



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio veikimo optimizavimas

Baigiamasis magistro projektas

Girvydas Brūzga
Projekto autorius

Doc. dr. Rolandas Jonynas
Vadovas

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio veikimo optimizavimas

Baigiamasis magistro projektas
Termoinžinerija (6211EX023)

Girvydas Brūzga

Projekto autorius

Doc. dr. Rolandas Jonynas

Vadovas

**Prof. habil. dr. Gintautas
Miliauskas**

Recenzentas

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos ir dizaino fakultetas

Girvydas Brūzga

Antros pakopos kondensacinio ekonomizerio veikimo optimizavimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

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

Girvydas Brūzga

Patvirtinta elektroniniu būdu



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

Studijų programa: 6211EX023 Termoinžinerija

MAGISTRO BAIGIAMOJO PROJEKTO UŽDUOTIS

Studentui (-ei)

Girvydui Brūzgai

(Vardas, Pavardė)

1. Baigiamojo Projekto tema –

Antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio veikimo optimizavimas

(Lietuvių kalba)

Optimization of the Second Stage Condensing Economizer Performance

(Anglų kalba)

Patvirtinta 2022 m. gegužės mėn. 2 d. dekanų potvarkiu Nr. V25-11-2

2. Darbo tikslas ir uždaviniai –

Darbo tikslas: eksperimentiškai nustatyti antros pakopos degimo produktų kondensacinio ekonomaizerio efektyvaus veikimo režimus, pagrindžiant juos techniniais ir ekonominiais rodikliais.

Uždaviniai:

1. Apžvelgti literatūrą:
 - a) biokuro degimo produktų kondensaciniai įrenginiai;
 - b) kondensaciniuose ekonomaizeriuose vykstančių šilumos ir masės mainų procesų teoriniai ir eksperimentiniai tyrimai;
 - c) šilumos ir masės mainų gerinimo metodai.
2. Eksperimentinio tyrimo metodikos parinkimas.
3. Inžinerinis analitinis ir skaitinis modeliavimai, eksperimentiniai tyrimai.
4. Inžinerinių analitinių ir skaitinių modeliavimų bei eksperimentinių tyrimų rezultatų palyginamoji analizė, ir techninių-ekonominių rodiklių nustatymas.

Studentas

Girvydas Brūzga

(Vardas, Pavardė)

(Parašas)

2022-02-01

(Data)

Baigiamojo
projekto
vadovas

Rolandas Jonynas

(Vardas, Pavardė)

(Parašas)

2022-02-01

(Data)

Brūzga, Girvydas. Antros pakopos kondensacinio ekonomizaierio veikimo optimizavimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Rolandas Jonynas; Kauno technologijos universitetas, mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų kryptių grupė): **Energijos inžinerija.**

Reikšminiai žodžiai: kondensacija, efektyvumas, antros pakopos kondensacinis ekonomizaieris, biokuras.

Kaunas, 2022. 91 p.

Santrauka

Šilumos gamybos įrenginių darbo efektyvumo rodiklių gerinimas yra aktuali technologiniu, ekonominiu ir aplinkosauginiu aspektais sritis, kuri reikalauja itin aukštos kompetencijos ir didelės patirties sukaupusių inžinierių įsitraukimo. Regionuose, kur išvystyta šilumos gamyba deginant biokurą, katilinių efektyvumo didinimo priemonės, tokios kaip pirmos pakopos kondensacinis ekonomizaieris, jau yra puikiai žinomos technologinės srities atstovams, katilinių eksploatuotojams. Lietuvoje, papildomai didinti šilumos gamybos technologijų efektyvumą, įdiegiant absorbcinį šilumos siurbli, pradėta skatinti 2020 metais. Dalinis finansavimas sukūrė padidėjusį absorbcinio šilumos siurblio technologijos vystymo ir diegimo poreikį. Vienas pagrindinių tokios sistemos įrenginių – antros pakopos kondensacinis ekonomizaieris (DKE II).

Magistro tiriamojo baigiamojo darbo projekte analizuojamos galimybės ir priemonės optimizuoti antros pakopos kondensacinio ekonomizaierio, kurio projektinė šiluminė galia 1,2 MW, veikimą. Optimizavimo darbai pradėti dar įrenginio projektavimo stadijoje, remiantis esamos biokuro katilinės ir naujai diegiamo absorbcinio šilumos siurblio darbo parametrais ir parametrų režiais. Šiame etape atlikti inžineriniai šilumos balanso skaičiavimai, įkrovos aerodinaminiai, hidrauliniai ir šilumos bei masės pernašų skaičiavimai. Skaitiniu baigtinių elementų modeliavimu įvertintas DKE II aerodinaminis pasipriešinimas bei parinkta optimali konstrukcija.

Sekančiame etape atlikti eksperimentiniai tyrimai veikiančiame, 1,2 MW šiluminės galios, DKE II įrenginyje, kurių metu nustatyti būdingi parametrai: aerodinaminis pasipriešinimas, temperatūriniai režimai, optimalūs išpurškiamo kondensato srauto debitai skirtingais įrenginio veikimo atvejais, išpurškiamo kondensato lašų dispersijos įtaka išvystomai DKE II šiluminei galiai.

Skaičiuotinių ir tyrimų metu išmatuotų DKE II aerodinaminių pasipriešinimų vertės skyrėsi 9 – 15 %, priklausomai nuo darbo režimų. Eksperimentinių matavimų metu nustatytas optimalus išpurškiamo kondensato kiekis, skirtas vienetiniam atitekančių dūmų tūriui, nuo skaičiuotinių projektinių verčių skyrėsi 10 – 25 %. Optimizavus išpurškiamo kondensato debito vertes pagal eksperimentinių tyrimų rezultatus, elektros energijos sąnaudos, priklausomai nuo darbo režimo, sumažėjo 9 – 21 %. Išpurškiamo kondensato dispersijos kokybės gerinimo tyrimų metu nustatytas 5 – 20 % DKE II šiluminės galios didinimo potencialas.

Brūzga, Girvydas. Optimization of the Second Stage Condensing Economizer Performance. Master's Final Degree Project/ supervisor assoc. prof. dr. Rolandas Jonynas; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: condensation, efficiency, second stage condensing economizer, biofuel.

Kaunas, 2022. 91 pages.

Summary

Improving the efficiency of heat production facilities is an area that is technologically, economically and environmentally relevant and requires the involvement of highly skilled and experienced engineers. In regions where the production of heat by burning biofuels is developed, measures to increase the efficiency of boiler houses, such as the first-stage condensing economizer, are already well known to the representatives of the technological field, boiler house operators. In Lithuania, the increase of the efficiency of heat production technologies by installing an absorption heat pump was started in 2020. Co-financing has created an increased demand for the development and installation of absorption heat pump technology. One of the main devices of such a system is a second stage condensing economizer (FGC II).

In this project of the master's thesis it is analyzed the possibilities and solutions to optimize the operation of the second stage condensing economizer with a design thermal capacity of 1.2 MW. Optimization works were started at the design stage of the plant, based on the operating parameters and parameters range of the existing biofuel boiler house and the newly installed absorption heat pump. At this stage, engineering heat balance calculations, aerodynamic, hydraulic pressure resistance and heat and mass transfer calculations were performed. The aerodynamic resistance of FGC II was evaluated by numerical finite element modeling and the optimal design was selected.

In the next stage, experimental studies were performed in the operating 1.2 MW thermal power plant, FGC II, during which the characteristic parameters were determined: aerodynamic resistance, temperature modes, optimal spray condensate flow rates in different cases, the influence of spray condensate droplet dispersion on FGC II.

The values of FGC II aerodynamic resistance calculated and measured during the studies differed by 9 - 15%, depending on the operating modes. During the experimental measurements, the optimal amount of sprayed condensate per unit volume of incoming flue gas differed from the calculated design values by 10 - 25%. After optimizing the flow values of the sprayed condensate according to the results of experimental studies, the electricity consumption, depending on the operating mode, decreased by 9 - 21%. The potential for increasing the thermal power of 5 - 20% of FGC II was found in the research of improving the quality of the sprayed condensate dispersion.

Turinys

Lentelių sąrašas	9
Paveikslų sąrašas	10
Santrumpų ir terminų sąrašas	12
Įvadas.....	13
1 Kondensacijos proceso fizikinis mechanizmas	14
1.1 Rasos taškas.....	15
1.2 Paviršinė ir tūrinė kondensacija.....	16
1.2.1 Paviršinė kondensacija ir fluideo tekėjimo režimai	17
1.2.2 Vandens lašelio garavimo ir kondensacijos modelis tūryje	20
2 Technologiniai kondensacijos įrenginiai	23
2.1 Technologinių kondensacijos įrenginių klasifikavimas	23
2.1.1 Regeneraciniai šilumokaičiai.....	23
2.1.2 Rekuperaciniai šilumokaičiai	24
2.1.3 Tiesioginio kontakto šilumokaičiai	25
3 Antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio technologijos projektavimas	27
3.1 Pradinių projektinių duomenų identifikavimas	27
3.2 Pagrindinė, naujai projektuojama DKE II ir AŠS įranga	29
3.2.1 Biokuro katilinės šiluminio balanso charakteringų parametų apskaičiavimas, degimo produktų likutinės šiluminės energijos potencialo nustatymas	30
3.2.2 Pirminis absorbcinio šilumos siurblio parinkimas ir pritaikymas	35
3.2.3 Antros pakopos dūmų kondensacinio ekonomaizerio technologijos parinkimas.....	39
3.3 Žemos temperatūros kondensacinių ekonomaizerio empirinių duomenų apžvalga.....	40
4 Antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio projektavimas.....	43
4.1 Antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio šiluminės galios potencialo įvertinimas	43
4.2 šilumos ir masės mainų išvystyto paviršiaus įkrovos projektavimas ir parinkimas.....	45
4.2.1 Įkrovos elementų charakterizavimas ir mechaninių kriterijų nustatymas	46
4.2.2 Įkrovos elementų hidrodinaminis ir termodinaminis projektiniai skaičiavimai.....	48
4.2.3 Kondensato išpurškimo sistemos projektavimas.....	53
4.2.4 Aerodinaminis antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio modeliavimas baigtinių elementų metodu konstrukcijos gabaritui nustatyti.....	56
5 Antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio darbo optimizavimo eksperimentiniai tyrimai	62
5.1 Eksperimentinio tyrimo tikslai ir metodika.....	63
5.1.1 Dūmų temperatūros matavimas charakteringuose ruožuose	64
5.1.2 Kondensato temperatūros matavimas.....	65
5.1.3 Antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio dūmų trakto aerodinaminio pasipriešinimo matavimas.....	66
5.1.4 Išpurškiamo kondensato linijos slėgio matavimas	66
5.1.5 Dūmų srauto greičio matavimas dūmų kanaluose.....	67
5.2 Eksperimentinių tyrimų planas ir eiga.....	68
5.3 Eksperimentinių tyrimų rezultatai	70
5.3.1 Eksperimentinis tyrimas Nr. 1	71
5.3.2 Eksperimentinis tyrimas Nr. 2.....	76
5.3.3 Eksperimentinis tyrimas Nr. 3.....	82

5.4 Eksperimentinių tyrimų metu nustatytų priemonių panaudojimo apibendrinimas	87
Išvados	89
Literatūros sąrašas	90

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Vandens slaptosios garavimo šilumos reikšmių suvestinė.....	15
2 lentelė. Energetiniai esamos biokuro katilinės įrenginių rodikliai.....	27
3 lentelė. Esamos biokuro katilinės aplinkosauginių rodiklių ribos	28
4 lentelė. Naujai projektuojamo AŠS ir DKE II įrenginių sistemos pagrindiniai, reikiami užtikrinti, rodikliai.....	28
5 lentelė. Esamos biokuro katilinės skaičiuotinių ir projektuojamų įrenginių charakteringų darbo parametrų suvestinė.....	30
6 lentelė. Skaičiavimuose naudojamo biokuro kokybiniai parametrai	33
7 lentelė. Skaičiavimuose naudojamo biokuro techninės charakteristikos	34
8 lentelė. Absorbcinio šilumos siurblio techniniai ir darbiniai parametrai	37
9 lentelė. Antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio garantinio taško apibrėžti ir apskaičiuoti parametrai	43
10 lentelė. Įkrovos elementų cheminio suderinamumo palyginimas.....	47
11 lentelė. Įkrovos elementų plastikų mechaninių charakteristikų palyginimas.....	47
12 lentelė. Įkrovos hidrodinaminių ir termodinaminių skaičiavimų programiniu paketu „VFF – Packed tower design V14.1“ rezultatų suvestinė.....	50
13 lentelė. Išpurškiamo fluido fizikinės savybės	53
14 lentelė. TF48 purkštukų darbo slėgio ir srauto priklausomybė nuo veikiančių purkštukų kiekio.....	55
15 lentelė. Skaitinio modeliavimo, atlikto programinės įrangos „SolidWorks“ plėtinio „FlowSimulation“ aplinkoje, rezultatai	59
16 lentelė. Matavimo taškuose Nr.1 ir 8 naudojamų temperatūros jutiklių charakteristikos.....	64
17 lentelė. Dūmų temperatūros matavimo termoporomis sistemos charakteristikos.....	65
18 lentelė. Kondensato temperatūros matavimo technologinių jutiklių charakteristikos	66
19 lentelė. Diferencialinio dūmų slėgio jutiklio techninės charakteristikos	66
20 lentelė. Kondensato linijos slėgio jutiklio techninės charakteristikos	67
21 lentelė. Dujų srauto greičio matavimo prietaiso techninės charakteristikos	67
22 lentelė. Eksperimentinio tyrimo Nr.1 ir Nr.2 plano suvestinė	68
23 lentelė. Eksperimentinio tyrimo Nr.3 plano suvestinė	69
24 lentelė. Technoekonominių parametrų priklausomybė nuo L/G parametro	75
25 lentelė. Technoekonominių parametrų priklausomybė nuo L/G parametro	81
26 lentelė. Išpurškiamo kondensato slėgio pokyčio įtakos DKE II galiai ir el. sąnaudoms suvestinė	86

