yra individualūs ir apskaičiuojami individualiai.



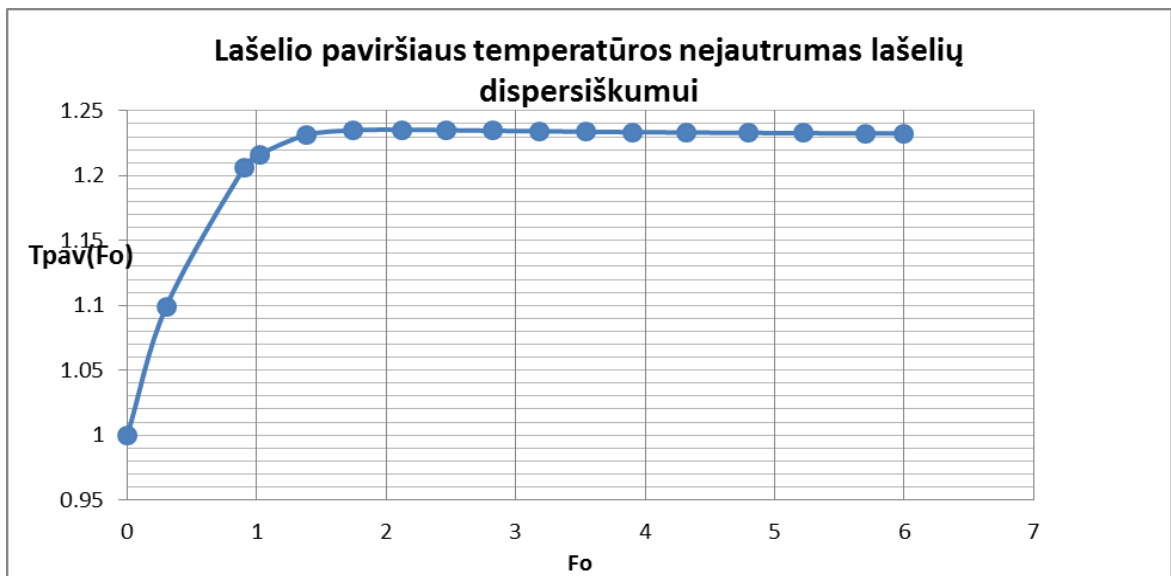
**5.1 pav. Lašelio masės srauto tankio nejautrumas lašelių dispersiškumui, kai  $T_0=278K$ ,  $T_d=470K$ ,  $p_{g,d}=0,25$ ,  $Re=15$ ,  $R=75\mu m$ .**

5.1 paveiksle nagrinėjamas lašelių masės srauto tankio nejautrumas lašelių dispersiškumui. Kitaip nei 4.7 paveiksle, kurį vėliau pervedėme į 4.8 paveikslą, kad kreivės sutaptų, šiame paveiksle matome, kad nesvarbu, koks lašelio spindulys, kreivės sutampa iš karto ir jų pervedinėti nereikia, kai naudojama parametru  $P(Fo)/P_0$  formos funkcijos.



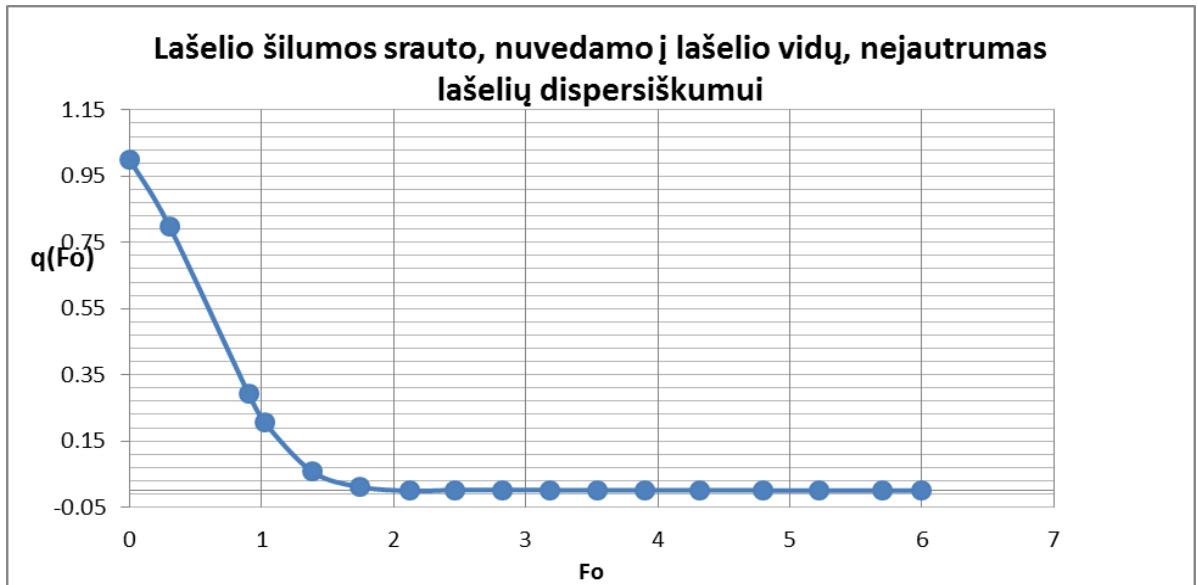
5.2 pav.  $\overline{R}_{75}(Fo)$  funkcijos grafikas, kai  $T_0=278K$ ,  $T_d=470K$ ,  $p_{g,d}=0,25$ ,  $Re=15$ ,  $R=75\mu m$ .

Panagrinėkime kitą lašelio šilumos ir masės mainų fazinį parametą- lašelio spindulį. Kaip matome 5.2 paveiksle, lašelio matmens kreivės, nesvarbu, koks pradinis lašelio matmuo- sutampa.



5.3 pav. Lašelio paviršiaus temperatūros nejautrumas lašelių dispersiškumui, kai  $T_0=278K$ ,  $T_d=470K$ ,  $p_{g,d}=0,25$ ,  $Re=15$ ,  $R=75\mu m$ .

Kaip atrodo lašelio šilumos ir masės mainų terminiai parametrai, šiuo atveju lašelio paviršiaus temperatūros, matome 5.3 paveiksle. Čia, kaip ir fazinių ŠMM parametų kreivės  $Fo$  mastelyje sutampa.



**5.4 pav. Lašelio šilumos srauto, nuvedamo į lašelio vidų, nejautrumas lašelių dispersiškumui, kai  $T_0=278\text{K}$ ,  $T_d=470\text{K}$ ,  $p_{g,d}=0,25$ ,  $Re=15$ ,  $R=75\mu\text{m}$ .**

Energinių šilumos ir masės mainų parametrų priklausomybės  $Fo$  laiko mastelyje nėra išimtis, ir kaip ir terminiai ir faziniai parametrai, yra nejautrūs lašelių dispersiškumui (5.4 pav.)

Matome, kad visų- terminių, energinių ir fazinių šilumos ir masės mainų parametrų santykinės priklausomybės, kuomet imamas ne parametras, o  $P(Fo)/P_0$  santykis Furje laiko mastelyje yra nejautrios lašelių dispersiškumui. Tai labai patogu ir universalu, kadangi užtenka išnagrinėti tik vieną lašelį, o ne visą jų debesėlį, kurį gali sudaryti begalybė lašelių. Furje laiko mastelis suteikia galimybę sutaupyti didžiulius laiko ir pinigų kaštus, kadangi užtenka atlikti tik vieną bandymą ar modeliavimą.

Anksčiau (5.1 - 5.4 pav.) pagrindėme  $\bar{P}(Fo) = \frac{P(Fo)}{P_0}$  funkcijų grafikų universalumą lašelių

dispersiškumui. Pateikiami  $\bar{M}(Fo)$  (5.1 pav.),  $\bar{R}(Fo)$  (5.2 pav.),  $\bar{T}_{pav}(Fo)$  (5.3 pav.) ir  $\bar{q}(Fo)$  (5.4 pav.) pavyzdžiai Furje mastelyje. Analogiški grafikai galimi bet kuriems lašelio parametrams. Pavyzdžiui, svarbūs yra garo srauto tankio  $\bar{m}_g(Fo)$ , garo srauto  $\bar{g}_g(Fo)$ , lašelio masės  $\bar{M}(Fo)$ , lašelio masės vidutinės temperatūros  $\bar{T}_m(Fo)$  ir kitų parametrų grafikai.

Šiems  $\bar{P}(Fo)$  grafikams sudaryti pakanka turėti vieno, bet kokio  $R_0$  spindulio lašelio skaitinio tyrimo prie konkretaus  $Re$  kriterijaus rezultatus, parinktus, kai išpurškiamo vandens temperatūra  $T_0$ , dūmų temperatūra  $T_d$ , dūmų drėgnumas  $p_g$ .

Teigiame, kad žinome  $R=75\mu\text{m}$  lašelio modeliavimo rezultatus. Šiuo atveju laiko  $\tau$  ir Furje  $F_0$  kriterijaus ryšio daugiklis  $\frac{a_0}{R_{75}^2} = 23,80985$ . Kitokio stambumo (50, 150 ir 200 mikrometrų

spinduliai) lašeliams šis ryšys bus:  $\frac{a_0}{R_{50}^2} = 53,5721663$ ;  $\frac{a_0}{R_{150}^2} = 5,952463$ ;  $\frac{a_0}{R_{200}^2} = 3,34826$ .

Šiems atvejams labai paprasta surasti lašelio fazinių virsmų laikus  $\tau_i$ , kai žinomas  $F_{0i}$  kriterijus:

$$\tau_i = F_{0i} / \frac{a_0}{R_0^2}; \quad (5.1)$$

Furje  $F_{0i}$  kriterijų apibrėžiame pagal  $R=75$  modeliavimo rezultatus, pateikdami dominančias reikšmes sumodeliuotame fazinių virsmų cikle (5.1 lentelė). Parenkame tiek tarpinių  $F_{0i}$ , kad jų pakaktų kokybiškiems funkcijų  $\overline{P}(F_0)$  grafikams nubrėžti.

**5.1 lentelė Modeliavimo rezultatai  $\overline{P}(F_0)$ , kai  $R=75\mu\text{m}$ .**

$F_{0i}$	$\overline{R}_{i,75}$	$\overline{T}_{pavi,75}$	$\overline{m}_{i,75}$	$\overline{g}_{i,75}$	$\overline{M}_{i,75}$	$\overline{T}_{m,i,75}$
<b>0</b>	1	1	1	1	1.0000	1
<b>0.2400</b>	1.0120	1.0837	0.8802	0.9015	1.0087	1.0729
<b>0.4800</b>	1.0231	1.1404	0.6720	0.7033	1.0171	1.1313
<b>1.0225</b>	1.0356	1.2164	0.0000	0.0000	1.0254	1.2120
<b>1.7400</b>	1.0295	1.2350	0.2994	0.3174	1.0335	1.2346
<b>2.1253</b>	1.0237	1.2354	0.3090	0.3239	1.0412	1.2354
<b>3.3000</b>	1.0061	1.2342	0.2910	0.2946	1.0486	1.2342
<b>4.2600</b>	0.9924	1.2334	0.2803	0.2761	1.0555	1.2334
<b>5.2200</b>	0.9791	1.2329	0.2742	0.2628	1.0619	1.2329
<b>6.0000</b>	0.9685	1.2325	0.2714	0.2546	1.0678	1.2326

Šioje lentelėje pirmasis stulpelis yra parinktas  $F_0$ . Kituose stulpeliuose pateiktos dominančios funkcijų  $\frac{P_i}{P_0}$  reikšmės, kurie nurodo kažkokio parametro pokytį.

Pavyzdžiu imame 5.2 pav., kuriame atvaizduojame  $\overline{R}_{75}(F_0)$  funkciją:

$F_{0i}$  laiko momentu kitam lašelių dispersiškumui šie pokyčiai  $\frac{P_i}{P_0}$  bus tokie patys, tačiau laike  $\tau$

skirsis, nes  $\frac{a_0}{R_0^2}$  bus savitas. Todėl apibrėžiame laike  $\tau_i$  lašelių parametrus, kai  $R_0=50\mu\text{m}$ ,  $R_0=150\mu\text{m}$

ir  $R_0=200\mu\text{m}$ . Šiems lašeliams apibrėžiame pradines parametrų vertes:  $m_{g,0}$ ,  $T_{m,0}$ ,  $M_0$ ,  $g_0$ .



$$m_g^+ = \frac{D_{gd} \cdot \mu_g}{T_p \cdot l \cdot R_\mu} \cdot p \cdot \ln \frac{p - p_g^\infty}{p - p_g^{p_{av}}}; \quad (5.2)$$

$$M_0 = \frac{4}{3} \pi R_0^3 \rho_{Tm} \quad (5.3)$$

$$g_0 = m_g 4\pi R_0^2 \quad (5.4)$$

5.2 lentelėje pateiktos pradinės lašelių parametrų vertės, kai  $R_0=50, 75, 150$  ir  $200\mu\text{m}$ .

**5.2 lentelė Pradinės parametrų  $\frac{a_0}{R_0^2}$ ,  $m_{g,0}$ ,  $T_{m,0}$ ,  $g_0$  ir  $M_0$  vertės, kai  $R_0=50, 75, 150$  ir  $200\mu\text{m}$ .**

$R_0$	$\frac{a_0}{R_0^2}$	$m_{g,0}$	$T_{m,0}$	$g_0$	$M_0$
<b>50</b>	53.5720	-0.1303	278	-0.0409	5.2350
<b>75</b>	23.8098	-0.0869	278	-0.0614	17.6680
<b>150</b>	5.9524	-0.0434	278	-0.1228	141.3440
<b>200</b>	3.3483	-0.0326	278	-0.1637	335.0370

Pagal 5.3 lentelėje pateiktus pradinius duomenis, esant įvairiems lašelių dydžiams, galime surasti

visus fazinių virsmų parametrus  $\frac{P_i}{P_0}$  individualiu  $\tau_{i,R_0}$  laiku:

$$P_i = P_0 \cdot \bar{P}_i \quad (5.5)$$

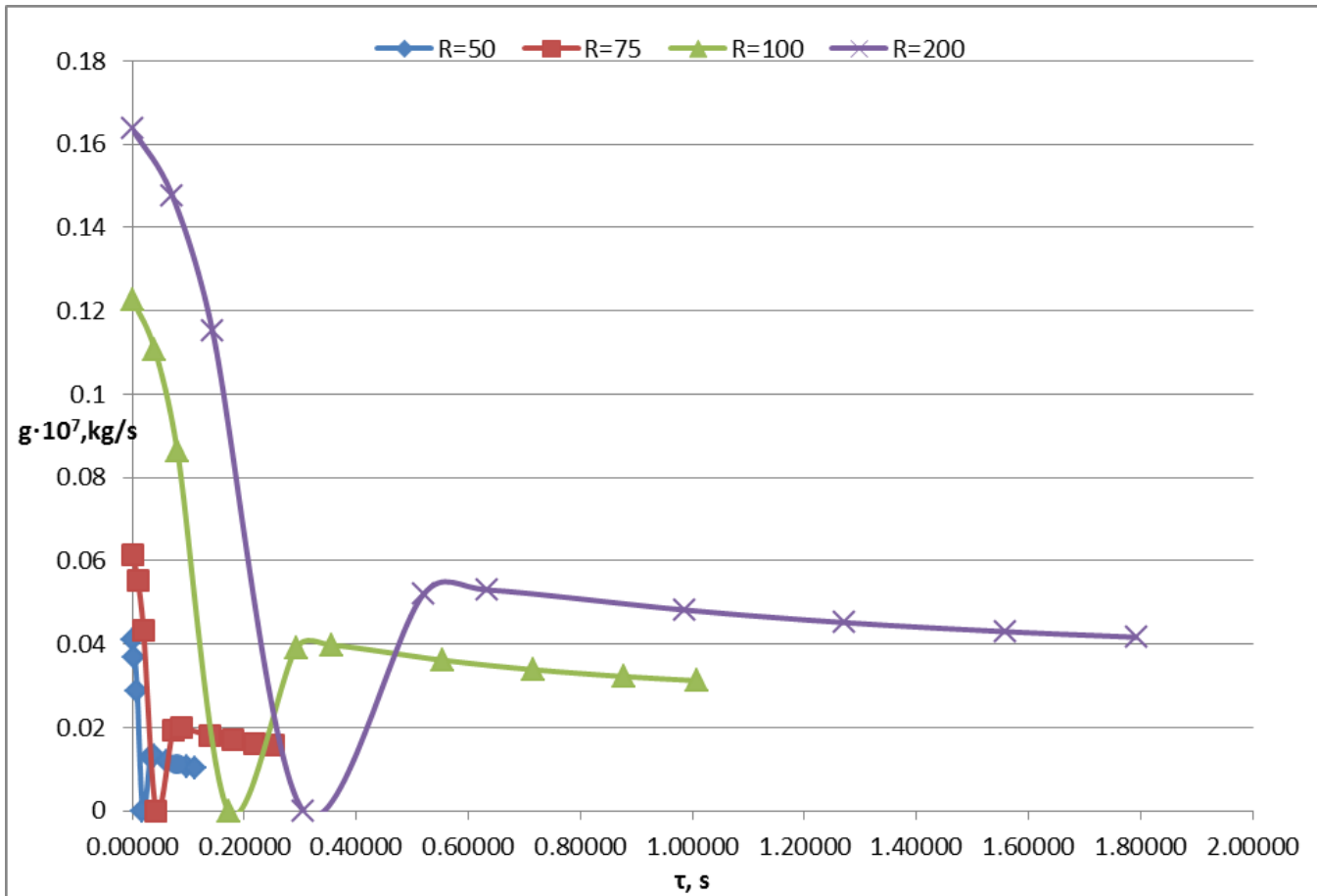
Individualų laiką randame iš 5.1 formulės. Duomenis pateikiame 5.3 lentelėje.

**5.3 lentelė Parametrų  $R$ ,  $m_g$ ,  $T_m$ ,  $g$ ,  $M$  reikšmės kai  $R_0=50, 75, 150$  ir  $200\mu\text{m}$ .**

$\tau$	$R$	$m_g$	$T_m$	$g$	$M$
<b>R=50</b>					
0.00000	50.00000	-0.13029	278.00000	-0.04093	5.23500
0.00448	50.60130	-0.11468	298.28000	-0.03690	5.28037
0.00896	51.15296	-0.08755	314.51313	-0.02879	5.32478
0.01909	51.78180	0.00000	336.93715	0.00000	5.36811
0.03248	51.47632	-0.03901	343.23014	-0.01299	5.41016
0.03967	51.18498	-0.04027	343.44752	-0.01326	5.45062
0.06160	50.30360	-0.03792	343.11701	-0.01206	5.48916
0.07952	49.61961	-0.03653	342.89246	-0.01130	5.52545
0.09744	48.95604	-0.03572	342.74088	-0.01076	5.55910
0.11200	48.42556	-0.03536	342.65376	-0.01042	5.58976
<b>R=75</b>					
0.00000	75.00000	-0.08686	278.00000	-0.06140	17.66798
0.01008	75.90196	-0.07645	298.28000	-0.05535	17.82110

$\tau$	R	$m_g$	$T_m$	g	M
0.02016	76.72944	-0.05837	314.51313	-0.04318	17.97098
0.04295	77.67270	0.00000	336.93715	0.00000	18.11724
0.07308	77.21448	-0.02601	343.23014	-0.01949	18.25913
0.08926	76.77746	-0.02684	343.44752	-0.01988	18.39568
0.13860	75.45541	-0.02528	343.11701	-0.01809	18.52577
0.17892	74.42941	-0.02435	342.89246	-0.01695	18.64823
0.21924	73.43407	-0.02381	342.74088	-0.01614	18.76181
0.25200	72.63834	-0.02357	342.65376	-0.01563	18.86530
R=150					
0.00000	150.00000	-0.04343	278.00000	-0.12279	141.34400
0.04032	151.80391	-0.03823	298.28000	-0.11070	142.56898
0.08064	153.45888	-0.02918	314.51313	-0.08636	143.76799
0.17179	155.34539	0.00000	336.93715	0.00000	144.93808
0.29232	154.42896	-0.01300	343.23014	-0.03897	146.07322
0.35704	153.55493	-0.01342	343.44752	-0.03977	147.16561
0.55440	150.91081	-0.01264	343.11701	-0.03617	148.20634
0.71568	148.85883	-0.01218	342.89246	-0.03390	149.18598
0.87695	146.86813	-0.01191	342.74088	-0.03227	150.09461
1.00799	145.27669	-0.01179	342.65376	-0.03126	150.92255
R=200					
0.00000	200.00000	-0.03257	278.00000	-0.16372	335.03700
0.07168	202.40521	-0.02867	298.28000	-0.14760	337.94064
0.14336	204.61184	-0.02189	314.51313	-0.11515	340.78274
0.30540	207.12719	0.00000	336.93715	0.00000	343.55628
0.51968	205.90527	-0.00975	343.23014	-0.05196	346.24699
0.63474	204.73991	-0.01007	343.44752	-0.05302	348.83636
0.98559	201.21442	-0.00948	343.11701	-0.04823	351.30327
1.27231	198.47843	-0.00913	342.89246	-0.04520	353.62535
1.55903	195.82418	-0.00893	342.74088	-0.04303	355.77915
1.79199	193.70225	-0.00884	342.65376	-0.04168	357.74166

Išplēstus modeliavimo rezultatus atvaizduojame grafiškai 5.5 pav.



**5.5 pav. Išplėstų modeliavimo rezultatų grafinis atvaizdavimas. Garo srauto tankis, kai  $R_0=50$ ,  $75$ ,  $150$ ,  $200$ ,  $T_0=278K$ ,  $T_d=470K$ ,  $p_{g,d.}=0,25$ ,  $Re=15$ .**

Taigi, užtenka vieno skaitinio modeliavimo atvejo, kurį galime neribotai išplėsti bet kokio dydžio lašelių parametrams surasti. 5.5 paveiksle atvaizduotose garo srauto tankio priklausomybėse nuo laiko ir lašelių pradinio dydžio, matome, kokias skirtingas reikšmes galime atkurti skirtingo stambumo lašeliams.

Lygiai tokiu pačiu algoritmu galime atkurti bet kurį mus dominantį lašelio parametą  $P$ . Tai labai aktualu skysčio išpurškimo grindžiamose technologijose. O, kadangi, skysčio išpurškimas yra labai plačiai naudojamas, taigi Furje mastelio pritaikymas yra labai reikšmingas.