Paveikslų sąrašas

1 pav. Lašelinės kondensacijos ant vėsinaamo paviršiaus modelis	17
2 pav. Plėvelinės kondensacijos ant vėsinaamo paviršiaus modelis.....	18
3 pav. Vandens garo kondensacijos ant vertikalios sienelės ir plėvelės tekėjimo režimų principinis modelis	19
4 pav. Vandens garo kondensacijos ant aušinaamo vertikalaus vamzdelio vidinės sienelės principinis modelis	20
5 pav. Vandens lašelio garavimo, karštesniame dujų sraute, principinis modelis	21
6 pav. Regeneracinis rotacinis šilumokaitis ir principinė veikimo schema	23
7 pav. Rekuperacinio vamzdelinio šilumokaičio principinė technologinė schema	24
8 pav. Tiesioginio kontakto šilumokaičio principinė technologinė schema	25
9 pav. Absorbcinio šilumos siurblio ir antros pakopos degimo produktų kondensacinio ekonomaizerio principinė išpildymo schema bendrame katilinės technologiniame plane.....	29
10 pav. Absorbcinio šilumos siurblio principinė technologinė schema.....	36
11 pav. Antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio projektavimo charakteringų parametų patikros skaičiavimai „MS Excel Visual basic“ programos lange ir rezultatų technologinio vizualumo pateiktis.....	45
12 pav. Skirtingų tipų įkrovos elementų hidrodinaminių ir termodinaminių skaičiavimų programos „VFF – Packed tower design V14.1“ langai	49
13 pav. Fluido purkštuko parinkimo lentelė pagal išpurškiamo srauto priklausomybę nuo modelio tipo ir slėgio.....	54
14 pav. Purkštuko „TF48 90“ išpurškiamų lašų dydžio dispersijos priklausomybė nuo slėgio.....	55
15 pav. Fluido purkštuko ir kondensacinio ekonomaizerio įkrovos techniniai geometriniai parametrai	56
16 pav. Išpurkšto fluido padengiamo skerspjuvio ploto, priklausomai nuo veikiančių purkštukų kiekio ir pozicijos, vizualinė analizė	56
17 pav. Antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio būdingi kintamieji matmenys X_1 , X_2 ir X_3	57
18 pav. „SolidWorks“ plėtinio „FlowSimulation“ aplinkoje sukurto skaitinio tinklelio kondensacinio ekonomaizerio konstrukcijos fluidų tekėjimo tūryje vaizdinė pateiktis.....	58
19 pav. Skaitinio modeliavimo, atlikto programinės įrangos „SolidWorks“ plėtinio „FlowSimulation“ aplinkoje, rezultatų vaizdinė pateiktis.....	60
20 pav. Optimizuota antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio konstrukcija	61
21 pav. Tyrimų objekto – antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio technologinė schema	62
22 pav. Tiriamos antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio technologinės sistemos pagrindiniai įrenginiai ir jų priklausiniai: 1.dūmų įtekėjimo kanalas, 2.dūmų ištekėjimo kanalas, 3. lašų gaudytuvas, 4. dūmų ventiliatorius, 5. kondensato išpurškimo įranga, 6. tarpinis šilumokaitis, 7. kondensato kolektoriai, 8. antros pakopos kondensacinis ekonomaizeris, 9. absorbcinio šilumos siurblio agregatas.....	63
23 pav. Antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio temperatūrų matavimo taškų schema	64
24 pav. Anemometro „ZS16 ZG1ZG2 – Höntzsch“ gamintojo pateiktos dūmų srauto greičio matavimo gairės: privalomasis dujų srauto greičio profilio įvertinimas bei būtini srauto stabilizacijos ruožai prie ir po mataivmo taško	68
25 pav. L/G kriterijaus įtaka temperatūrų verčių dispersijai antros pakopos kondensaciniame ekonomaizeriye kai $V_{dF}/V_{dN}=0,96$	71

26 pav. L/G kriterijaus įtaka kondensato temperatūros verčių dispersijai antros pakopos kondensaciniame ekonomizaizeryje kai $V_{dF}/V_{dN} = 0,96$	72
27 pav. Šiluminės energijos kiekio paskirstymas vienetiniam degimo produktų temperatūros laipsnio pokyčiui , išlaisvinamas ataušinus dūmus vienu laipsniu kiekvienam degimo produktų temperatūros laipsniui kai užtikrinama $V_{dF}/V_{dN} = 0,96$ ir $\varphi = 100$ % sąlygos.....	73
29 pav. Antros pakopos kondensacinio ekonomizaizero charakteringų ruožų šiluminės galios santykinis pasiskirstymas	73
29 pav. L/G parametro įtaka antros pakopos kondensacinio ekonomizaizero suminiam aerodinaminiam pasipriešinimui.....	74
30 pav. L/G parametro įtaka antros pakopos kondensacinio ekonomizaizero suminei elektros įrenginių momentinei galiai, skirtai vienetinei antros pakopos kondensacinio ekonomizaizero galiai.....	74
31 pav. L/G parametro įtaka antros pakopos kondensacinio ekonomizaizero suminei elektros įrenginių momentinei galiai	75
32 pav. L/G kriterijaus įtaka temperatūrų verčių dispersijai antros pakopos kondensaciniame ekonomizaizeryje kai $V_{dF}/V_{dN} = 0,52$	77
33 pav. L/G kriterijaus įtaka kondensato temperatūros verčių dispersijai antros pakopos kondensaciniame ekonomizaizeryje kai $V_{dF}/V_{dN} = 0,52$	77
34 pav. Šiluminės energijos kiekio paskirstymas vienetiniam degimo produktų temperatūros laipsnio pokyčiui , išlaisvinamas ataušinus dūmus vienu laipsniu kiekvienam degimo produktų temperatūros laipsniui kai užtikrinama $V_{dF}/V_{dN} = 0,52$ ir $\varphi = 100$ % sąlygos.....	78
35 pav. Antros pakopos kondensacinio ekonomizaizero charakteringų ruožų šiluminės galios santykinis pasiskirstymas	79
36 pav. L/G parametro įtaka antros pakopos kondensacinio ekonomizaizero suminiam aerodinaminiam pasipriešinimui.....	80
37 pav. L/G parametro įtaka antros pakopos kondensacinio ekonomizaizero suminei elektros įrenginių momentinei galiai, skirtai vienetinei antros pakopos kondensacinio ekonomizaizero galiai.....	80
38 pav. L/G parametro įtaka antros pakopos kondensacinio ekonomizaizero suminei elektros įrenginių momentinei galiai	81
39 pav. Išpurškiamo kondensato slėgio įtaka dūmų temperatūrų verčių dispersijai antros pakopos kondensaciniame ekonomizaizeryje kai $V_{dF}/V_{dN} = 0,71$, $L/G = 2,43$	83
40 pav. Išpurškiamo kondensato slėgio įtaka dūmų temperatūrų verčių dispersijai antros pakopos kondensaciniame ekonomizaizeryje kai $V_{dF}/V_{dN} = 0,71$, $L/G = 2,43$	84
41 pav. Šiluminės energijos kiekio paskirstymas vienetiniam degimo produktų temperatūros laipsnio pokyčiui , išlaisvinamas ataušinus dūmus vienu laipsniu kiekvienam degimo produktų temperatūros laipsniui kai užtikrinama $V_{dF}/V_{dN} = 0,71$ ir $\varphi = 100$ % , $L/G = 2,43$ sąlygos.....	84
42 pav. Išpurškiamo kondensato slėgio parametro įtaka antros pakopos kondensacinio ekonomizaizero suminei elektros įrenginių momentinei galiai.....	85
43 pav. Antros pakopos kondensacinio ekonomizaizero charakteringų ruožų šiluminės galios santykinis pasiskirstymas	86

Santrumpų ir terminų sąrašas

DKE II – antros pakopos kondensacinis ekonomaizeris;

AŠS – absorbcinis šilumos siurblys;

V_{dF}/V_{dN} – faktinio ir nominalaus dūmų srauto santykis;

L/G – išpurškiamo kondensato kiekis, tenkantis vienetiniam dūmų srauto tūriui, $\frac{l}{Nm^3}$;

c_p – savitoji šiluma, $\frac{kJ}{kg \cdot K}$;

F – šilumos mainų plotas, m^2 ;

G – masinis debitas, kg/s ;

h – entalpija, kJ/kg ;

l – tekėjimo kanalo ilgis, m ;

\dot{m} – masinis debitas, kg/s ;

Nu – Nuselto kriterijus;

k – šilumos perdavimo koeficientas, $\frac{W}{m^2 \cdot K}$;

Re – Reinoldso kriterijus;

Q – katilo galia, kW ;

q – šilumos srautas, $\frac{W}{m^2}$;

V – tūrinis debitas, m^3/s ;

w – srauto greitis, $\frac{m}{s}$;

α – šilumos atidavimo koeficientas, $\frac{W}{m^2 \cdot K}$;

ΔT – temperatūrų skirtumas tarp šildančios ir šildomos terpių, K ;

η – naudingumo koeficientas, %.

Ivadas

Šilumos gamybos sektoriaus įrenginių optimizavimas mažinant investicinius kaštus ir gamybos sąnaudas yra neatsiejama strategijos dalis mažinant iškastinio kuro naudojimą regione [1]. Biokurą deginančių ir šilumą gaminančių įrenginių modernizavimas bei naujų technologijų, didinančių bendrą katilinių efektyvumą, diegimas prisideda prie šiltnamio efektą sukeliančių dujų išmetimų mažinimo ir klimato kaitos padarinių švelninimo. Tokių taikomųjų technologijų įsigijimą skatina ir pagal klimato kaitos programos lėšų naudojimo programą dalinai finansuoja aplinkos projektų valdymo agentūra (APVA) [2]. Viena iš dalinio finansavimų technologijų – absorbcinis šilumos siurblys (AŠS) su antros pakopos kondensaciniu ekonomaizeriu (DKE II). Nors absorbcinių šilumos siurblių technologija jau daugiau kaip 20 metų taikoma įvairiose pramonės šakose ir pastatų eksploatavimo srityje, dėl santykinai didelių investicinių kaštų už vienetinį atgaunamos energijos kiekį, verslo ir pramonės subjektams tai neatrodė itin patraukli niša nuosavų lėšų investicijai iki 2020 metų, kuomet APVA paskelbė pirmuosius kvietimus juridiniams asmenims teikti paraiškas paramai gauti.

Dalinai finansuojama, absorbcinio šilumos siurblio antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio sistema šilumos tiekimo įmonėms tapo patrauklia katilinių efektyvumo didinimo priemone. Pastaroji technologija potencialiai padidina šilumą gaminančių įrenginių efektyvumą 7 – 12 % nuo katilų galios. Norint pasiekti tokį rezultatą, absorbcinio šilumos siurblio ir antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio įrenginiai privalo būti itin kruopščiai technologiškai tarpusavyje suderinti. Antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio šiluminę galią ir šilumos nešėjo (kondensato arba technologinio skysčio) temperatūrinius režimus apibrėžia absorbcinis šilumos siurblys. Norint pasiekti ir užtikrinti didžiausią projektuojamą sistemos našumą, antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio veikimas privalo būti orientuotas į reikiamų parametų užtikrinimą absorbcinio šilumos siurblio garintuvo kontūro šilumokaičiui.