## 6 IŠVADOS.

Šilumą iš šalinamų biokuro dūmų galime susigrąžinti naudojant kontaktinį arba rekuperacinį šilumokaitį - kondensacinį ekonomizerį. Abiejais atvejais reikalingas vandens išpurškimas: kontaktiniame vandens garas iš dūmų iškondensuojamas tiesiog ant į juos įpurkšto vandens lašelių, o rekuperaciniame vanduo purškiamas virš vamzdelių retinės, kad pagerinti vamzdelių vidumi tekančios gravitacinės kondensato plėvelės hidrodinamiką. Akivaizdu, kad vandens išpurškimo technologijos biokuro deginime yra labai svarbus aspektas, todėl būtina jį gerai pažinti ir įsisavinti.

Biokuro dūmų drėgnumas, vandens išpurškimo dispersiškumas bei lašelių šilumokaitos sąlygos yra labai svarbūs faktoriai, apibrėžiantys vandens lašelių pereinamųjų fazinių virsmų režimo dėsninumus. Į šiuos faktorius būtina atsižvelgti apibrėžiant optimalias vandens išpurškimo kondensacinių ekonomizerių technologijose sąlygas.

Vandens lašelių pereinamųjų fazinių virsmų kondensacinio ir garavimo režimų modeliavimo efektyvumui labai svarbu tai, jog pernašos  $P$  parametrų bematės formos  $\bar{P}(Fo) \equiv P(Fo)/P_0$  funkcijų atitinkamų parametrų grafikai yra nejautrūs vandens išpurškimo dispersiškumui, jeigu skirtingo skersmens lašelius apjungti vienodo Reinoldso  $Re_0$  kriterijaus grupėje. Tai sudaro galimybę sumodeliuoti laisvai parinkto stambumo lašelių fazinių virsmų ciklą ir jo rezultatus išplėsti norimo dispersiškumo lašeliams.

Būtina atsižvelgti, jog funkcijų  $\bar{P}(Fo)$  grafikų universalumas galios tik tam skirtingo skersmens lašelių ansamblui, kuriame šilumokaitos ir masės mainų pradines sąlygas apibrėžiantys  $T_0$ ,  $Re_0$ ,  $T_g$  ir  $\bar{p}_{g,d}$  parametrai visiems lašeliams bus tokie patys.

## 7 LITERATŪRA IR DUOMENŲ ŠALTINIAI.

1. Teisės aktų registras. (2014) Lietuvos Respublikos Seimo kanceliarija *Nacionalinės šilumos ūkio plėtros 2015–2021 metų programa*. [žiūrėta 2016-05-16]. Prieiga per internetą <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/a1484c20d3c711e4bcd1a882e9a189f1>;
2. Lietuvos šilumos tiekėjų asociacija. (2016) Išplėstinis energetikos ekspertų pasitarimas 2016 m. šilumos ūkio sektoriaus uždaviniams aptarti. *Detaliai reguliuojamo šilumos ūkio raida*. [žiūrėta 2016-05-16]. Prieiga per internetą <http://www.lsta.lt/lt/events/view/627>;
3. Lietuvos Respublikos energetikos ministerija. Lietuvos Respublikos Vyriausybė. *Nacionalinė energetinės nepriklausomybės strategija*. [žiūrėta 2016-05-16] Prieiga per internetą <http://enmin.lrv.lt/lt/apie-ministerija/strateginis-planavimas>;
4. Lietuvos Respublikos energetikos ministerija. Lietuvos Respublikos Vyriausybė. *Lietuvos Respublikos energetikos ministerijos 2016-2018 metų strateginis veiklos planas*. [žiūrėta 2016-05-17]. Prieiga per internetą <http://enmin.lrv.lt/uploads/enmin/documents/files/EM%202016-2018%20strateginis%20veiklos%20planas.pdf>;
5. Lietuvos statistikos departamentas. (2013). [žiūrėta 2016-05-17]. Prieiga per internetą <http://www.stat.gov.lt/>;
6. Technologijos.lt *Alternatyviosios energetikos perspektyvos Lietuvoje*. [žiūrėta 2016-05-17]. Prieiga per internetą [http://www.technologijos.lt/n/technologijos/energija\\_ir\\_energetika/S-35825/straipsnis/Alternatyviosios-energetikos-perspektyvos-Lietuvoje?l=2&p=1](http://www.technologijos.lt/n/technologijos/energija_ir_energetika/S-35825/straipsnis/Alternatyviosios-energetikos-perspektyvos-Lietuvoje?l=2&p=1);
7. Technologijos.lt *Lietuva jau viršijo atsinaujinančių energijos išteklių naudojimo rodiklį, nustatytą 2020 metams*. [žiūrėta 2016-05-17]. Prieiga per internetą [http://www.technologijos.lt/n/technologijos/energija\\_ir\\_energetika/S-50840/straipsnis/Lietuva-jau-virsijo-atsinaujinanciu-energijos-istekliu-naudojimo-rodikli-nustatyta-2020-metams](http://www.technologijos.lt/n/technologijos/energija_ir_energetika/S-50840/straipsnis/Lietuva-jau-virsijo-atsinaujinanciu-energijos-istekliu-naudojimo-rodikli-nustatyta-2020-metams);
8. Lietuvos Respublikos energetikos ministerija. Lietuvos Respublikos Vyriausybė. *Dėl Lietuvos Respublikos Vyriausybės nutarimo projekto teikimo*. [žiūrėta 2016-05-17]. Prieiga per internetą [https://lrv.lt/uploads/main/Posed\\_medz/2015/150318/24.pdf](https://lrv.lt/uploads/main/Posed_medz/2015/150318/24.pdf);
9. Marcinauskas K., Korsakienė I. Žemiausio rasos taško temperatūros vėsinamų dūmų šilumos panaudojimo galimybių įvertinimas. *Energetika*. 2006/4;
10. G. Gimbutis, K. Kajutis, V. Krukoniš ir kt. (1993) *Šiluminė technika. vadovėlis aukšt. mokyklų studentams*. Vilnius;

11. Agroakademija. VšĮ Lietuvos žemės ūkio konsultavimo tarnyba. (2014) *Kietojo biokuro savybės*. [žiūrėta 2016-05-17]. Prieiga per internetą <http://www.agroakademija.lt/inzinerija/energetika/?SID=1183>;
12. Paprec group. *Solid recovered fuel*. [žiūrėta 2016-05-17]. Prieiga per internetą <https://www.paprec.com/en/understanding-recycling/waste-heat-recovery/solid-recovered-fuel>;
13. Fortum. (2015) [žiūrėta 2016-03-25]. Prieiga per internetą <http://www.fortum.com/frontpage/com/en/?from=irene>;
14. K. Buinevičius, *Teršalų susidarymas biokuro degimo metu*. [žiūrėta 2016-05-17]. Prieiga per internetą [http://www.lsta.lt/files/events/2015-02-10Biokurotaisykl/KBuinevicius\\_1%20dalis.pdf](http://www.lsta.lt/files/events/2015-02-10Biokurotaisykl/KBuinevicius_1%20dalis.pdf);
15. Gintautas Miliauskas, Kristina Norvaišienė. (2013) *Garuojančių lašelių sudėtinės pernašos nestacionariųjų procesų sąveikos sisteminis įvertinimas*. Energetika.
16. Zuev V.E., Kopitin U.D., Kuzikovskii A.V. 1982. Nonlinear optical effects in aerosols, Novosibirsk, Nauka.
17. Gintautas Miliauskas. (2014). *Grynojo skysčio lašelių fazinių virsmų režimų universalusis ciklas*. Energetika 2: 77–95.
18. Abramzon B., Sirignano W. A. (1989). *Droplet vaporization model for spray combustion calculations*, *Int. J. of Heat and Mass Transfer* 32: 1605–1618.
19. Gintautas Miliauskas. (2001). *Regularities of unsteady radiative-conductive heat transfer in evaporating semitransparent liquid droplets*, *Int. J. Heat Mass Transfer* 44: 785–798.
20. Giedrius Miliauskas, Gintautas Miliauskas, Romualdas Montvilas. (2008) *Drėgnuose šylančių lašelių kondensacinis augimas*. Energetika.
21. Drobavičius A., Garbaravičius J., Gimbutis G.S., Kajutis K., Krukoniš V., Liutikas N., Milenskis N., Pranckūnas A., Rudokas J. (1974). *Bendroji šiluminė technika. Lietuvos TSR Aukštojo ir specialiojo vidurinio mokslo ministerijos patvirtintas vadovėlis respublikos aukštųjų mokyklų mechaninėms neenergetinėms specialybėms*. Vilnius.
22. Gudzinskas J., Lukoševičius V., Martinaitis V., Tuomas E. (2011) *Šilumos vartotojo vadovas*. Vilnius. Lietuvos Šilumos tiekėjų asociacija.
23. Spraičius A. (2013) *Energetiniai karai. Pirma knyga*. Vilnius. Leidykla „Eugrimas“.
24. Lukoševičius V., Martinaitis V. (2014) *Šilumos gamyba deginant kurą. Vadovėlis*. Vilnius. „Technika“. Vilniaus Gedimino technikos universitetas.
25. Gedgaudas M., Šležas A., Švedarauškas J., Tuomas E. (1992). *Šilumos tiekimas. Vadovėlis aukštųjų mokyklų šilumos, dujų tiekimo ir vėdinimo specialybės studentams*. Vilnius. „Aušros“ sp.