Priešingai nei pirmos pakopos kondensaciniame ekonomaizeryje, antros pakopos įrenginyje netinkamas analogiškas valdymo principo sprendinys – didinti technologinio vandens srautą, siekiant padidinti įrenginio efektyvumą. Antroje pakopoje didinant srautą, absorbcinio šilumos siurblio kontūrai tiekiamas šilumos nešėjo temperatūrinis režimas nutolsta nuo projekcinio ir AŠS nuimamos šiluminės energijos kiekis mažėja. Tinkamai suprojektuotas ir technologiškai suderintas DKE II gali sumažinti investicinių kaštų dydį, padidinti bendrą efektyvumą charakteringuose darbo taškuose bei sumažinti eksploatacines sąnaudas atitinkamuose darbo režimuose.

Antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio projektavimo stadijoje atlikti inžineriniai skaičiavimai, skaitiniai modeliavimai leidžia parinkti optimalų gabaritą, konstrukciją, jos medžiagą bei taip minimizuoti įrenginio kainą galutiniam perkančiajam subjektui. Kadangi antros pakopos kondensaciniame ekonomaizeryje vyksta sudėtingi šilumos ir masės mainų procesai, projektavimo metu atsiranda paklaidos, kurių neįmanoma įvertinti neatlikus empirinių bandymų.

Baigiamojo tiriamojo projekto metu buvo atlikti eksperimentiniai tyrimai realiame, veikiančiame DKE II įrenginyje. Tyrimų rezultatai palygini su projektavimo stadijoje apskaičiuotais bei atliktos korekcijos realaus įrenginio valdyme, leidžiančios palaikyti optimalų DKE II ir AŠS darbą, kuomet skirtingais darbo parametų režimais, užtikrinamas maksimalus pagaminamos šiluminės energijos kiekis su mažiausiomis elektros energijos sąnaudomis.

1 Kondensacijos proceso fizikinis mechanizmas

Šiame baigiamojo projekto darbe bus analizuojamas vandens garo kondensacijos kompleksinis organizuotas technologinis procesas bei jo techninis – ekonominis veikimo optimizavimas antros pakopos degimo produktų kondensaciniame ekonomizaizeryje.

Kondensacija – vėsinamų arba tuo pačiu metu vėsinamų ir slegiamų dujų virtimas skysčiu. Šis procesas yra egzoterminis – kurio metu išsiskiria šiluma ir tik šiluminės energijos nuvedimo atveju kondensacija gali tęstis. Vandens garo kondensacijos metu lygiagrečiai vyksta keli procesai: šilumos ir masės mainai. Tai yra sudėtingai matematiškai aprašomas kompleksinis procesas, ypač kondensacijoje dalyvaujant ne tik besikondensuojančioms dujoms, bet ir nesikondensuojančioms [3].

Pagal energijos tvermės dėsnį galioja fizikinė tiesa: sunaudotas energijos kiekis medžiagos išgarinimui yra lygus energijos kiekiui gaunamam sukondensavus tą patį kiekį medžiagos ekvivalentėmis sąlygomis. Kondensacija vyksta dujoms sąveikaujant su aplinka, kurioje egzistuoja molekulės ar jų dariniai su mažesniu įšilimo laipsniu nei kritinė, vadinamoji garų įsotinimo temperatūra arba rasos taško temperatūra. Besikondensuojančių dujų rasos taško temperatūra apibrėžiama įvertinus bendrame fluidų mišinyje esančių charakteringų dujų parcialinį (dalinį) slėgį [4].

Kondensacijos reiškinys svarbus ne tik gamtoje, kuomet susidaro rasa, rūkas, šerkšnas, debesys, sniegas, bet ir plačiai naudojamas technologiniuose procesuose pramoniniame bei buitiniame lygmenyse:

- garo turbinos kondensatorius;
- degimo produktų kondensacinis ekonomizaizeris;
- šaldymo įrenginių šaltnešių sistemos;
- drėgmės rinktuvai.

Vandens garas – molekulių junginys, kurio skystoji forma Žemėje yra labiausiai paplitęs ir nepamainomas fluidas savo fizikinėmis, pritaikomumo ir prieinamumo savybėmis. Nepaisant, kad tai yra be galo svarbus fluidas žmogaus gyvenime biologine, technologinio pažangumo ir tvarumo prasme, iki šiol mokslinės bendruomenės, jų nariai, specialistai vis dar vedami dideliu entuziazmu ir nežinomybės tyrinėja vandens fazinių virsmų procesus, siekia sukurti skaičiuojamuosius algoritmus, leisiančius sudaryti prognozinčius modelius, esant skirtingoms tiriamos sistemos sąlygoms. Prognozinčių kondensacijos procesų modelių tikslumas svariai priklauso nuo empirinių pataisų koeficientų, identifikuotų praktinių eksperimentų metu.

Vanduo sutinkamas trijų agregatinių būsenų:

- kietoji (ledas),
- skystoji (vanduo),
- dujinė (vandens garas).

Vandens virsmas garu (garavimas) ir atvirkščias vyksmas šiam procesui – vandens garo virsmas vandeniui (kondensacija) yra sudėtingi procesai, kurių metu yra sunaudojamas arba išlaisvinamas didelis kiekis šiluminės energijos. Ši energinė virsmų dedamoji vadinama slaptąja garavimo šiluma arba fazinių virsmų šiluma [5], kurios vertės prie atitinkamų aplinkos sąlygų pateiktos 1 lentelėje [6].

1 lentelė. Vandens slaptosios garavimo šilumos reikšmių suvestinė

Temperatūra	Vandens garo slėgis	Slaptoji garavimo šiluma
	[kPa]	
[°C]	[100·bar]	[kJ/kg]
0,01	0,61165	2500,9
10	1,2282	2477,2
20	2,3393	2453,5
30	4,247	2429,8
40	7,3849	2406
50	12,352	2381,9
60	19,946	2357,7
70	31,201	2333
80	47,414	2308
90	70,182	2282,5
100	101,42	2256,4
120	198,67	2202,1
140	361,54	2144,3
160	618,23	2082
180	1002,8	2014,2
200	1554,9	1939,7
240	3346,9	1765,4
280	6416,6	1543
320	11284	1238,4
360	18666	719,8
373,95	22064	0

Fazinių virsmų metu sunaudojamas arba išlaisvinamas šilumos kiekis yra santykinai didelis, lyginant su fizine šiluma, fluidui šylant ar vėstant be fazinių virsmų. Dėl šios priežasties, energetiniuose pramoniniuose šilumokaitos įrenginiuose net mažiausias kondensacijos proceso suintensyvinimas gali duoti pastebimą ir ekonomiškai įvertinamą naudą.

Dėl kondensacijos proceso sudėtingumo ir neapibrėžtumų gausos, pramoniniai energetiniai šilumokaitos įrenginiai neretai projektuojami su didele atsarga, dėl ko padidėja įrenginio gabaritai ir gamybiniai kaštai ir pradinės investicijos dydis užsakovui.

1.1 Rasos taškas

Rasos taškas apibrėžiamas kaip konkreti temperatūros vertė, kurioje esančios dujos ar jų mišinys nebegali daugiau savyje talpinti bei išlaikyti vandens ar kitų, besikondensuojančių dujų garų pavidalu, todėl dalis besikondensuojančių dujų, priklausomai nuo dalinio slėgio bendrame dujų mišinyje, privalo kondensuotis ir iškristi vandens lašeliais [7].

Rasos taško temperatūros vertė visada yra žemesnė arba lygi dujų mišinio temperatūros vertei. Kuomet rasos taško temperatūra yra lygi dujų mišinio temperatūrai, laikoma, kad santykinė oro drėgmė – 100 % ir dujų mišinys yra pilnai išotintas besikondensuojančiomis dujomis. Pavyzdžiui, aplinkos oro ir vandens garo mišinyje, vandens garų kondensacijos temperatūrą nulemia drėgmės kiekis ore. Kuo oro ir vandens garo mišinyje didesnę dalį sudaro vandens garas, tuo aukštesnė rasos taško temperatūra. Santykinai sausą orą, kuriame yra žemas dalinis vandens garo slėgis, sunkiau sukondensuoti, nes mažėjant drėgmės kiekiui dujose, rasos taško temperatūra taip pat žemėja ir siekiant inicijuoti kondensacijos procesą, privaloma sąlyga – su oru turi kontaktuoti paviršiai arba dujos, žemesnės nei rasos taško temperatūra.

Santykinis oro drėgnis gali būti apibrėžiamas kaip vandens garo momentinio tankio santykis su soties vandens garo tankiu ir yra išreiškiamas procentais (žr. 1 formulę) [8]. Santykinis drėgnis turi reikšmę tik iki vandens virimo temperatūros atitinkamo slėgio terpėje. Vėliau šis parametras praranda prasmę ir yra naudojamas tūrinis srauto drėgnumas.

$$RH(in) = \frac{\rho_{av}}{\rho_{sv}} \cdot 100\% \quad (1)$$

čia: $RH(in)$ – santykinis oro drėgnis, %;

ρ_{av} – vandens garo momentinis tankis, g/m^3 ;

ρ_{sv} – soties vandens garo tankis, g/m^3 .

Santykinis drėgnumas taip pat gali būti apibūdinamas kaip vandens garo momentinio slėgio santykis su soties vandens garo slėgiu (žr. 2 formulę) [9].

$$RH = \frac{P_{av}}{P_{sv}} \cdot 100\% \quad (2)$$

čia: RH – santykinis oro drėgnis, %;

P_{av} – vandens garo momentinis slėgis, Pa;

P_{sv} – soties vandens garo slėgis, Pa.

1.2 Paviršinė ir tūrinė kondensacija

Kondensacija, tai procesas, kurio metu prie tam tikro slėgio fluidas, pavyzdžiui, vandens garas, pakeičia agregatinę būseną iš dujų į skystį – vandenį. Procesas prasideda kai oras ar kitas dujų mišinys tampa prisotintas, o tai yra susiję su temperatūros pažemėjimu arba su vandens garų kiekio padidėjimu. Dažniausiai kondensacijos vyksmo priežastimi yra šilumos mainai. Jeigu tomis pačiomis sąlygomis orą ar kitas dujas, prisotintas drėgmės, ar tiesiog be priemaišų esantį vandens garą vėsinsime paviršiaus ar kito fluideo pagalba, konvekcijos arba laidumo būdu, šilumos pernaša lems atvėsusių dujų kondensavimąsi ore ar ant paviršių.

Praktikoje tiriami du kondensacijos būdai:

- paviršinė,
- tūrinė.

1.2.1 Paviršinė kondensacija ir fluideo tekėjimo režimai

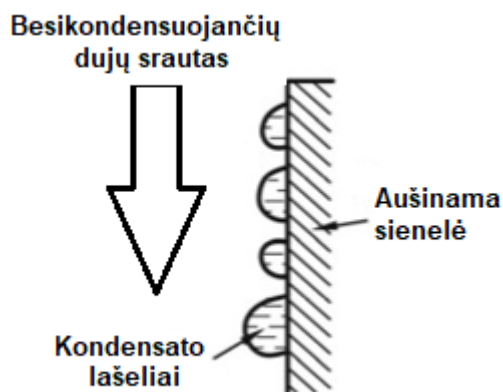
„Paviršinė kondensacija susiformuoja tada, kai sotus garas susiliečia su paviršiumi, kurio temperatūra yra žemesnė už prisotinimo temperatūrą“ [9]. Jeigu garas yra perkaitintas, pirmiausiai kontaktuodamas su paviršiumi jis atvėsta ir tampa sočiuoju garu, tik tada prasideda kondensacijos procesas. Paviršinė kondensacija vyksta kuomet šiluminė energija iš besikondensuojančio garo perduodama kondensacijos paviršiui. Fazinių virsmų būtina sąlyga – nuo besikondensuojančio garo turi būti nukreipiamas šilumos kiekis, lygus fazinių virsmų šilumai ir sutartinai žymima raide r . Slaptosios garavimo šilumos matas – Džaulis kilogramui vandens (J/kg). Šis matas nurodo kiek reikia suteikti vandens masės vienetui šiluminės energijos, kad šis būtų išgarintas arba koks šiluminės energijos kiekis turi būti išlaisvinamas, siekiant sukondensuoti vienetinį vandens garo masės kiekį.

Paviršinė kondensacija gali būti skirstoma į:

- lašelinę,
- plėvelinę.

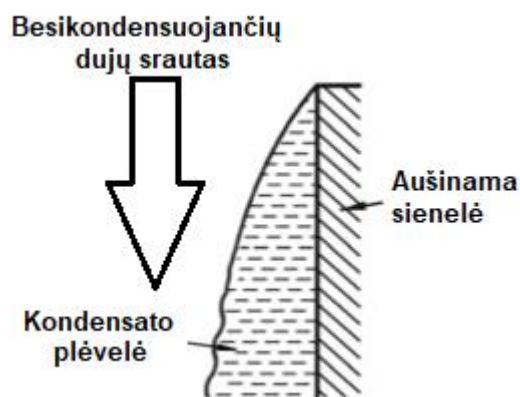
Lašelinės kondensacijos metu ant paviršiaus sugeneruojami jo nedrėkinantys lašeliai. Taip pat lašeliai gali susidaryti ir oro, dūmų ar kitų, besikondensuojančių ir nesikondensuojančių dujų ir jų mišinių srauto tūryje. Esant plėvelinei kondensacijai, paviršius yra drėkinamas besikondensuojančių dujų kondensatu ir pasidengia vientisa kondensato plėvele.