1. MODELIAVIMO, ESANT KRAŠTINĒMS SĀLYGOMS T<sub>0</sub>=273K; T<sub>d</sub>=470K; pg,d= 0,25; Re=15; R=75µm REZULTĀTĀI.

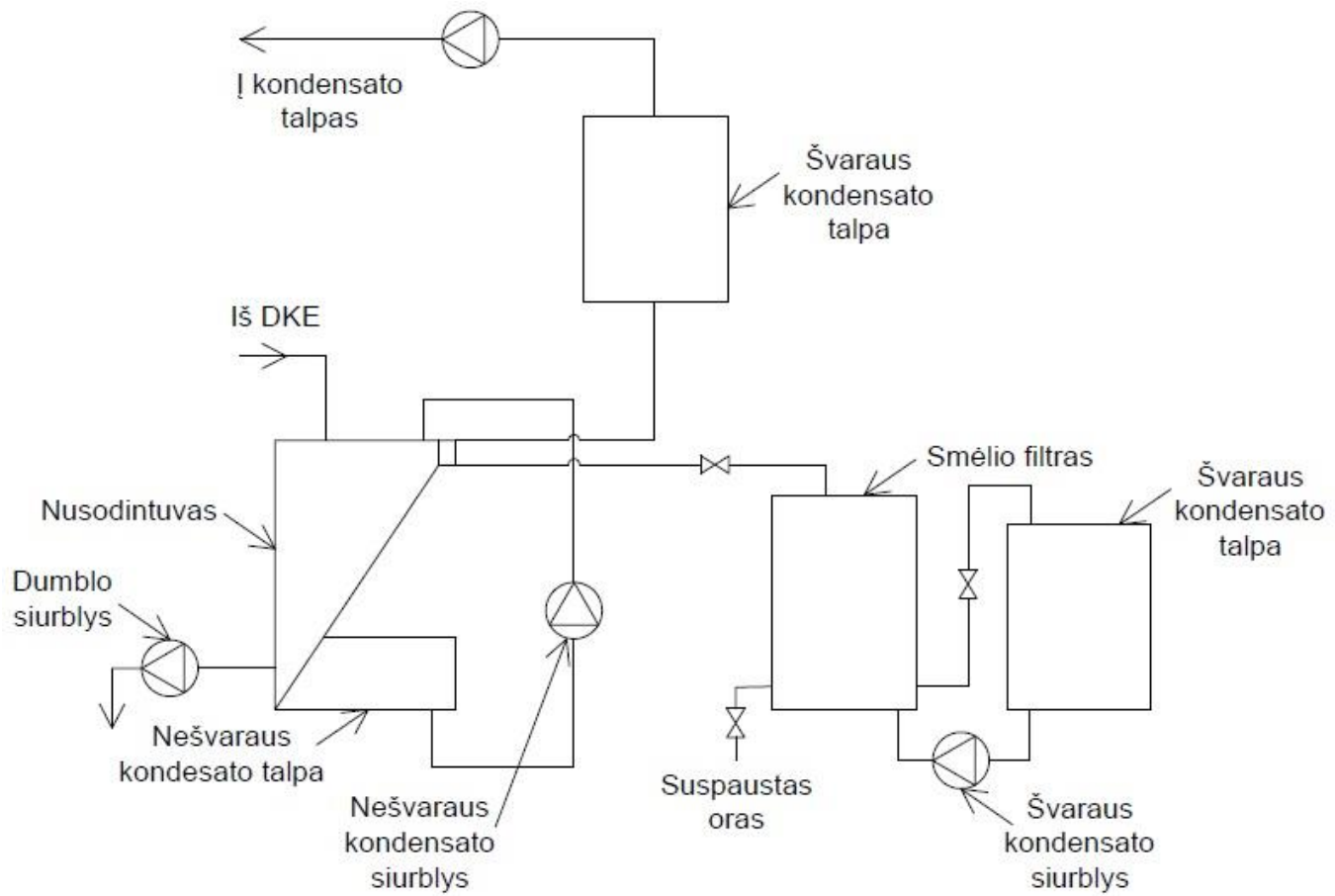
Nr	t, s	Fo	a0/R2	TR.K	TC,K	Tm.K	R, mkm	m,k/m2s	g107k/s	qc+				
1	0	0	0	23.80985	23.80978	278	278	75	-0.08686	-0.0614	158.657			
2	0.00252	0.06	0.06	23.80985	23.80978	286.2476	281.1864	283.5206	283.5175	283.3698	75.22022	-0.08457	-0.06013	149.5268
3	0.00504	0.12	0.12	23.80985	23.80978	291.8813	284.734	288.8	288.7908	288.5783	75.45091	-0.08222	-0.05882	141.9321
4	0.00756	0.180001	0.18	23.80985	23.80978	296.7548	289.1202	293.67	293.6655	293.4407	75.67535	-0.07956	-0.05726	135.177
5	0.01008	0.240001	0.24	23.80985	23.80978	301.2615	293.7358	298.28	298.2768	298.0568	75.90196	-0.07645	-0.05535	128.9496
6	0.0126	0.300001	0.3	23.80985	23.80978	305.5243	298.2668	302.6659	302.6622	302.4525	76.11913	-0.07281	-0.05302	123.1332
7	0.01512	0.360001	0.36	23.80985	23.80978	309.5752	302.6111	306.8371	306.8342	306.6365	76.33482	-0.06859	-0.05022	117.6542
8	0.01764	0.420001	0.42	23.80985	23.80978	313.3978	306.5722	310.7886	310.7866	310.6018	76.53871	-0.06378	-0.04695	112.5065
9	0.02016	0.480001	0.48	23.80985	23.80978	317.0211	310.6334	314.5131	314.5131	314.3419	76.72944	-0.05837	-0.04318	107.6437
10	0.02268	0.540002	0.54	23.80985	23.80978	320.4115	314.3069	318.0178	318.0162	317.8587	76.908	-0.0524	-0.03895	103.0773
11	0.0252	0.600002	0.6	23.80985	23.80978	323.55	317.7462	321.2788	321.2772	321.1341	77.06888	-0.04598	-0.03432	98.80389
12	0.02772	0.660002	0.66	23.80985	23.80978	326.4385	320.9304	324.2865	324.2857	324.1577	77.21303	-0.03918	-0.02936	94.80827
13	0.03024	0.720002	0.72	23.80985	23.80978	329.0566	323.8761	327.0382	327.0376	326.9246	77.34065	-0.03219	-0.0242	91.11278
14	0.03276	0.780002	0.78	23.80985	23.80978	331.3964	326.5772	329.525	329.5247	329.4265	77.44695	-0.02518	-0.01848	87.73822
15	0.03528	0.840003	0.84	23.80985	23.80978	333.4593	329.0289	331.7452	331.7451	331.6616	77.53212	-0.01833	-0.01385	84.68409
16	0.0378	0.900003	0.9	23.80985	23.80978	335.2564	331.2297	333.7041	333.7041	333.6342	77.59742	-0.01179	-0.00892	81.94119
17	0.04032	0.960003	0.96	23.80985	23.80978	336.7982	333.1886	335.4124	335.4124	335.355	77.64409	-0.00572	-0.00433	79.50067
18	0.04284	1.020003	1.02	23.80985	23.80978	338.1039	334.9138	336.8841	336.8841	336.8377	77.67219	-0.00021	-0.00016	77.34711
19	0.04536	1.080003	1.08	23.80985	23.80978	339.1957	336.4151	338.1369	338.1369	338.1001	77.68417	0.004682	0.00355	75.45544
20	0.047879	1.140003	1.14	23.80985	23.80978	340.099	337.7077	339.1919	339.1921	339.1633	77.68162	0.008934	0.006775	73.80187
21	0.050399	1.200004	1.2	23.80985	23.80978	340.8379	338.8081	340.0709	340.071	340.0489	77.66642	0.012562	0.009522	72.35925
22	0.052919	1.260004	1.26	23.80985	23.80978	341.4363	339.7346	340.7958	340.7958	340.7788	77.64043	0.016605	0.011821	71.10085
23	0.055439	1.320004	1.32	23.80985	23.80978	341.9169	340.5066	341.3877	341.3878	341.3751	77.60539	0.018122	0.013715	70.00033
24	0.057959	1.380004	1.38	23.80985	23.80978	342.2986	341.143	341.8665	341.8665	341.8571	77.56285	0.020171	0.015249	69.0351
25	0.060479	1.440004	1.44	23.80985	23.80978	342.5997	341.6626	342.2504	342.2504	342.2436	77.51418	0.021822	0.016477	68.18369
26	0.062999	1.500004	1.5	23.80985	23.80978	342.8347	342.0828	342.5553	342.5554	342.5503	77.46056	0.023134	0.017443	67.42813
27	0.065519	1.560004	1.56	23.80985	23.80978	343.0152	342.4191	342.7945	342.7946	342.7909	77.40298	0.02416	0.018189	66.75384
28	0.068039	1.620005	1.62	23.80985	23.80978	343.1527	342.6855	342.9803	342.9803	342.9778	77.34228	0.024953	0.018757	66.14686
29	0.070559	1.680005	1.68	23.80985	23.80978	343.2555	342.894	343.1228	343.1228	343.121	77.27921	0.025557	0.01918	65.5964
30	0.073079	1.740005	1.74	23.80985	23.80978	343.3305	343.0554	343.2301	343.2301	343.229	77.21448	0.026007	0.019485	65.09341
31	0.075599	1.800005	1.8	23.80985	23.80978	343.3837	343.1784	343.3093	343.3093	343.3084	77.14834	0.026334	0.019636	64.63062
32	0.078119	1.860005	1.86	23.80985	23.80978	343.4194	343.2705	343.366	343.366	343.3655	77.08112	0.026562	0.019832	64.20264
33	0.080639	1.920006	1.92	23.80985	23.80978	343.4416	343.3374	343.4048	343.4048	343.4045	77.01312	0.026713	0.01991	63.80254
34	0.083159	1.980006	1.98	23.80985	23.80978	343.4531	343.3846	343.4295	343.4295	343.4294	76.94457	0.026803	0.019941	63.42813
35	0.085679	2.040006	2.04	23.80985	23.80978	343.4563	343.416	343.4431	343.4431	343.443	76.87568	0.026846	0.019937	63.07567
36	0.088199	2.100006	2.1	23.80985	23.80978	343.4532	343.4349	343.4482	343.4482	343.4481	76.80659	0.026852	0.019906	62.74218
37	0.090719	2.160006	2.16	23.80985	23.80978	343.4452	343.4438	343.4465	343.4465	343.4464	76.7374	0.02683	0.019854	62.4255
38	0.093239	2.220006	2.22	23.80985	23.80978	343.4335	343.4453	343.4396	343.4396	343.4396	76.66822	0.026787	0.019786	62.13281
39	0.095759	2.280006	2.279999	23.80985	23.80978	343.419	343.441	343.4289	343.4289	343.4289	76.59911	0.026727	0.019706	61.85983
40	0.098279	2.340007	2.34	23.80985	23.80978	343.4026	343.4323	343.4152	343.4152	343.4153	76.53011	0.026656	0.019618	61.55983
41	0.100799	2.400007	2.4	23.80985	23.80978	343.3847	343.4199	343.3994	343.3994	343.3994	76.46129	0.026576	0.019525	61.29527
42	0.103319	2.460007	2.46	23.80985	23.80978	343.3658	343.4052	343.382	343.382	343.3821	76.39265	0.026491	0.019427	61.04092
43	0.105839	2.520007	2.52	23.80985	23.80978	343.3463	343.3886	343.3635	343.3635	343.3635	76.3242	0.026401	0.019327	60.79625
44	0.108359	2.580007	2.579999	23.80985	23.80978	343.3264	343.3706	343.3442	343.3442	343.3442	76.256	0.02631	0.019226	60.56052
45	0.110879	2.640008	2.639999	23.80985	23.80978	343.3064	343.3518	343.3247	343.3247	343.3247	76.18801	0.026217	0.019124	60.33328
46	0.113399	2.700008	2.7	23.80985	23.80978	343.2863	343.3323	343.3048	343.3048	343.3049	76.12026	0.026125	0.019022	60.11394
47	0.115919	2.760008	2.76	23.80985	23.80978	343.2664	343.3127	343.2849	343.2849	343.2849	76.05274	0.026032	0.018921	59.90215
48	0.118439	2.820008	2.819999	23.80985	23.80978	343.2467	343.2928	343.2651	343.2651	343.2651	75.98547	0.025941	0.018822	59.69759
49	0.120959	2.880008	2.879999	23.80985	23.80978	343.2272	343.2729	343.2454	343.2454	343.2454	75.91843	0.025851	0.018724	59.49985
50	0.123479	2.940008	2.939999	23.80985	23.80978	343.2081	343.2532	343.226	343.226	343.2261	75.85162	0.025764	0.018627	59.30854
51	0.125999	3.000009	3	23.80985	23.80978	343.1893	343.2337	343.2069	343.2069	343.2069	75.78505	0.025677	0.018532	59.12363
52	0.128519	3.060009	3.06	23.80985	23.80978	343.1709	343.2145	343.1883	343.1883	343.1883	75.7187	0.025593	0.018439	58.94478
53	0.131039	3.120009	3.12	23.80985	23.80978	343.1529	343.1956	343.1699	343.1699	343.1699	75.65257	0.025512	0.018348	58.77159
54	0.133559	3.18001	3.18	23.80985	23.80978	343.1353	343.177	343.1519	343.1519	343.1519	75.58665	0.025432	0.018259	58.60417
55	0.136079	3.24001	3.24	23.80985	23.80978	343.118	343.1589	343.1343	343.1343	343.1343	75.52094	0.025355	0.018172	58.44205
56	0.138599	3.30001	3.3	23.80985	23.80978	343.1012	343.1411	343.117	343.117	343.1171	75.45541	0.025279	0.018087	58.28521
57	0.141119	3.360011	3.360001	23.80985	23.80978	343.0848	343.1237	343.1003	343.1003	343.1003	75.39004	0.025206	0.018003	58.13345
58	0.143639	3.420011	3.420001	23.80985	23.80978	343.0688	343.1067	343.0838	343.0838	343.0838	75.32486	0.025136	0.017922	57.98643
59	0.146158	3.480011	3.480001	23.80985	23.80978	343.0532	343.0901	343.0679	343.0679	343.0679	75.25987	0.025067	0.017842	57.84423
60	0.148678	3.540012	3.540001	23.80985	23.80978	343.038	343.074	343.0522	343.0522	343.0522	75.19506	0.025001	0.017764	57.70664
61	0.151198	3.600012	3.600001	23.80985	23.80978	343.0231	343.0582	343.037	343.037	343.037	75.13042	0.024936	0.017688	57.57353
62	0.153718	3.660012	3.660001	23.80985	23.80978	343.0086	343.0428	343.0222	343.0222	343.0222	75.06595	0.024874	0.017613	57.44459
63	0.156238	3.720013	3.720001	23.80985	23.80978	342.9945	343.0277	343.0077	343.0077	343.0077	75.00164	0.024813	0.01754	57.31994
64	0.158758	3.780013	3.780002	23.80985	23.80978	342.9807	343.0131	342.9935	342.9935	342.9935	74.93749	0.024755	0.017469	57.19926
65	0.161278	3.840014	3.840002	23.80985	23.80978	342.9673								