Lašeline kondensacija vadinamas procesas, kuomet kondensatas nusėda ant aušinimo paviršiaus lašelių pavidalu. Lašelinė kondensacija vyksta, kai aušinimo paviršiaus skystis nedrėkina, pavyzdžiui, kai ant aušinimo paviršiaus yra plonas aliejaus turinčios medžiagos sluoksnis. Toks paviršius yra vadinamas hidrofobiniu.



1 pav. Lašelinės kondensacijos ant vėsinamo paviršiaus modelis

Kondensacijos metu ant aušinamo paviršiaus susidaro fluideo sluoksnis – plėvelė, kondensacija laikoma plėveline. Lašelių kondensatas įvyksta, kai aušinimo paviršiaus nešlapina skystis, pavyzdžiui, kai ant aušinimo paviršiaus yra plonas aliejaus (arba bet kurio skysčio, kurio paviršiaus įtempimas yra mažas) sluoksnis.



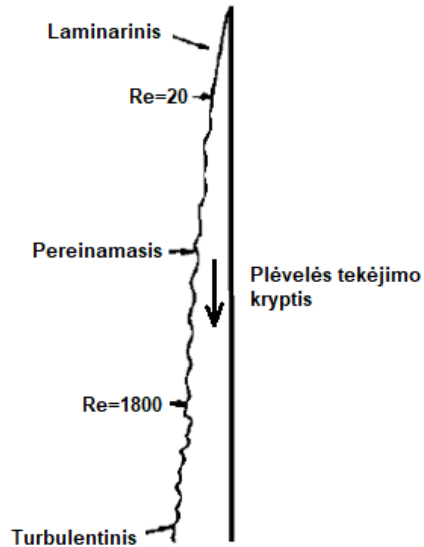
2 pav. Plėvelinės kondensacijos ant vėsinaimo paviršiaus modelis

Esant lašų kondensacijai, šilumos perdavimo koeficientas yra keletą kartų didesnis nei esant plėvelinei kondensacijai. Harbijos universiteto mokslinė komanda, tyrinėjanti vandens garo kondensacijos procesus vertikaloje sistemoje kartu su nesikondensuojančiomis dujomis, eksperimentinių tyrimų metu nustatė, kad lašelinės kondensacijos proceso metu šilumos perdavimo koeficientas yra 5 – 15 kartų didesnis už plėvelinės kondensacijos. Eksperimentinių tyrimų metu nustatytas kondensacijos šilumos perdavimo koeficientas svyruoja nuo 10 iki 120 kW/(m²·K) [10].

Itin plačios kondensacijos šilumos perdavimo koeficiento vertės ribos paaiškinamos tuo, kad dėl susidarančių tarpų tarp kondensato lašų, besikondensuojantis vandens garas gali tiesiogiai kontaktuoti su vėsinančiuoju paviršiumi, o plėvelinės kondensacijos metu tarp aušinančiojo paviršiaus ir garų susidaro tekanti, atitinkamo storio kondensato plėvelė, kuri, priklausomai nuo storio ir tekėjimo režimo sudaro šiluminę varžą, šilumos perdavimo procesas lėtėja, reikalingas didesnis vėsinančiojo paviršiaus plotas siekiant kompensuoti šilumos perdavimo intensyvumo sumažėjimą.

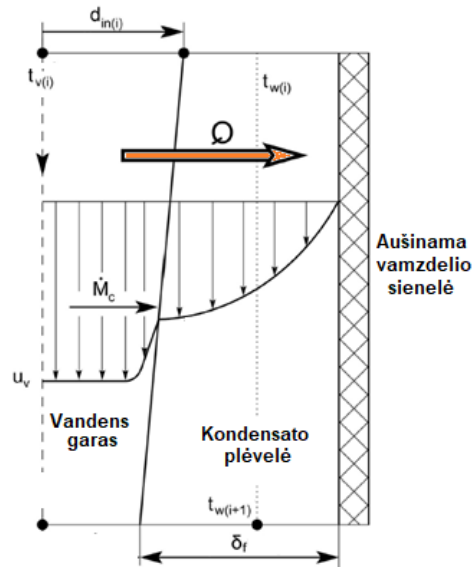
Eksperimentiškai nustatyta, jog aušinamų paviršių šilumokaičiuose, kuriuose vykdomas kondensacijos procesas, nepriklausomai nuo aušinančiojo paviršiaus padėties erdvėje, vyrauja plėvelinė kondensacija ir tik išskirtiniais ar pereinamaisiais ruožais pasitaiko lašelinė kondensacija.

Plėvelinės kondensacijos susidarymui stebėti ir tirti palankiausia pasirinkti vertikaloje aušinamos sienelės modelį. Kondensato plėvelės, ant aušinančiojo paviršiaus, storis palaipsniui didėja kaupiantis kondensatui. Kol kondensato plėvelės storis santykinai mažas, plėvelės tekėjimas yra laminarinis, o jai pastorėjęs, tampa pereinamuoju ar turbulentiu (žr. 2 paveikslą):



3 pav. Vandens garo kondensacijos ant vertikalios sienelės ir plėvelės tekėjimo režimų principinis modelis

Dujų ir skysčio (fluidų) srauto tekėjimo režimas šilumokaičio viduje gali būti laminarinis, pereinamasis ar turbulentinis, o tam tikruose vamzdelio ruožuose vyrauti skirtingi tekėjimo režimai. Pavyzdžiui, vertikaliai pozicionuojamo vamzdelio, kurio išorinį sluoksnį apiplauna aušinantysis fluidas, nesimaišantis su vamzdelio viduje tekančiu fluidų mišiniu, įtekėjimo zonoje dujų (vandens garo ir kitų, nesikondensuojančių dujų) ir skysčio (kondensato) srautas dažniausiai būna chaotiškas, dėl to čia vyrauja turbulentinis tekėjimo režimas. Kondensuojantis dujoms, dėl masės mainų ir atvėsusių dar neišsikondensavusių dujų, tekančių vamzdelio vidumi, dujų mišinio faktinis tūris sumažėja, lygiagrečiai mažėja ir srauto greitis. Dujų srauto greičiui sumažėjus iki charakteringos ribos, srauto turbulentiškumas taip pat mažėja, todėl gali atsirasti vietinių laminarinių ar nusistovėjusių laminarinių tekėjimo ruožų, kurie būdingi galutiniam šilumokaičio vamzdelio ruožui, kur bendras likusių dujų ir kondensato mišinio srauto greitis yra mažiausias ir šilumos bei masės mainai vyrauja mažiausio intensyvumo.



4 pav. Vandens garo kondensacijos ant aušinamo vertikalios vamzdelio vidinės sienelės principinis modelis

Vertikalios vamzdelio modelyje matoma, kad žemyn tekantis kondensatas ir ant paviršiaus papildomai susikondensuojantis vandens garas sudaro nuolat augantį kondensato plėvelės storį. Susidarius per storai plėvelei, ji gali pradėti atitrūkinėti ir tam tikrais ruožais, kondensato plėvelės srautas gali pradėti tekėti turbulentiškai. Tam tikromis turbulentinio tekėjimo sąlygomis lašai ar dalis plėvelės pat gali būti atskiriami nuo tekančio paviršiaus, taip prileidžiant besikondensuojančias dujas prie vėsiausio paviršiaus – vamzdelio sienelės ir suintensyvinant kondensacijos šilumos atidavimą.

1.2.2 Vandens lašelio garavimo ir kondensacijos modelis tūryje

Tūrinės kondensacijos metu, vandens garas arba kitos besikondensuojančios dujos yra apiplaunamos kito, vėsesnio už rasos taško temperatūrą dujų ar skysčių srautu. Lašelio garavimo atveju, jį privalo aptekėti dujos ar skystis aukštesnės temperatūros nei pats lašelis ir aptekančios dujos negali būti įsisotinusios garinamo lašelio dujomis – garais esant būdingai temperatūrai pasirinktu momentu.

Kondensacijos ar garavimo uždaviniai yra sudėtingi dėl savo kompleksškumo, nes šių procesų metu vyksta ne tik šilumos, bet ir masės pernaša. Siekiant suprasti didelės tiriamos baigtinio dydžio sistemos procesus, pirmiausiai sutelkiamas dėmesys į procesus, vykstančius mažame tūryje. Tokiu atveju, tiriama sistema pasirenkama kaip vienas vandens lašelis. Tiriamoje vieno lašo sistemoje pagrindinė sąlyga šilumos perdavai – varančiosios jėgos buvimas. Ši jėga aprašoma kaip dviejų sąveikaujančių kūnų ar fluidų temperatūrų nevienodumas (žr. 4 formulę).

$$t_1 \neq t_2 \quad (3)$$

čia: t_1 ir t_2 – skirtingų lašelių temperatūra, °C.

Bet kurio kūno taško temperatūrinio nestacionarumo išraiška pateikta 5 formulėje [5].

$$T = f(x, y, z, \tau) \neq 0 \quad (4)$$

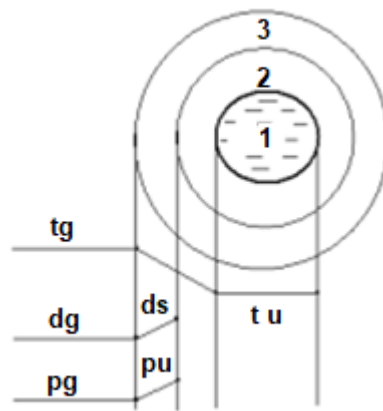
čia: T – temperatūros laukas,
 x, y, z – kūno taško erdvės koordinatės, m,
 τ – laiko dedamoji, s.

Šilumos mainai tarp tiriamų sistemos lašelių vyksta ne tik laidumu tiesioginio kontakto metu, bet ir konvekcija, nes visi fluidai daugiau ar mažiau yra laidūs šilumai [5].

Siekiant užtikrinti sąlygas vandens lašelio garavimui, reikia, kad išpurkšto lašelio arba jį apiplaunančio srauto temperatūra būtų aukštesnė už rasos taško temperatūrą, t.y. $t_{\text{lašelio}} > t_{r.t.}$

Kuomet dujų srautas yra prisotintas vandens garu ar kitomis, besikondensuojančiomis dujomis, ir atvėsintas iki temperatūros, artimos rasos taško temperatūrai, inicijuojamas kondensacijos procesas.

Vandens lašelio garavimo ir kondensacijos principinis modelis pateiktas 5 paveiksle [11].



5 pav. Vandens lašelio garavimo, karštesniame dujų sraute, principinis modelis

Vandens lašelį apiplaunant aukštesnės nei rasos taško temperatūros dujų srautu, vyksta garavimas. Šilumos ir masės mainai vyksta netiesioginio kontakto būdu, kadangi lašelis turi pasienio sluoksnius. Nuo centre esančio lašelio paviršiaus (1) (žr. 5 paveikslą) garuojantis vanduo sudaro vandens garų pasienio sluoksnį (2). Šioje zonoje vandens garai yra soties būsenos. Šiame sluoksnyje garų dalinis slėgis atitinka soties temperatūrą ir yra nustatomas pagal lašelio temperatūrą. Centre esančio lašo temperatūra pažymėta t_u simboliu (žr. 5 paveikslą). Sluoksnį (3) sudaro nesočios būsenos vandens garas, kuris tiesiogiai kontaktuoja su apiplaunančiu karštesniu dujų srautu, todėl šiluma perduodama sluoksniais nuo išorinio, per sotaus garo pasienio sluoksnį ir perduodamas pačiam vandens lašo paviršiui. Dujų srauto temperatūra t_g , esanti 3 sluoksnio paviršiuje, mažėja, kadangi kiekviename sluoksnyje vykstantys procesai sunaudoja dalį energijos ir lašelį pasiekia temperatūra, lygi t_u vertei. Gautos šiluminės energijos ir lašelio vidinės šilumos sąskaita lašelis toliau garuoja. Jeigu pakankamai šilumos tiekama lašui, šis eksponentiškai mažės, kol visiškai pavirs garais.

Masės mainų varomoji jėga šiuo atveju gali būti lygi vandens garo sluoksnio (3) ir apiplaunančiose dujose esančio vandens garų dalinių slėgių skirtumui arba pastarųjų tų pačių sluoksnių drėgmės kiekių skirtumui (žr. 6 formulę) [11].

$$p_{var} = p_{\bar{u}} - p_g \quad (5)$$

čia: p_{var} – masės mainų varančioji jėga, Pa;

$p_{\bar{u}}$ – vandens garų parcialinis slėgis vandens lašelio kraštutiniame sluoksnyje, Pa;
 p_g – vandens garų parcialinis slėgis dujose, Pa.

$$d_{var} = d_s - d_g \quad (6)$$

čia: d_{var} – masės mainų varančioji jėga, kg/kg;

d_s – vandens garų masinė dalis vandens lašelio kraštutiniame sluoksnyje, kg/kg;

d_g – vandens garų masinė dalis dujose, kg/kg.

Masės mainų proceso kryptis ne visada gali sutapti su šilumos mainų kryptimi, nes kondensacijos metu šiluma yra atiduodama, o masės kiekis didėja. Garavimo atveju šiluma yra įsisavinama, bet masės parametras kinta mažėjimo kryptimi. Priklausomai nuo tiriamojo vandens lašelio temperatūros, masės mainų procesų kryptis gali ir nesutapti su šilumos mainais. [12]. Jeigu lašelio temperatūra yra žemesnė už jį apiplaunančio garo rasos taško temperatūrą, masių pernaša vyks nuo dujų srauto lašelio kryptimi. Vykstant garo kondensacijai ant lašelio, drėgmės kiekis dujose mažės.

2 Technologiniai kondensacijos įrenginiai

Siekiant suprojektuoti ir įgyvendinti technologiškai bei ekonomiškai pagrįsta, optimalų antros pakopos, degimo produktuose esančių, vandens garų kondensacijos įrenginį ir jo kompleksinę sistemą, vienas iš kertinių uždavinių – atlikti pirminę, kondensacijos technologinių įrenginių apžvalgą bei remiantis technologinės visumos selektyvumo principais, pasirinkti tinkamiausią sprendinį tolimesniam skaičiavimų ir projektavimo etapų plėtojimui.

2.1 Technologinių kondensacijos įrenginių klasifikavimas

Degimo produktuose esančių vandens garų kondensacijos įrenginys bendrąja prasme yra šilumokaitis, kurio technologinė prasmė – perduoti šiluminę energiją iš aukštesnio temperatūrinio potencialo medžiagos mažesnio temperatūrinio potencialo medžiagai. Šis procesas privalo būti technologiškai ir/arba ekonomiškai pagrįstas.

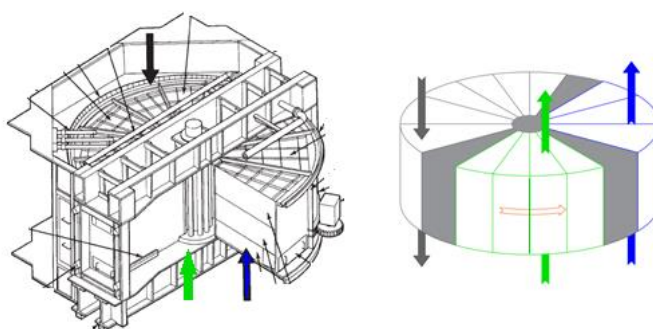
Nepriklausomai nuo technologinės paskirties, geometrijos techninius parametrus, medžiagos, šilumokaičiai yra klasifikuojami į tris pagrindinius veikimo principo tipus:

- regeneraciniai,
- rekuperaciniai,
- tiesioginio kontakto.

2.1.1 Regeneraciniai šilumokaičiai

Regeneraciniai šilumokaičiai plačiai naudojami, siekiant perduoti šiluminę energiją tarp dujų. Įkaitusio fluido šiluma pirmiausia atiduodama rotorius elementams, kuriuose energija yra akumuluojama, o ciklo vėlesnio žingsnio metu, įkaitusiems elementams kontaktuodamas su žemesnės temperatūros fluidu, konvekcijos būdu šiluma perduodama šildomajam fluidui [13]. Energetikos sektoriuje šio tipo šilumokaičiai naudojami pirminio ir antrinio degimo oro srautų pašildymui atvėsinant degimo produktus – dūmus arba siekiant išvengti metalų koroziją sukeliančių dujinių junginių kondensacijos ant paviršių, regeneraciniame šilumokaityje degimo produktai prieš patekdami į dūmtraukį, yra papildomai pašildomi.

Rotaciniuose regeneraciniuose šilumokaičiuose šiluma perduodama konvekcijos būdu, nes šilumos kaupimo elementus pakaitomis periodiškai apiplauna karštų ir šaltų dujų srautai, tekantys priešinga kryptimi. Rotaciniame elemente kaip šilumos kaupimo ir perdavimo paviršiai įrengiami plieniniai ar kito medžiagos elementai. Kompaktiškai suformuotas briaunotų, profiliuotų ar poruotų plokštelių elementų išdėstymas užtikrina didelį šilumokaitos paviršiaus plotą tūrio vienetui [13].



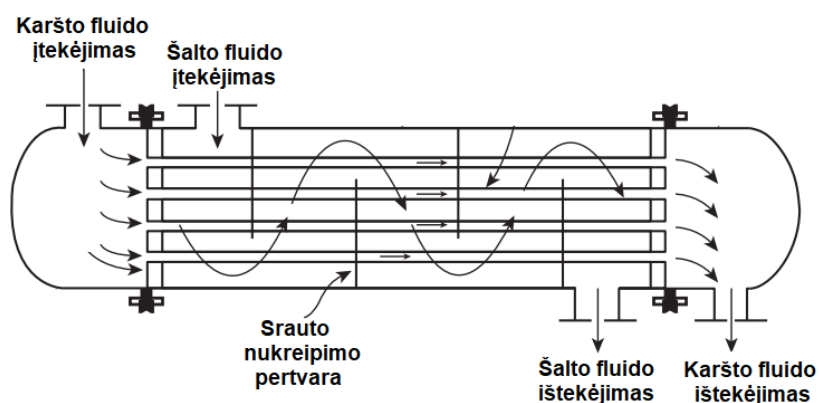
6 pav. Regeneracinis rotacinis šilumokaitis ir principinė veikimo schema

Pagrindiniai rotacinio šilumokaičio konstrukcijos komponentai, pavaizduoti 6 paveiksle, yra: korpusas, rotorius su įkrova, dujų srautų separatoriai, varantysis variklis su rotoriaus ašimi [14]. Atsižvelgiant į skirtingų technologinių srautų, dalyvaujančių šilumos mainų procese, skaičių, regeneracinis šilumokaitis gali būti konfigūruojamas nuo dviejų iki keturių sektorių, o atviras pratekėjimo skerspjūvio plotas padalytas tarp dujų srautų, proporcingai jų masės srautui, kad dujų greitis abiejose sektoriaus plokštės pusėse būtų panašus ir nesukeltų didelio slėgio skirtumo ir aerodinaminių nuostolių. Nors regeneraciniuose rotaciniuose šilumokaičiuose naudojami kelių laipsnių radialiniai ir ašiniai sandarikliai, visiško sandarumo ir nesimaišymo tarp skirtingų dujų praktikoje išvengti nepavyksta.

Regeneraciniuose šilumokaičiuose dėl palankių sąlygų, ant vėsiausių paviršių gali susidaryti kondensatas, kuris yra drenuojamas, tačiau dviejų fazių srautų šilumokaitai šie įrenginiai nėra pritaikyti dėl galimo masių disbalanso besisukančiame rotoriuje. Pastarasis įrenginys yra kompaktiškas šilumokaitis ir pritaikomas šilumos pernašos procesams, kur lygiagrečiai nevyksta masės mainai tarp technologinės sistemos fluidų.

2.1.2 Rekuperaciniai šilumokaičiai

Rekuperaciniai šilumos perdavimo įrenginiuose, vieno fluido šiluminė energija perduodama kitam fluidui jiems tarpusavyje tiesiogiai nekontaktuojamas, kadangi šilumokaitos procese dalyvaujančios medžiagos yra atskirtos plieninėmis sienelėmis. Šio tipo šilumokaičiai yra nepamainomi, kuomet proceso kokybiniai ir technologinio išpildymo kriterijai įpareigoja šilumos mainų procese dalyvaujančias medžiagas netik nesumaišyti, bet ir eliminuoti kontakto galimybę normalaus proceso metu. Principinė rekuperacinio vamzdelinio šilumokaičio technologinė schema pateikta 7 paveiksle [15].



7 pav. Rekuperacinio vamzdelinio šilumokaičio principinė technologinė schema

Rekuperaciniame vamzdeliniame šilumokaityje karštas fluidas, kurį reikia atvėsinti, yra tiekiamas į vamzdelių pluoštą, vidinę jų dalį. Vamzdelio išorinį paviršių apiplauna aušinantis šalto fluido srautas. Priklausomai nuo technologinių uždavinių, tokio tipo šilumokaityje gali būti technologiškai organizuojami ne tik fizinės, bet ir fazinės šilumos pernašos, vykdomi kondensacijos arba garinimo procesai.

Rekuperaciniai, nesimaišančių srautų šilumokaičiai pagal konstrukciją klasifikuojami [16]:

- vandens vamzdžių (skystis teka šilumokaičio vamzdelio vidumi),
- dujų vamzdžių (dujų srautas teka šilumokaičio vamzdelio vidumi),

- plokšteliniai,
- spiraliniai,
- korėtieji,
- dvigubo vamzdžio.

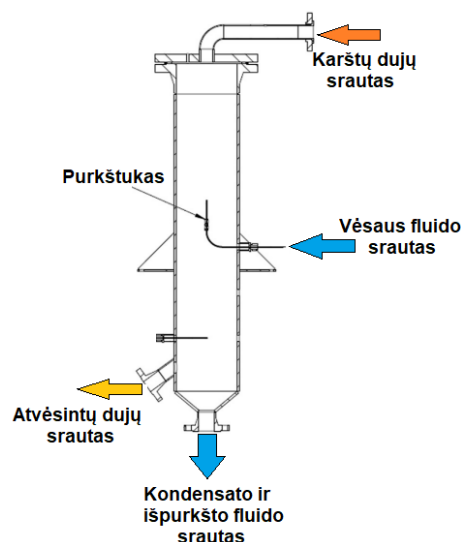
Pagal šilumokaitos procese dalyvaujančių terpių srauto kryptis tarpusavio atžvilgiu, šilumokaičiai klasifikuojami:

- pasroviniai,
- priešsroviniai,
- skersasroviai.

Energetikos sektoriuje itin plačiai naudojami rekuperaciniai šilumokaičiai. Šio tipo įrenginiai – tai vandens ir garo katilai, sauso tipo ekonomaizeriai, degimo produktų kondensaciniai ekonomaizeriai, garo kondensatoriai, centralizuoto šildymo sistemos įranga.

2.1.3 Tiesioginio kontakto šilumokaičiai

Tiesioginio kontakto šilumokaičiuose organizuojamų šilumos pernašos procesų metu skirtingą temperatūrinį potencialą turinčios medžiagos neišvengiamai kontaktuoja, maišosi [17].



8 pav. Tiesioginio kontakto šilumokaičio principinė technologinė schema

Tiesioginio kontakto šilumos mainų aparato tūryje skirtingų tipų srautai dažniausiai organizuojami priešpriešiniam kontaktui, o pats šilumokaitis gali būti pozicionuojamas horizontaliai arba vertikalčiai. Tiesioginio kontakto šilumokaičiuose lygiagrečiai šilumos mainams vyksta ir masės mainai tarp srautų ir jų elementų, dažnai susidaro fazinių virsmų procesai, vyksta kondensacija bei garavimas.

Pagrindiniai tiesioginio kontakto šilumokaitos įrenginio privalumai, lyginant su kito tipo šilumokaičiais:

- išgaunamas itin aukštas šilumos perdavimo koeficientas dėl eliminuotos papildomos šiluminės varžos (plieninės sienelės) tarp procese dalyvaujančių medžiagų (dujų, skysčių, kietųjų dalelių),

- įrenginys gali būti naudojamas lygiagrečiai keliems technologiniams procesams vykdyti: šilumos perdavimas, fizinių bei cheminių komponentų redukcija sraute (kietųjų dalelių, sieros ir azoto junginių), cheminių procesų organizavimas,
- paprasta, dažniausiai atmosferinio slėgio, konstrukcija, kurią lengva suprojektuoti, pagaminti ir prižiūrėti.

3 Antros pakopos kondensacinio ekonomizaierio technologijos projektavimas

Šio etapo tikslas – remiantis realaus, veikiančio energetinio objekto faktiniais projektiniais ir eksploataciniais parametrais, suprojektuoti, pagaminti ir kompleksiskai suderinti antros pakopos dūmų kondensacinio ekonomizaierio bei absorbcinio šilumos siurblio sistemą, nustatyti kompromisinius optimalius darbo parametų ruožus, kuriuose antros pakopos dūmų kondensacinio ekonomizaierio darbas bus kaip įmanoma efektyviausias technologiniu ir ekonominiu atžvilgiu.