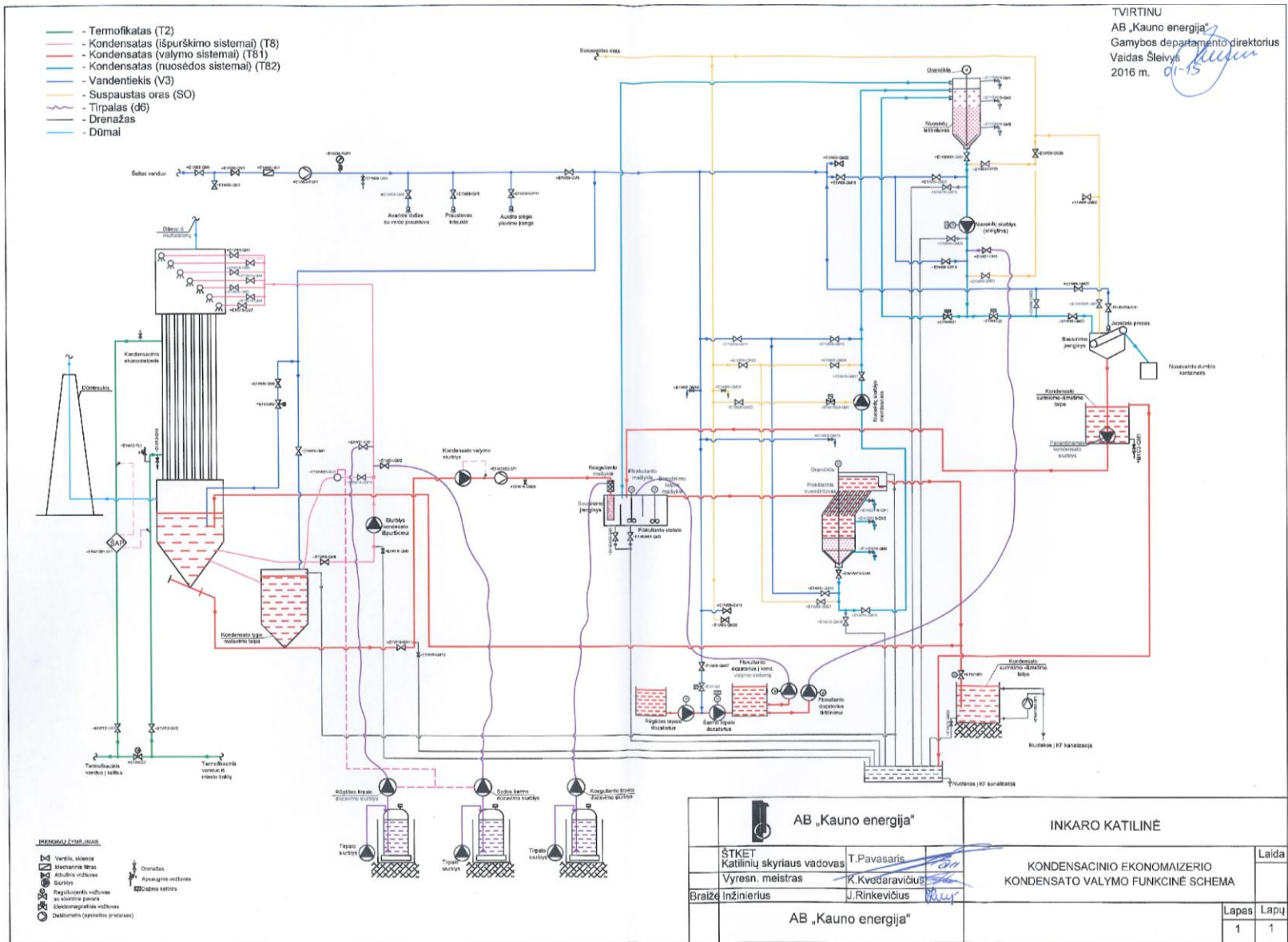


BT	fBT	kc-	WI, m/s	Wslyd, m/Td,K	Wd, m/s	Pa,proc	pg						
19.45042	0	1.082228	1.516836	0.017334	5.685015	-113.859	3.02868	470	2.656335	1.06229	3.452808	0	0.25
21.87709	-0.12338	1.081144	1.603299	0.020171	5.398094	-113.859	2.741759	470	2.656335	1.180545	3.708932	0.006366	0.25
22.66198	-0.12251	1.080123	1.63049	0.02137	5.128517	-100.093	2.472182	470	2.656335	1.311583	3.98763	0.025642	0.25
22.75687	-0.12107	1.078725	1.633747	0.021785	4.892665	-87.0926	2.236331	470	2.656335	1.449483	4.27698	0.027305	0.25
22.67699	-0.11878	1.076754	1.631005	0.022006	4.687064	-76.085	2.030729	470	2.656335	1.592658	4.574512	0.009453	0.25
22.39809	-0.11548	1.074105	1.621396	0.021979	4.50702	-66.801	1.850686	470	2.656335	1.740475	4.879786	0.045979	0.25
21.96024	-0.11104	1.070712	1.6062	0.021734	4.34857	-58.9477	1.692235	470	2.656335	1.891822	5.191453	0.026315	0.25
21.50493	-0.10541	1.066569	1.590261	0.021492	4.208482	-52.2343	1.552147	470	2.656335	2.046041	5.509032	0.02749	0.25
20.67718	-0.09848	1.061622	1.560952	0.020793	4.084123	-46.464	1.427788	470	2.656335	2.20211	5.831513	0.058186	0.25
19.84896	-0.09029	1.055931	1.531248	0.020099	3.97331	-41.4834	1.316976	470	2.656335	2.359215	6.158016	0.018632	0.25
18.99103	-0.08091	1.049587	1.500144	0.019365	3.874218	-37.1622	1.217883	470	2.656335	2.517087	6.488567	0.020075	0.25
17.9757	-0.07046	1.042691	1.463007	0.018396	3.785321	-33.3917	1.128986	470	2.656335	2.674197	6.821178	0.014114	0.25
16.97842	-0.05913	1.035408	1.426326	0.017441	3.70532	-30.1017	1.048985	470	2.656335	2.832075	7.157514	0.005865	0.25
16.00732	-0.04723	1.027948	1.390574	0.016507	3.633086	-27.2277	0.976751	470	2.656335	2.991815	7.500217	0.001764	0.25
15.06305	-0.03509	1.020518	1.355845	0.015585	3.567642	-24.7125	0.911307	470	2.656335	3.154725	7.851227	-0.00032	0.25
14.11315	-0.02303	1.013306	1.32142	0.014626	3.508147	-22.5064	0.851812	470	2.656335	3.322866	8.212671	-0.02909	0.25
13.2221	-0.01138	1.006503	1.289497	0.013723	3.453875	-20.5668	0.79754	470	2.656335	3.496573	8.587209	-0.01713	0.25
12.3868	-0.00042	1.000252	1.260137	0.012875	3.404202	-18.8563	0.747868	470	2.656335	3.678897	8.977513	-0.01978	0.25
11.61081	0.009636	0.994604	1.233491	0.012086	3.358591	-17.3437	0.702256	470	2.656335	3.871358	9.385402	-0.01743	0.25
10.88974	0.018671	0.989635	1.209391	0.011351	3.316579	-15.9997	0.660244	470	2.656335	4.075021	9.813387	-0.04776	0.25
10.22241	0.026623	0.985336	1.18775	0.01067	3.277771	-14.8007	0.621436	470	2.656335	4.291498	10.26315	-0.04774	0.25
9.604847	0.033502	0.981677	1.168371	0.010038	3.241827	-13.7263	0.585492	470	2.656335	4.521683	10.73625	-0.02671	0.25
9.033188	0.039369	0.978603	1.15105	0.009452	3.208456	-12.7591	0.552121	470	2.656335	4.766385	11.23397	-0.04061	0.25
8.503525	0.044302	0.976054	1.135585	0.008909	3.177405	-11.8844	0.52107	470	2.656335	5.026371	11.75754	-0.01373	0.25
8.012092	0.048412	0.97396	1.121777	0.008403	3.148458	-11.0901	0.492123	470	2.656335	5.302204	12.30797	-0.02556	0.25
7.55385	0.051802	0.972257	1.109446	0.007933	3.121423	-10.3659	0.465088	470	2.656335	5.594475	12.88633	-0.03817	0.25
7.130233	0.054567	0.97089	1.098427	0.007494	3.096137	-9.70312	0.439802	470	2.656335	5.903824	13.49374	-0.0268	0.25
6.733724	0.056815	0.969796	1.088571	0.007085	3.072452	-9.09459	0.416117	470	2.656335	6.230713	14.13114	-0.00391	0.25
6.361678	0.05863	0.968929	1.07971	0.00667	3.05024	-8.53422	0.393905	470	2.656335	6.575751	14.79968	-0.00505	0.25
6.014179	0.060087	0.968247	1.071785	0.00634	3.029386	-8.01681	0.373051	470	2.656335	6.93955	15.50049	-0.00396	0.25
5.689045	0.061252	0.967716	1.064689	0.006002	3.009787	-7.53792	0.353452	470	2.656335	7.322792	16.23486	-0.00544	0.25
5.384371	0.062178	0.967307	1.058329	0.005686	2.991351	-7.09375	0.335016	470	2.656335	7.726202	17.00413	-0.00457	0.25
5.098471	0.062913	0.966995	1.052622	0.005389	2.973995	-6.68103	0.31766	470	2.656335	8.15055	17.80973	-0.00581	0.25
4.829868	0.063492	0.966761	1.047497	0.00511	2.957643	-6.29689	0.301308	470	2.656335	8.59668	18.65319	-0.0062	0.25
4.57726	0.063946	0.966591	1.042891	0.004847	2.942226	-5.93882	0.285982	470	2.656335	9.065475	19.53609	-0.00373	0.25