3.1 Pradinių projektinių duomenų identifikavimas

Realaus eksploatuojamo energetinio objekto Lietuvoje, kuriame įrengti biokuro katilai, pagrindiniai techniniai parametrai pateikti 2, 3 ir 4 lentelėse. Esminis uždavinys – padidinti bendrą katilinės efektyvumą papildomai ataušinant degimo produktus. Atlikta išankstinė techninė – ekonominė galimybių studija nurodo, kad į esamą biokuro katilinės sistemą optimaliausia įdiegti absorbcinį šilumos siurblių ir antros pakopos dūmų kondensacinį ekonomizaierį. Nors reikiamų naujai įdiegti pagrindinių pavienių įrenginių parametrai yra aiškiai identifikuoti, tačiau detalesnės visos kompleksinės technologinės sistemos charakteristikos pradedamos realizuoti projektavimo ir inžinerinių skaičiavimų stadijos metu.

2 lentelė. Energetiniai esamos biokuro katilinės įrenginių rodikliai

Eilės Nr.	Rodiklio pavadinimas	Rodiklio reikšmė
Energetiniai esamų įrenginių rodikliai		
1.	Nominali biokuro katilų šiluminė galia, kuro drėgnumas 45 %	16 MW
2.	Pirmos pakopos kondensacinio ekonomizaierio šiluminė galia, kuro drėgnumas 45 % ir grįžtančio termofikacinio vandens temperatūra 42 °C	3,19 MW
3.	Bendra katilų su pirmos pakopos kondensaciniu ekonomizaieriu šiluminė galia, kuro drėgnumas 45 % ir grįžtančio termofikacinio vandens temperatūra 42 °C	19,19 MW
4.	Katilų galios reguliavimo diapazonas	30 ÷ 100 %
5.	Katilų bendras naudingo veikimo koeficientas dirbant maksimaliu apkrovimu (be kondensacinio ekonomizaierio)	>86 %
6.	Biokuro katilų maksimali darbinė vandens temperatūra išėjime	120 °C
7.	Į CŠT (centralizuoto šilumos tiekimo) sistemą tiekiamo termofikacinio vandens temperatūra:	
	- minimali	70,5 °C
	- maksimali	121,5 °C
8.	Iš CŠT sistemos grįžtančio termofikacinio vandens temperatūra:	
	- minimali	38 °C
	- maksimali tipinio darbo režimo	46 °C
	- maksimali galima	61 °C

9.	CŠT termofikacinio vandens slėgis grįžtamoje linijoje:	
	- minimalus	1,5 bar(g)
	- maksimalus	2,8 bar(g)

2 ir 3 lentelėse pateikti būdingi parametrai yra kertiniai, kuriais remiantis bus atliekamos objekto priėmimo auditavimo procedūros ir užsakovas vertins ar įdiegta įranga atitinka iš anksto numatytas technines sąlygas.

4 lentelėje pateikti aplinkosauginiai rodikliai yra faktinės leistinos emisijų ribos į esamą dūmtraukį. Naujai projektuojama antros pakopos degimo produktų kondensacinio ekonomizaizerio ir absorbcinio šilumos siurblio kompleksinės technologinės sistemos pirminė ir pagrindinė funkcija yra utilizuoti projektuojamą likutinės, žemo temperatūrinio potencialo šilumos kiekį iš degimo produktų. Šiuo atveju deklaruojamos emisijos į numatomą, naujai įrengiamą, antros pakopos dūmų kondensacinį ekonomizaizerį neviršija reglamentuojamų, 4 lentelėje nurodytų, kokybinių rodiklių verčių, todėl priimama, kad šios ribos nebus viršytos papildomai įdiegus naujus šilumos utilizavimo įrenginius ir šių įrenginių paskirtis nėra degimo produktų emisijų mažinimas ir reguliavimas.

3 lentelė. Esamos biokuro katilinės aplinkosauginių rodiklių ribos

Eilės Nr.	Rodiklio pavadinimas	Rodiklio reikšmė
Aplinkosauginiai esamų įrenginių rodikliai		
1.	NOx (6 % O ₂ , sausuose dūmuose)	<300 mg/Nm ³
2.	CO (6 % O ₂ , sausuose dūmuose)	<1000 mg/Nm ³
3.	Kietosios dalelės (6 % O ₂ , sausuose dūmuose)	<50 mg/Nm ³

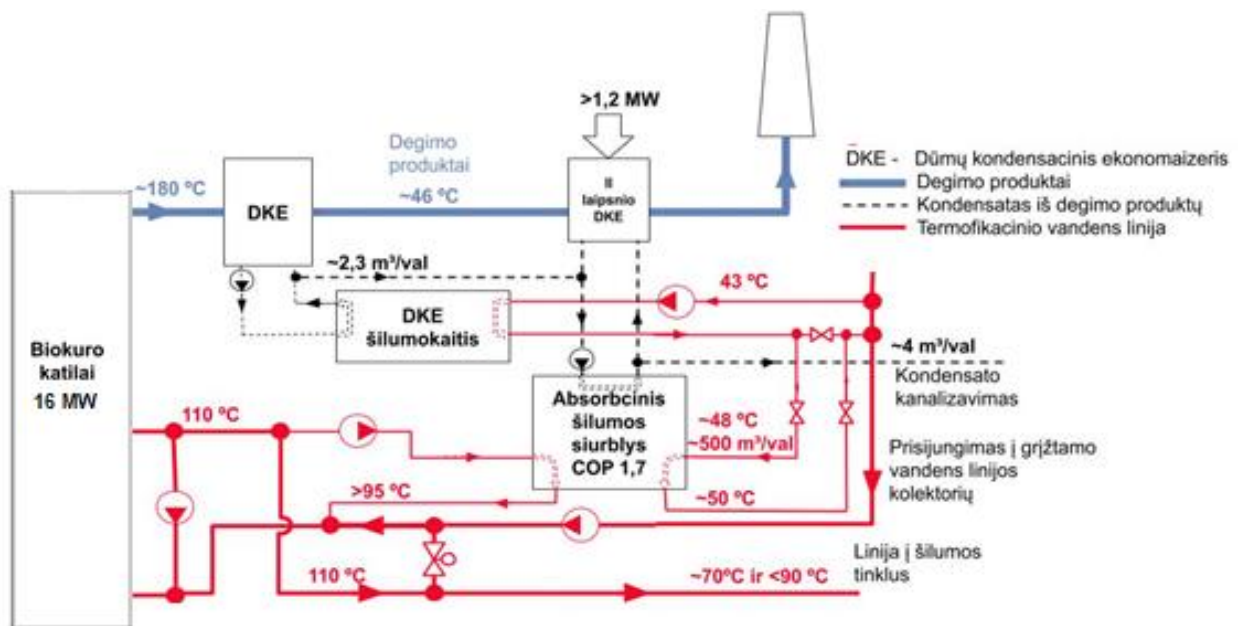
4 lentelė. Naujai projektuojamo AŠS ir DKE II įrenginių sistemos pagrindiniai, reikiami užtikrinti, rodikliai

Eilės Nr.	Rodiklio pavadinimas	Rodiklio reikšmė
Absorbcinio šilumos siurblio ir antros pakopos degimo produktų kondensacinio ekonomizaizerio sistemos įrenginių rodikliai		
1.	AŠS šiluminė galia, kai:	≥1,2 MW
	1. grįžtančio vandens temperatūra po pirmos pakopos DKE 48 °C, debitas – ne daugiau 500 m ³ /val.;	
	2. biokuro katilų vandens darbinė temperatūra 110 °C.	
2.	AŠS jo pagalbinių įrenginių elektros energijos sąnaudos ne daugiau	20 kWhe/MWhth
3.	AŠS ir DKE II efektyvumas (COP, šilumos konvertavimo koeficientas) visame darbo diapozone	≥1,7
3	Aukštų parametrų šilumos šaltinio kontūro šilumokaičio maksimalus slėgis	≥16 bar(g)
3.5.	Aušinamo vandens kontūro (garintuvo kontūras) šilumokaičio darbinis slėgis	≥6 bar(g)
3.6.	Šildomo termofikacinio vandens tinklo kontūro šilumokaičio darbinis slėgis ne mažiau	≥6 bar(g)
3.7.	Aplinkos, kurioje įrengiama AŠS ir DKE II sistema, temperatūros diapazonas	+5 ... +40 °C

3.8.	Absorbentas	Ličio bromidas (LiBr)
3.9.	Šaldymo agentas (šaltnešis)	Demineralizuotas vanduo
3.10.	Korozijos inhibitorius	Ličio molibdatas
3.12.	Įvadinės elektros spintos elektros energijos maitinimas	3x400 V / 50 Hz
3.13.	Maksimalus skleidžiamas triukšmas 1 m atstumu nuo valdymo skydo ne daugiau	80 dBA

Naujai projektuojamos absorbcinio šilumos siurblio ir antros pakopos degimo produktų kondensacinio ekonomizaierio sklandus darbas privalo būti užtikrintas šiuose eksploatacinių parametru režiuose:

- iš katilų grupės paduodamo termofikacinio vandens temperatūrai esant $105 \div 115 \text{ }^\circ\text{C}$;
- grįžtamo vandens temperatūrai iš tinklų esant $38 \div 46 \text{ }^\circ\text{C}$;
- į antros pakopos DKE tiekiamų degimo produktų temperatūra $45 \div 55 \text{ }^\circ\text{C}$;
- po pirmos pakopos DKE termofikacinio vandens temperatūra $44 \div 51 \text{ }^\circ\text{C}$;
- termofikacinio vandens debitui kintant nuo $\sim 300 \text{ m}^3/\text{val.}$ iki $\sim 500 \text{ m}^3/\text{val.}$



9 pav. Absorbcinio šilumos siurblio ir antros pakopos degimo produktų kondensacinio ekonomizaierio principinė išpildymo schema bendrame katilinės technologiniame plane

3.2 Pagrindinė, naujai projektuojama DKE II ir AŠS įranga

Pagrindinė, naujai projektuojama, įranga skirstoma į tris segmentus:

- antros pakopos degimo produktų kondensacinis ekonomizaieris ir jo pagalbiniai įrenginiai,
- absorbcinis šilumos siurblys ir jo pagalbiniai įrenginiai,
- AŠS ir DKE II sistemą apjungiantys pagalbiniai įrenginiai ir komponentai.

Antros pakopos dūmų kondensacinio ekonomizaierio technologijos projektavimo etapai:

- apskaičiuojamas esamos katilinės šilumos balansas ir įvertinamas degimo produktų likutinis šiluminės energijos potencialas po pirmos pakopos dūmų kondensacinio ekonomaizerio,
- vykdomas pirminis absorbcinio šilumos siurblio parinkimas, remiantis atliktais šiluminio balanso iš dūmų pusės, skaičiavimų rezultatais,
- remiantis atliktais šiluminio balanso iš dūmų pusės skaičiavimais ir parinkto absorbcinio šilumos siurblio darbo parametrų rodikliais, parenkama kondensacijos įrenginio technologija ir užduodamos kraštinės technologinės sąlygos antros pakopos dūmų kondensaciniam ekonomaizeriui,
- parinkto absorbcinio šilumos siurblio ir antros pakopos dūmų kondensacinio ekonomaizerio bendro šilumos balanso suderinamumo patikra ir bendrų charakteringų technologinių parametrų nustatymas,
- antros pakopos dūmų kondensacinio ekonomaizerio technologijos projektavimas,
- antros pakopos dūmų kondensacinio ekonomaizerio konstrukcijos, gabaritų identifikavimas ir eksploatacinių savybių nustatymas.

3.2.1 Biokuro katilinės šiluminio balanso charakteringų parametrų apskaičiavimas, degimo produktų likutinės šiluminės energijos potencialo nustatymas

Pagal pateiktas esamos biokuro katilinės parametrų ir reikalavimų technines sąlygas bei preliminarų naujai diegiamos įrangos pajungimo planą, įvertinamas degimo produktų likutinės šiluminės energijos, po pirmos pakopos dūmų kondensacinio ekonomaizerio, balansas bei indikuojami būtini įgyvendinti eksploatacinių parametrų rodikliai. Galutiniai šilumos balanso rodiklių rezultatai naudojami parenkant absorbcinį šilumos siurblių.

Balanso skaičiavimo etapai:

- identifikuojami biokuro deginimo ir šiluminės energijos utilizavimo, iki antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio, įrenginių pagrindinės techninės charakteristikos,
- skaičiavimams priimami naudojamo kuro kokybiniai parametrai,
- apskaičiuojamas degimo produktų kiekis į antros pakopos degimo produktų kondensacinį ekonomaizerį bei nustatomi kiti būdingi parametrai.

5 lentelė. Esamos biokuro katilinės skaičiuotinių ir projektuojamų įrenginių charakteringų darbo parametrų suvestinė

Rodiklis	Rodiklio vertė												Garanti nio taško rodiklio vertė
Katilų apkrovimas, %	30			50			70			100			100
Katilų šiluminė galia, MW	4,8			8			11,2			16			16
Katilo naudingo veikimo	85	85	85	85,5	85,5	85,5	85,8	85,8	85,8	86	86	86	86

Rodiklis	Rodiklio vertė												Garanti nio taško rodiklio vertė	
koeficientas (priimamas)														
Kuro drėgnis, %	45			45			45			45			45	
Deguonies kiekis sausuose dūmuose, %	7			6,5			6			6			6	
Dūmų temp. į DKE I, °C	155	155	155	165	165	165	170	170	170	180	180	180	-	
Sausų dūmų kiekis į DKE I, Nm ³ /h	8777			13792			19183			25076			-	
Vandens garo kiekis dūmuose į DKE I, Nm ³ /h	2291			3600			5008			6546			-	
Bendras dūmų kiekis į DKE I, Nm ³ /h	11068			17392			24191			31622			-	
Bendras dūmų kiekis į DKE I, m ³ /h	18365			28859			40141			52472			-	
Santykinė dūmų drėgmė prieš DKE I, %	3,75			2,99			2,72			2,15			-	
Dūmuose esančio vandens garo rasos taško temp. prieš DKE I, °C	60,5			61,1			61,67			61,67			-	
Dūmų temp. po DKE I, °C	45	50	55	45	50	55	45	50	55	45	50	55	-	
Bendras dūmų kiekis po DKE I, Nm ³ /h	9684	9992	10395	15226	15701	16335	21178	21839	22721	27684	28548	29700	-	

Rodiklis	Rodiklio vertė												Garanti nio taško rodiklio vertė
Bendras dūmų kiekis po DKE I, m ³ /h	1128 0	1182 2	1248 9	1773 6	1857 7	1962 6	2466 9	2583 9	2729 8	3224 7	3377 7	3568 4	-
Vandens garo tūrio dalis bendrame dūmų po DKE I kiekyje, %	9,48	12,2 0	15,6 0	9,48	12,2 0	15,6 0	9,48	12,2 0	15,6 0	9,48	12,2 0	15,6 0	-
DKE I šiluminė galia, MW	1,13	0,95	0,73	1,93	1,65	1,29	2,79	2,4	1,9	3,92	3,37	2,67	-
Dūmų temp. į DKE II, °C	45	50	55	45	50	55	45	50	55	45	50	55	50
Santykinė dūmų drėgmė į DKE II, %	100			100			100			100			-
Dūmuose esančio vandens garo rasos taško temp. į DKE II, °C	45	50	55	45	50	55	45	50	55	45	50	55	-
Dūmų temp. po DKE II, °C	26	35	43	26	36	44	26	36	45	26	37	45	-
Bendras dūmų kiekis po DKE II, Nm ³ /h	9085	9362	9689	1427 6	1471 1	1522 6	1985 6	2046 2	2117 8	2595 6	2674 8	2768 4	-
Bendras dūmų kiekis po DKE II, m ³ /h	9950	1056 2	1121 6	1563 5	1665 1	1768 0	2174 7	2316 1	2466 9	2842 8	3037 3	3224 7	-
Vandens garo tūrio dalis bendrame dūmų po DKE I kiekyje, %	3,32	6,21	9,48	3,32	6,21	9,48	3,32	6,21	9,48	3,32	6,21	9,48	-
DKE II susidariusio kondensato kiekis, kg/h	447	463	506	703	727	795	978	1011	1106	1278	1322	1446	-

Rodiklis	Rodiklio vertė												Garanti nio taško rodiklio vertė
DKE II šiluminė galia, MW	0,37	0,41	0,43	0,63	0,68	0,71	0,86	0,87	0,87	1,21	1,22	1,22	-
Kondensato temp. prieš šilumokaitį, °C	39	42	42	39	42	42	39	42	42	39	42	42	-
Kondensato temp. po šilumokaičio, °C	22	24	25	22	24	25	22	24	25	22	24	25	-
Kondensato srautas per šilumokaitį, kg/h	1889 8	1950 8	2153 5	3170 3	3254 5	3583 8	4364 9	4165 8	4410 8	6110 8	5814 7	6156 8	-
Kondensato srautas per šilumokaitį, m ³ /h	19,0	19,6	21,6	31,9	32,7	36,0	43,9	41,9	44,3	61,4	58,4	61,9	-
Kondensatą aušinančio fluido temp. (įtekančio/ištekančio iš šilumokaičio) °C	20/3 7	20/4 0	20/4 0	20/3 7	20/4 0	20/4 0	20/3 7	20/4 0	20/4 0	20/3 7	20/4 0	20/4 0	-

Degimo procesų ir šiluminiai balansiniai skaičiavimai atliekami programine įranga „POWER PLANT SIMULATOR & DESIGNER“ (PPSD). Patikrinamieji validaciniai skaičiavimai atliekami su programine įranga „EnviLoop FlueGas“.

Skaičiavimams priimtas kuras remiantis LR energetikos ministro įsakyme dėl Lietuvos respublikos energetikos ministro 2013 m. rugsėjo 20 d. įsakymo Nr. 1-185 dėl kietojo biokuro apskaitos taisyklių patvirtinimo“ pakeitimu. Įsakyme numatyta biokurą identifikuoti ir lyginti remiantis LST EN ISO 17225-1:2014 standarto B.1 lentelėje pateiktais rodikliais [18]. Įsakyme apibrėžti biokuro būdingi rodikliai pateikti 6 lentelėje [19].

6 lentelė. Skaičiavimuose naudojamo biokuro kokybiniai parametrai

Rodiklis	Matavimo vienetai	Rodiklio vertė pagal LST EN ISO 17225-1:2014	
		Tipinė vertė	Vertės diapazonas
Kuro drėgnis, masinė dalis	w-%	-	-
Pelenai, masinė dalis sausoje masėje	w-% sauos masės	0,3	0,2 - 0,5

Rodiklis	Matavimo vienetai	Rodiklio vertė pagal LST EN ISO 17225-1:2014	
		Tipinė vertė	Vertės diapazonas
Žemutinis kuro šilumingumas, sausos masės	MJ/kg	19,2	18,8 - 19,8
Žemutinis kuro šilumingumas, naudojamosios masės	MJ/kg	-	-
Anglis, sausoje masėje	w-% sauos masės	51	47 - 54
Vandenilis, sausoje masėje	w-% sauos masės	6,3	5,6 - 7,0
Degūonis, sausoje masėje	w-% sauos masės	42	40 - 44
Azotas, sausoje masėje	w-% sauos masės	0,1	< 0,1 - 0,5
Siera, sausoje masėje	w-% sauos masės	< 0,02	< 0,01 - 0,05
Chloras, sausoje masėje	w-% sauos masės	0,01	< 0,01 - 0,03
Kalis + natris, sausoje masėje	w-% sauos masės	-	-
Lapų ir spyglių kiekis sausoje masėje	w-% sauos masės	< 2	

7 lentelė. Skaičiavimuose naudojamo biokuro techninės charakteristikos

Rodiklis	Matavimo vienetai	Rodiklio diapazonas	
		Nuo	Iki
Naudojamojo kuro tankis	kg/m ³	250	400
Pelenų lydimosi temperatūra (pagal DIN 51730)	°C	> 1100	-
Pelenų birumo kampas	°	40°	50°
Pagrindinė frakcija (3,15 < P ≤ 63mm)	% masės	≥ 65	100
Didžioji frakcija (> 100mm)	% masės	-	≤ 10
Smulkioji frakcija (≤ 3,15mm)	% masės	-	≤ 10 (25) ⁶
Maksimali frakcija (≤ 350mm)	% masės	-	≤ 1
Stambios frakcijos prabyrėjimo skerspjūvio plotas	cm ²	> 0,5	≤ 6

3.2.2 Pirminis absorbcinio šilumos siurblio parinkimas ir pritaikymas

Absorbcinis šilumos siurblys – tai žemo temperatūrinio potencialo energiją transformuojantis įrenginys į aukštesnės temperatūros šiluminę energiją, tinkamą technologiniam panaudojimui, o proceso pradėjimui ir šilumos siurblio darbo palaikymui naudojama šiluminė energija.

Absorbcinis šilumos siurblys sulaukia vis daugiau dėmesio dėl savo pranašumų naudojant žematemperatūrinę šiluminę energiją. Įrenginys gali būti naudojamas pakartotiniam atliekinės šilumos panaudojimui, siekiant sutaupyti energijos, sumažinti aplinkos taršą lygiagrečiai sugeneruojant ekonominę naudą įrangos eksploatuotojui ir galutiniam vartotojui.

Absorbcinio šilumos siurblio varančioji aukšto temperatūrinio potencialo šiluminė energija gali būti išgauta deginant skystą, dujinį ar kietą kūrą, panaudojant saulės spinduliuotės energiją, geoterminę ar kitą, pramoninėje technologijoje naudojamą šilumnešį (garą, karštą vandenį, kitą technologinį fluidą).

Šiuo metu rinkoje projektuojami absorbciniai šilumos siurbLIAI, kurių galia varijuoja nuo 100 kW iki 40 MW, o naudingo veikimo koeficientas COP paprastai siekia apie 1,8 [20].

Pagrindiniai absorbcinių šilumos siurblių strateginiai, ekonominiai ir aplinkosauginiai privalumai [21]:

- skirtingai nei įprastas šilumos siurblys, absorbcinis šilumos siurblys veikia proceso inicijavimui naudojant šiluminę energiją, o tai užtikrina minimalias energijos sąnaudas ir santykinai mažas eksploatacines išlaidas,
- regionuose, kuriuose išvystyta centralizuoto šilumos tiekimo (CŠT) infrastruktūra, absorbcinio šilumos siurblio veikimo iniciavimui reikalingos šilumos šaltinis dažnai yra prieinamas atlikus esamos vietinės infrastruktūros minimalius pakeitimus, o absorbciniame šilumos siurblyje sunaudota šiluma perduodama centralizuoto šildymo tinklui,
- absorbcinis šilumos siurblys naudoja vandenį ar vandens pagrindo tirpalus kaip šaltnešį, o tai reiškia beveik nulinį poveikį aplinkai (globalinio atšilimo potencialo balas yra artimas nuliui),
- absorbcinio šilumos siurblio, antros pakopos dūmų kondensacinio ekonomizerio ir jų kompleksinės technologijos įrangos priklausinių bei kitų įrengimo rangos darbų investicinių kaštų dalį užsakovas ir būsimas eksploatuotojas gali siekti gauti dalinį finansavimą pagal klimato kaitos programos priemonę "Esamos įrangos modernizavimas pritaikant šilumos akumuliacijai, absorbcinių šilumos siurblių diegimas ir (ar) atsinaujinančių energijos išteklių (saulės energijos elementai) panaudojimas centralizuoto šilumos tiekimo sektoriuje siekiant didinti energinį efektyvumą"[22].
- Pagal pateiktas esamos biokuro katilinės parametrų ir reikalavimų technines sąlygas (žr. 2, 3, 4 lenteles) ir atliktų šilumos balansų iš dūmų pusės rezultatus (žr. 5 lentelę), susisteminami absorbcinio šilumos siurblio būdingi darbo parametrai (žr. 8 lentelę).

Absorbcinio šilumos siurblio sistemą sudaro daugybė smulkių ir stambių atskirų įrenginių ir įrengimų visuma. Pagrindiniai įrenginiai ir technologiniai kontūrai[23]:

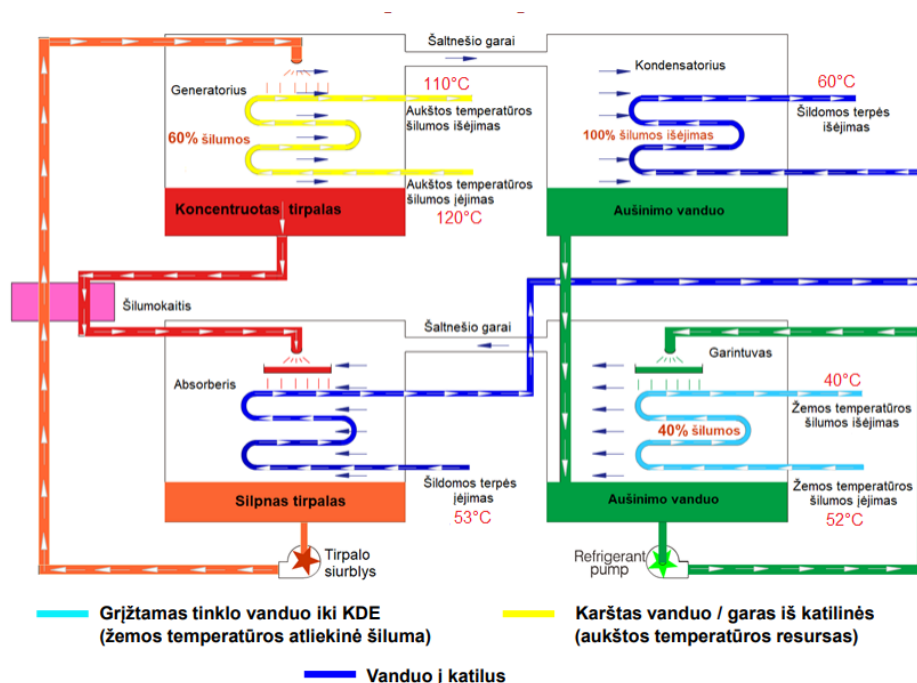
- generatorius,
- kondensatorius,
- garintuvas,
- absorberis,
- pagrindiniai vidiniai šilumokaičiai,

- tarpiniai išoriniai šilumokaičiai,
- vakuumo siurblys,
- tirpalo siurblys ir aušalo siurblys,
- slėgio, vakuumo, temperatūros jutikliai,
- kitos pagalbinės reguliuojančios bei elektrotechninės dalys ir komponentai.