4.339457	0.064302	0.966469	1.038749	0.004599	2.927682	-5.60458	0.271347	470	2.656335	9.557882	20.46015	-0.00463	0.25
4.115403	0.06458	0.966386	1.035021	0.004366	2.913952	-5.29222	0.257617	470	2.656335	10.07494	21.4272	-0.00569	0.25
3.90414	0.064794	0.966332	1.031664	0.004145	2.900984	-4.99998	0.244649	470	2.656335	10.61771	22.43916	-0.00591	0.25
3.704806	0.064959	0.966304	1.028639	0.003937	2.888729	-4.72629	0.232394	470	2.656335	11.18737	23.49807	-0.0052	0.25
3.516598	0.065084	0.966293	1.025912	0.00374	2.877142	-4.46793	0.220807	470	2.656335	11.78512	24.60605	-0.0052	0.25
3.338802	0.065179	0.966299	1.023453	0.003554	2.866182	-4.22901	0.209847	470	2.656335	12.41226	25.76538	-0.00511	0.25
3.170748	0.06525	0.966313	1.021234	0.003378	2.855811	-4.00297	0.199475	470	2.656335	13.07013	26.9784	-0.00619	0.25
3.011828	0.065302	0.966337	1.019231	0.003212	2.84599	-3.79056	0.189655	470	2.656335	13.76019	28.24765	-0.00451	0.25
2.861472	0.06534	0.966367	1.017421	0.003054	2.836689	-3.59081	0.180355	470	2.656335	14.48393	29.57574	-0.00696	0.25
2.719169	0.065365	0.966402	1.015787	0.002905	2.827878	-3.40284	0.171543	470	2.656335	15.24294	30.96541	-0.00597	0.25
2.584424	0.065382	0.96644	1.01431	0.002763	2.819525	-3.22584	0.163191	470	2.656335	16.03892	32.41962	-0.00581	0.25
2.456793	0.065392	0.966481	1.012975	0.002629	2.811607	-3.05908	0.155272	470	2.656335	16.87359	33.94136	-0.00699	0.25
2.335857	0.065396	0.966524	1.011767	0.002502	2.804096	-2.90187	0.147761	470	2.656335	17.74884	35.53388	-0.00551	0.25
2.221228	0.065396	0.966568	1.010674	0.002381	2.79697	-2.75358	0.140635	470	2.656335	18.66658	37.2005	-0.00515	0.25
2.112539	0.065394	0.966611	1.009685	0.002266	2.790208	-2.61362	0.133873	470	2.656335	19.62886	38.94475	-0.00679	0.25
2.009456	0.065389	0.966656	1.008789	0.002158	2.783788	-2.48148	0.127453	470	2.656335	20.63786	40.77038	-0.00499	0.25
1.911659	0.065383	0.966702	1.007978	0.002054	2.777692	-2.35664	0.121357	470	2.656335	21.69578	42.68124	-0.00676	0.25
1.818853	0.065375	0.966745	1.007243	0.001956	2.771902	-2.23866	0.115567	470	2.656335	22.80504	44.68146	-0.00758	0.25
1.730698	0.065366	0.96679	1.006577	0.001863	2.766401	-2.12711	0.110066	470	2.656335	23.96807	46.77523	-0.00652	0.25
1.646991	0.065357	0.966833	1.005973	0.001775	2.761174	-2.02158	0.104839	470	2.656335	25.1875	48.96711	-0.00648	0.25
1.567499	0.065347	0.966877	1.005426	0.00169	2.756205	-1.92172	0.09987	470	2.656335	26.46612	51.26189	-0.00573	0.25
1.492	0.065337	0.96692	1.004929	0.00161	2.751482	-1.82719	0.095147	470	2.656335	27.80673	53.6644	-0.00507	0.25
1.420273	0.065327	0.96696	1.004479	0.001534	2.74699	-1.73766	0.090655	470	2.656335	29.21245	56.17999	-0.00669	0.25
1.352119	0.065317	0.967001	1.00407	0.001462	2.742718	-1.65285	0.086383	470	2.656335	30.68634	58.81397	-0.00629	0.25
1.287346	0.065307	0.967042	1.003699	0.001393	2.738654	-1.57246	0.082319	470	2.656335	32.23181	61.57217	-0.00656	0.25
1.225773	0.065296	0.967082	1.003363	0.001327	2.734788	-1.49626	0.078453	470	2.656335	33.85242	64.46073	-0.00546	0.25
1.167231	0.065286	0.96712	1.003057	0.001265	2.731108	-1.42399	0.074773	470	2.656335	35.55186	67.48599	-0.00505	0.25
1.111565	0.065277	0.967159	1.00278	0.001206	2.727606	-1.35543	0.071271	470	2.656335	37.33381	70.65431	-0.00606	0.25
1.05824	0.065268	0.967196	1.002528	0.001149	2.724272	-1.29037	0.067938	470	2.656335	39.20247	73.97291	-0.00716	0.25
1.00827	0.065258	0.967233	1.002299	0.001095	2.721099	-1.22862	0.064764	470	2.656335	41.16198	77.44886	-0.0069	0.25
0.960365	0.065249	0.967269	1	0.001044	2.718076	-1.16998	0.061742	470	2.656335	43.21696	81.0901	-0.00504	0.25
0.914785	0.06524	0.967303	1	0.000996	2.715198	-1.1143	0.058863	470	2.656335	45.37207	84.90469	-0.00664	0.25
0.871411	0.065231	0.967339	1	0.000949	2.712457	-1.0614	0.056122	470	2.656335	47.63223	88.90109	-0.00592	0.25
0.830113	0.065223	0.967372	1	0.000905	2.709846	-1.01114	0.053511	470	2.656335	50.00269	93.08828	-0.00778	0.25
0.790833	0.065214	0.967405	1	0.000863	2.707358	-0.96337	0.051023	470	2.656335	52.48919	97.47614	-0.00643	0.25
0.75343	0.065207	0.967438	1	0.000823	2.704987	-0.91795	0.048652	470	2.656335	55.09678	102.0733	-0.00787	

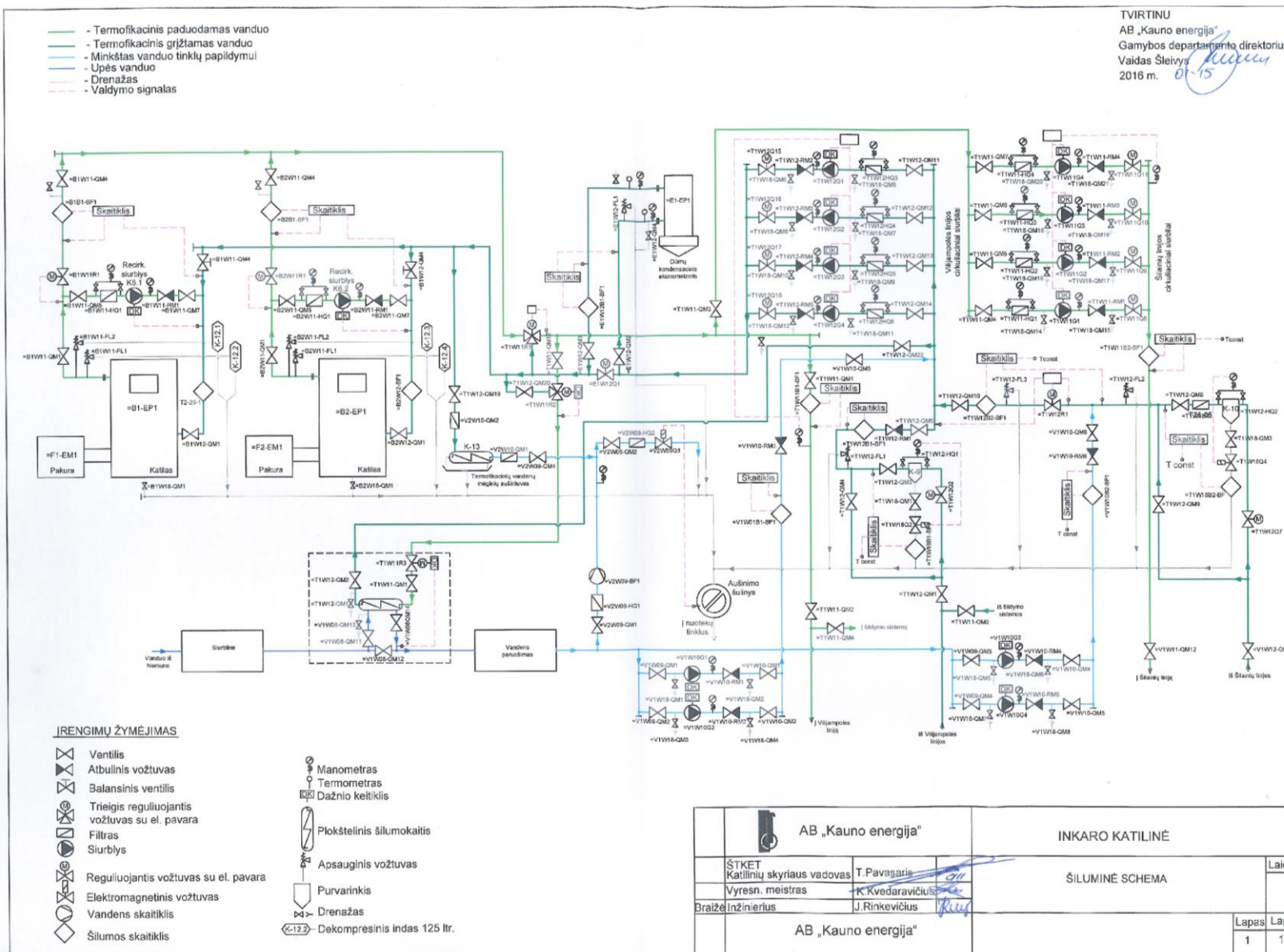
## 2. Dūmų kondensacinio ekonomaizerio valymo schema.



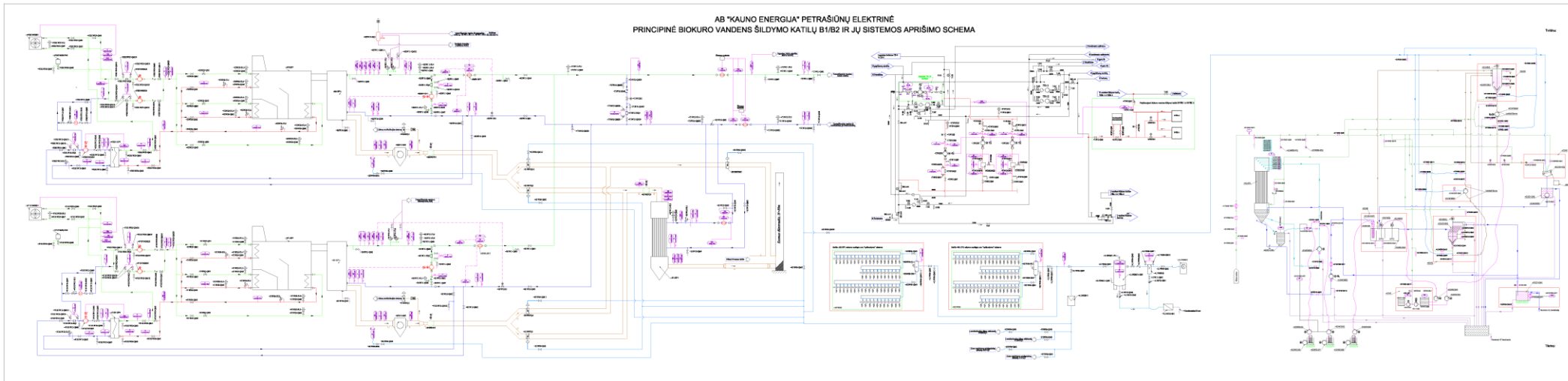
### 3. AB „Kauno energija“ Inkaro katilinės kondensacinio ekonomaizerio kondensato valymo funkcinė schema.



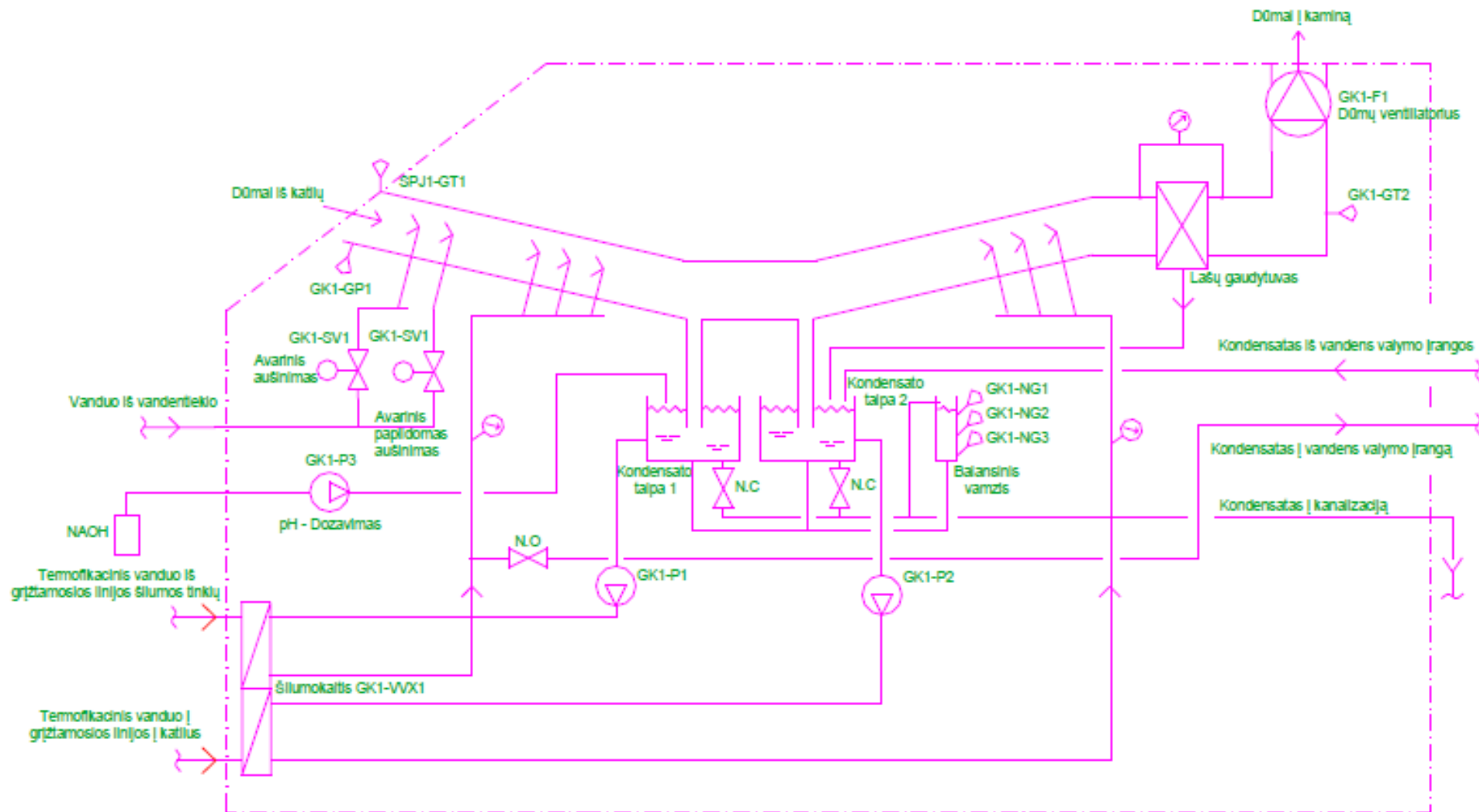
#### 4. AB „Kauno Energija“ Inkaro katilinės šiluminė schema.



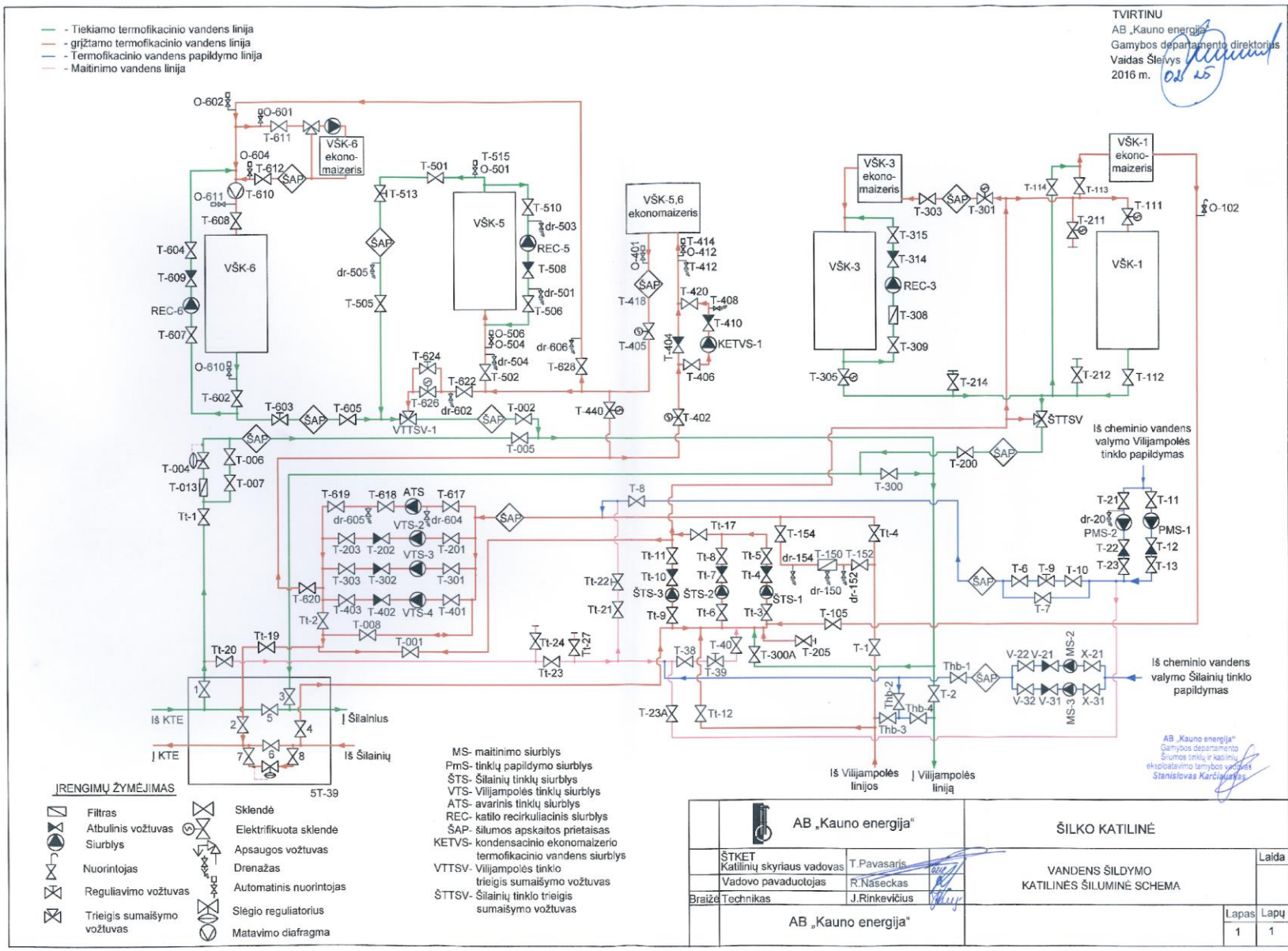
**5. AB „Kauno energija“ Petrašiūnų elektrinės principinė biokuro vandens šildymo katilų ir jų sistemos aprišimo schema.**



## 6. Kondensacinio ekonomaizerio srautų principinė schema Ignalinos ŠT.



# 7. AB „Kauno energija“ Šilko katilinės vandens šildymo katilinės šiluminė schema.



## Vandens lašelių šilumos ir masės mainų biokuro dūmuose modeliavimas

Justina Menkeliūnienė<sup>1</sup>, Gintautas Miliauskas<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kauno technologijos universitetas, Šilumos ir atomo katedra, Studentų g. 56, justina.augustinaite@gmail.com

<sup>2</sup> Kauno technologijos universitetas, šilumos ir atomo energetikos katedra, studentų g. 56, gimil@ktu.lt

Raktiniai žodžiai: biokuro dūmai, vandens įpurškimas, lašelių šilumos ir masės mainai, garo srautas, šilumos utilizavimas

### 1. Įvadas.

Šiuo metu Lietuvos energetikoje ryškėja tendencija deginti biokurą. Tačiau, biokuras yra palyginti drėgnas kuras, kurio net pusę gali sudaryti vanduo. Vėliau šis vanduo pereina į dūmus garų pavidalu. Vandens išgarinimui įdėtą šiluminę energiją galima susigrąžinti juos ataušinant ir iš jų iškondensuojant vandens garą. Ataušinimo procese bus atgaunama auštančių dūmų entalpija, o kondensacijos procese išsiskirs vandens fazinių virsmų šiluma. Būtent fazinių virsmų šilumos iš biokuro dūmų atgavimo problematika yra analizuojama šiame darbe vandens įpurškimo pritaikymo kondensacinių ekonomaizerių technologijose aspektu.

### 2. Kondensaciniuose ekonomaizeriuose vykstantys pernašos procesai ir vandens išpurškimo pritaikymas.

Biokuro deginimo technologijose pritaikomi kontaktinio tipo ir rekuperaciniai kondensaciniai ekonomaizeriai. Kontaktinio tipo kondensaciniuose ekonomaizeriuose garo iškondensavimo iš biokuro dūmų procesas ir termofikacinio vandens pašildymo procesas yra vykdomi atskirai, kur pirmajame kontūre pritaikomas tiesioginis vandens išpurškimas į biokuro dūmus, o antrajame kontūre iš pirmojo kontūro susidaręs kondensatas plokšteliniame šilumokaityje pašildo termofikatą. Rekuperacinio tipo kondensaciniame ekonomaizeriulyje vandens garas iš biokuro dūmų iškondensuojamas jiems tekant spalvotų metalų vamzdelių vidumi kartu jų pluoštą aptekant šildomam termofikatui. Dūmų ir gravitacinės kondensato plėvelės tekėjimo hidrodinamikai užtikrinti viršutinėje kondensacinio ekonomaizerio dalyje virš vamzdelių retinės yra purškiamas vanduo.

Kad tinkamai organizuoti vandens įpurškimą ir optimaliai jį valdyti, būtina gerai pažinti vandens lašelio šilumokaitos biokuro dūmų sraute dėsninumus bei lašelių paviršiuje vykstančių fazinių virsmų kondensacinio ir garavimo režimų savitumus. Juos apibrėžti eksperimentuojant realiomis kondensacinių ekonomaizerių eksploatavimo sąlygomis yra labai keblu. Todėl belieka eksperimentuoti laboratoriniuose stenduose arba teoriškai modeliuoti išpurkšto vandens lašelių sudėtinius šilumos ir masės pernašos procesus. Šiame darbe pasirinkta "lašo" uždavinio analizė.

### 3. Vandens lašelių šilumokaita ir faziniai virsmai biokuro dūmų sraute.

Vandens lašelių ir biokuro dūmų dvifazis srautas apibrėžiamas dūmų  $T_d$  temperatūra ir  $\bar{p}_{g,d}$  drėgnumu bei išpurškiamo vandens  $T_0$  temperatūra, lašelių  $R$  dispersiškumu bei pradiniu slydimo dūmų sraute  $\Delta w_l = w_l - w_d$  greičiu. Modeliuojamas santykinai nedidelio vandens srauto išpurškimo atvejis.

Aprašomas garo srauto lašelio paviršiuje  $m_{g,R}$  tankis, apibrėžiamas lašelio paviršiuje vykstančių fazinių virsmų šilumos srauto tankis. Dūmų šilumokaita lašeliui teikiamos šilumos srauto tankis apibrėžiamas pagal konvekcinių šildymo modelį. Nuselto  $Nu_f = 2\alpha / \lambda_{gd}$  kriterijus lašeliui apibrėžimas pagal [6] metodiką, papildomai įvertinus fazinius virsmus Stefano hidrodinaminio srauto poveikį konvekciniam šildymui pagal [7] rekomendacijas.

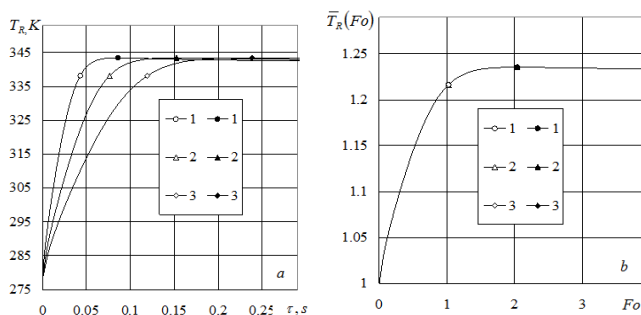
Šilumos srauto lašelyje  $q_{c,l}$  tankis apibrėžiamas pagal šilumos plitimo laidumu lašelyje Furje dėsnio modifikuotą formą. Įvedama bematė lašelio radialinė. Realaus laiko mastelis pakeičiamas Furje kriterijumi išreikštu universalus laiko masteliu.

Numatoma kontrolinė modeliuojama lašelio fazinių virsmų  $Fo_l$  trukmė ir apibrėžiami tarpiniai kontroliniai  $Fo_i$ . Kiekvienam  $Fo_i$  vykdomas iteracinis  $it \equiv 1 \div IT$  ciklas, kuriame apibrėžiama šylančio lašelio paviršiaus

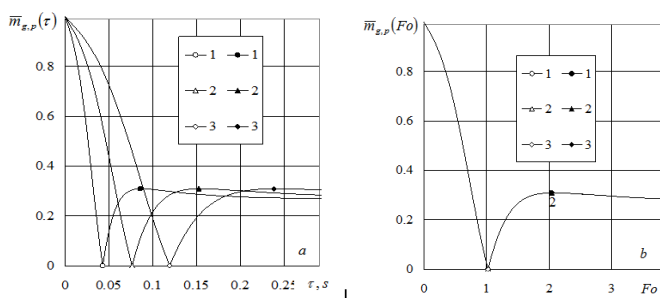


momentinė  $T_{R,i}$  temperatūra. Iteraciniame cikle  $it$ -oje iteracijoje šilumos srautams apibrėžti reikalingas, bet dar nežinomas lašelio  $R_{i,it}$  matmuo, prilyginamas ankstesnėje iteracijoje jau apibrėžtam lašelio  $R_{i,it-1}$  matmeniui. Prielaida  $R_{i,it} \equiv R_{i,it-1}$  taikoma ir lašelio nestacionariojo temperatūros lauko gradientui apibrėžti pagal sudėtinio šilumos plitimo laidumą ir spinduliavimo šilumokaitos lašelyje modelį [7], jam pritaikius  $q_{r,i} = 0$  sąlygą. Po kiekvieno iteracinio ciklo lašelio matmuo patikslinamas, pritaikius lašelio sferiškumo atvejį.

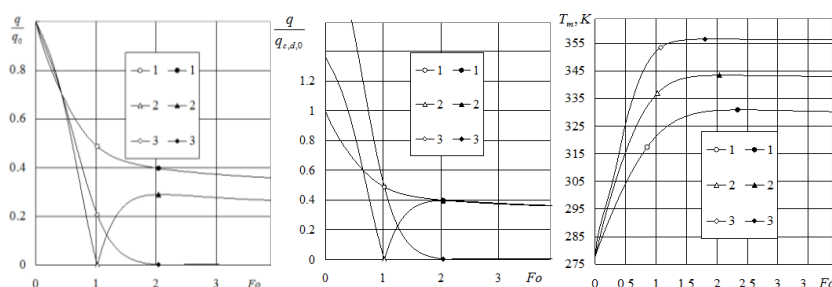
Sumodeliuotas  $T_0 = 278$  K temperatūros vandens lašelių šilimas ir faziniai virsmai biokuro  $T_d = 470$  K temperatūros žemo ( $\bar{p}_{g,d} = 0.05$ ), vidutinio ( $\bar{p}_{g,d} = 0.25$ ) ir aukšto ( $\bar{p}_{g,d} = 0.5$ ) drėgnumo dūmuose silpno ( $Re_0 = 5$ ), vidutinio ( $Re_0 = 15$ ) ir stipraus ( $Re_0 = 45$ ) lašelio slydimo dūmų sraute atvejais. Visais modeliuotais atvejais buvo užtikrinta  $T_0 < T_n$  sąlyga, todėl buvo apibrėžti kondensacinis, pereinamojo garavimo ir pusiausviro garavimo režimai.



1 pav. Lašelio paviršiaus temperatūros  $T_R(\tau)$  funkcijos grafikų jautrumas lašelių dispersiškumui (a) ir  $\bar{T}_R(Fo) = T_R(Fo)/T_0$  funkcijų grafikų nejautrumas lašelių dispersiškumui.



2 pav. Garo srauto tankio lašelio paviršiuje  $\bar{m}_{g,p}(\tau) = m_{g,p} / m_{g,p,0}$  funkcijos grafikų jautrumas lašelių dispersiškumui (a) ir  $\bar{m}_{g,p}(Fo) = m_{g,p}(Fo) / m_{g,p,0}$  funkcijų grafikų nejautrumas lašelių dispersiškumui.



3 pav. Šilumos srautų lašelio paviršiuje kitimo kondensaciniame ir pereinamojo garavimo režimuose savitumai (a) kondensaciniame ir pereinamojo garavimo režimuose bei pusiausviro garavimo pradinėje stadijoje (b) bei biokuro dūmų drėgnumo įtaka lašelių šilimui (c).

Skaitinio eksperimento rezultatai apibendrinti grafiškai (1-3 pav.) ir žemiau pateikiamomis išvadomis.

### 3. Išvados

Biokuro dūmų drėgnumas, vandens išpurškimo dispersiškumas bei lašelių šilumokaitos sąlygos yra labai svarbūs faktoriai, apibrėžiantys vandens lašelių pereinamųjų fazinių virsmų režimo dėsninumus. Į šiuos faktorius būtina atsižvelgti apibrėžiant optimalias vandens išpurškimo kondensacinių ekonomaizerių technologijose sąlygas.

Vandens lašelių pereinamųjų fazinių virsmų kondensacinio ir garavimo režimų modeliavimo efektyvumui labai svarbu tai, jog pernašos  $P$  parametru bematės formos  $\bar{P}(Fo) \equiv P(Fo)/P_0$  funkcijų atitinkamų parametru grafikai yra nejautrūs vandens išpurškimo dispersiškumui, jeigu skirtingo skersmens lašelius apjungti vienodo Reinoldso  $Re_0$  kriterijaus grupėje. Tai sudaro galimybę sumodeliuoti laisvai parinkto stambumo lašelių fazinių virsmų ciklą ir jo rezultatus išplėsti norimo dispersiškumo lašeliams.

Būtina atsižvelgti, jog funkcijų  $\bar{P}(Fo)$  grafiku universalumas galios tik tam skirtingo skersmens lašelių ansambliui, kuriame šilumokaitos ir masės mainų pradines sąlygas apibrėžiantys  $T_0$ ,  $Re_0$ ,  $T_g$  ir  $\bar{p}_{g,d}$  parametrai visiems lašeliams bus tokie patys.

#### Literatūra:

1. Nacionalinė energetinės nepriklausomybės strategija: [www.enmin.lt/lt/nes/strategija.pdf](http://www.enmin.lt/lt/nes/strategija.pdf).
2. Energetikos ministerijos 2016-2018 metų strateginis veiklos planas: <http://enmin.lrv.lt/uploads/enmin/documents/files/EM%202016-2018%20strateginis%20veiklos%20planas.pdf>.
3. **Marcinauskas K., Korsakienė I.** 2006. Žemiausio ramos taško temperatūros vėsinamų dūmų šilumos panaudojimo galimybių įvertinimas. Energetika 4.
4. **S.N. Shorin.** 1964. Teploperedacha, Vishaja Shkola, Moskva.
5. **Miliauskas G.** 2014. Grynojo skysčio lašelių fazinių virsmų režimų universalusis ciklas. 1. Ciklo sudarymo metodas ir pernašos procesų skaitinio modeliavimo metodika. Energetika 2: 77–95.
6. **Abramzon B., Sirignano W. A.** 1989. Droplet vaporization model for spray combustion calculations, *Int. J. of Heat and Mass Transfer* 32: 1605–1618.
7. **Miliauskas G.** 2001. Regularities of unsteady radiative-conductive heat transfer in evaporating semitransparent liquid droplets, *Int. J. Heat Mass Transfer* 44: 785–798.