Absorbciniuose šilumos siurbliuose naudojami dviejų tipų tirpalai:

- Ličio bromido (LiBr) tirpalas (vanduo – šaltnešis, ličio bromidas – absorbentas),
- Amoniakinio vandens tirpalas (amoniakas – šaltnešis, vanduo – absorbentas).

Technologiškai absorbento virimo temperatūra yra daug aukštesnė nei šaltnešio, todėl šaltnešį galima lengvai atskirti nuo absorbento kaitinant ir taip šaltnešį išgarinant. Per daugelį absorbcinio šilumos siurblio sistemos kūrimo metų išbandyta daug darbinių skysčių kombinacijų - tirpalų. Darbiniame absorbciniame šilumos siurblyje lygiagrečiai vyksta daug termodinaminių procesų, o tam tikros darbinio skysčio poros veikimą gali sugadinti daugybė veiksnių ar fluidų, esančių tirpale, savybės. Darbinių skysčių parinkimo procesas yra saistomas daugelio apribojimų ir darbinių parametrų verčių. Norimoje technologijoje esant poreikiui išgauti žemesnių temperatūrų šilumos transformavimo parametrus (darbinis garintuvo kontūras aušinamas <5 °C temperatūros), paprastai naudojamas amoniakinio vandens tirpalas. Kiek aukštesniuose žemos temperatūros technologiniuose režimuose (darbinis garintuvo kontūras aušinamas >5 °C temperatūros) absorbcinių šilumos siurblių projektuotojai renkasi ličio bromido tirpalą. Šio tirpalo įrenginio technologinė principinė schema pateikta 10 paveiksle.



10 pav. Absorbcinio šilumos siurblio principinė technologinė schema

Absorbcinio šilumos siurblio technologijos etapai, kontūrai ir ciklai pramoninėje vandens šildymo katilinėje:

- į generatoriaus kontūro šilumokaitį tiekiamas iš katilų aukštos temperatūros (120 °C) termofikacinis vanduo. Kitoje šilumokaičio pusėje (išorinėje šilumokaičio paviršiaus dalyje)

ant išvystyto vidinio šilumokaičio paviršiaus, siurblio pagalba išpurškiamas silpnas ličio bromido tirpalas. Vanduo pasiekęs šilumokaičio karštą paviršių užverda ir išgaruoja. Šaltnešio (vandens) garai nukreipiami į kondensatoriaus kontūrą, o ličio bromido koncentruotas tirpalas kaupiamas generatoriaus apatiniame rezervuare, iš kurio vėliau išpurškiamas absorberio kontūre. Generatoriuje utilizuota šiluminė energija reikalinga technologinio proceso iniciavimui – pradžiai. Dalį šilumos atidavęs ir atvėsęs termofikacinis vanduo, grąžinamas į technologinį katilų kontūrą, paprastai į tą pačią vietą, iš kurios buvo ir paimtas, tačiau išskirtiniais atvejais atvėsinto termofikacinio vandens grąžinimo lokacija gali skirtis.

- į kondensatorių patekę vandens garai yra aušinami iš sukondensuojami. Šiame kontūre vyksta šilumos ir masės mainų procesas, išskiriama ne tik fizinė, bet ir fazinė šilumos virsmų dedamosios. Vandens garus aušina ir kondensuoja, kitoje šilumokaičio sienelės pusėje esantis, iš miesto grįžtantis ir atvėsintas, termofikacinis vanduo. Kadangi absorberio ir kondensatoriaus aušinantieji kontūrai sujungti nuosekliai, iš miesto grįžtantis termofikacinis vanduo nuosekliai teka pirmiausiai per absorberį (apie 50-55 °C temperatūros), o tik po to, šiek tiek pašilęs (apie 2-5 °C), tiekiamas į kondensatorių ir pašilęs iki 58-62 °C, grąžinamas į termofikacinio vandens liniją prieš katilus.
- garintuvo vidinio kontūro darbo procesas paremtas žematemperatūriu vandens garavimu mažo slėgio kameroje. Garintuvo vidinėje pusėje, su vakuomo siurblio pagalba, palaikomas absoliutus slėgis apie 0,02 – 0,05 bar(a). Prie tokio gilaus vakuomo, vanduo pradeda garuoti itin žemose temperatūros režiuose (10 – 20 °C). Vandens garinimui panaudojama žematemperatūris technologinis šilumos potencialas. Duotuoju atveju šiluma į garintuvą tiekama utilizuojant dalį degimo produktų likutinės šilumos ir atvėsinant į dūmtraukį tiekiamus dūmus papildomai. Garintuvo kontūre šilumnešis, aušinantis dūmus, priklausomai nuo technologinio proceso poreikio, gali būti atvėsintas garintuve iki 18- 20 °C temperatūros o sušilęs iki 40 – 52 °C vėl tiekiamas į garintuvą, vidiniame vakuuminiame kontūre esančio vandens garinimo procesui atlikti. Būtent šiame kontūre, vandens išgarinimui sunaudota energija yra laikoma naudinga, papildomai pagaminta.
- garintuvo kontūre išgarinto vandens garai (šiuo atveju šaltnešio garai) tiekiami į absorberio dalį. Absorberio tūryje išpurškiamas iš generatoriaus dugne esančio rezervuaro sukauptas itin koncentruotas ličio bromido tirpalas. Tūryje išpurškstas koncentratas selektyviai jungiasi su vandens garu jį absorbuodamas ir atvėsęs akumuliuojamas apatiniame absorberio kontūro rezervuare jau kaip silpnai koncentruotas ličio bromido tirpalas, kuris vėliau tiekiamas į generatoriaus kontūrą.

Absorbcinio šilumos siurblio naudingo veiksmo koeficientas COP apibrėžiamas į tinklą bendros atiduotos šilumos kiekio santykiui su į procesą įdėtu šilumos kiekiu.

Absorbcinio šilumos siurblio parinkimui naudojami būdingi parametrai pateikti 5 lentelėje. Absorbcinio šilumos siurblio gamintojo pateikti parinkto įrenginio techniniai ir darbiniai parametrai matomi 8 lentelėje.

8 lentelė. Absorbcinio šilumos siurblio techniniai ir darbiniai parametrai

Rodiklio grupė	Rodiklis	Vertė	Matavimo vienetai
Garintuvo kontūras	Žemos temperatūros šilumos šaltinio galia	1200	kW
	Šaltnešio temperatūra įtekėjime	40	° C

Rodiklio grupė	Rodiklis	Vertė	Matavimo vienetai
(šilumos šaltinis - DKE II kondensatas)	Šaltnešio temperatūra įtekėjime	20	° C
	Šaltnešio srautas	51,6	t/h
	Eigų skaičius	8	
	Hidrodinaminis pasipriešinimas	94	kPa
	Projektinis slėgis	1	MPa
	Šilumos perdavimo efektyvumo mažėjimo faktorius	0,018	m ² ·° C /kW
	Garintuvo kontūro purkštuko dydis	100	mm
Absorberio ir kondensatoriaus kontūrai	Suminė šiluminė galia	2676	kW
	Termofikacinio vandens temperatūra įtekėjime	48	° C
	Termofikacinio vandens temperatūra ištekėjime	52,9	° C
	Termofikacinio vandens srautas	470	t/h
	Absorberio eigų skaičius	2	
	Kondensatoriaus eigų skaičius	2	
	Hidrodinaminis pasipriešinimas	108	kPa
	Projektinis slėgis	1	MPa
	Šilumos perdavimo efektyvumo mažėjimo faktorius	0,044	m ² ·° C /kW
	Absorberio ir kondensatoriaus kontūrų purkštuko dydis	250	mm
Generatoriaus kontūras	Varančioji šiluminė galia	1476	kW
	Kaitinančiojo vandens temperatūra įtekėjime	110	° C
	Kaitinančiojo vandens temperatūra ištekėjime	100	° C
	Kaitinančiojo vandens srautas	127	t/h
	Eigų skaičius	2	
	Hidrodinaminis pasipriešinimas	27	kPa
	Projektinis slėgis	1	MPa
	Šilumos perdavimo efektyvumo mažėjimo faktorius	0,018	m ² ·° C /kW
	Generatoriaus kontūro purkštuko dydis	125	mm
Bendrieji parametrai	Šildymo našumo koeficientas	1,81	
	Generatoriaus kontūro srautą reguliuojančio vožtuvo hidrodinaminis pasipriešinimas darbinėje padėtyje	41	kPa
	Reguliuojančio vožtuvo nominalus dydis	125	mm
Gabaritai	Ilgis	5912	mm
	Plotis	1662	mm
	Aukštis	2904	mm

Rodiklio grupė	Rodiklis	Vertė	Matavimo vienetai
Svoris	Darbinis	17,4	t
	Transportavimo	13,8	t

3.2.3 Antros pakopos dūmų kondensacinio ekonomizaierio technologijos parinkimas

Apibrėžiant pirmos pakopos dūmų kondensacinę ekonomizaierį ir parenkant projektavimo etape technologinį sprendinį, svarbu įvertinti šiuos kriterijus:

- degimo produktų ir kondensacinio ekonomizaierio šilumokaičio aušinamojo kontūro fluido temperatūriniai režimai bei režiai,
- termofikacinio ar kito technologinio vandens srautų kiekiai,
- emisijos: kietųjų dalelių, koroziją sukeliančių komponentų koncentracijos degimo produktuose,
- gabaritai, aptarnavimo zonos bei išpildymas,
- ekonominiai rodikliai: investiciniai kaštai, kintamosios ir pastoviosios eksploatacinės sąnaudų dedamosios,
- projekto įgyvendinimo laikotarpis.

Projektuojant antros pakopos dūmų kondensacinę ekonomizaierį, technologiją apibrėžiantys veiksniai iš esmės yra analogiški pirmos pakopos dūmų kondensaciniam ekonomizaieriui. Tačiau, esminis skirtumas tarp pirmos ir antros pakopų dūmų kondensacinių ekonomizaierių technologijos kraštinių sąlygų apibrėžimo yra tas, kad vietoje termofikacinio vandens ar kito aušinančiojo darbinio fluido, srautų bei temperatūrų dinamiką nulemia absorbcinio šilumos siurblio darbinių parametrų charakteristikos. Siekiant, kad antros pakopos dūmų kondensacinio ekonomizaierio ir absorbcinio šilumos siurblio kompleksinė technologija būtų ekonomiškai konkurencinga ir energetiškai efektyvi, dažniausiu atveju skirtingų režimų metu maksimalų energetinį potencialą apibrėžia absorbcinio šilumos siurblio ypatybės, o antros pakopos dūmų kondensacinis ekonomizaieris privalo būti technologiškai adaptyvus režimams.

Pirmos pakopos dūmų kondensacinio ekonomizaierio galia įprastai reguliuojama programuojamu loginiu valdikliu, nustatčius algoritmą didinti ar mažinti aušinančiojo fluido srautą, siekiant išlaikyti numatytą temperatūrų skirtumą tarp į pirmos pakopos dūmų kondensacinę ekonomizaierį atitekančio aušinančiojo fluido ir ištekančių degimo produktų.

Antros pakopos dūmų kondensaciniam ekonomizaieriui pastaroji galios reguliavimo analogija nepritaikoma, kadangi absorbcinis šilumos siurblys griežtai apibrėžia nominalių temperatūrų ir srautų parametrų vertes, kurias išpildžius, absorbcinis šilumos siurblys gali dirbti optimaliausiu nominaliu režimu, o jų nepasiekus ar viršijus, nepaisant degimo produktuose esamo šiluminės energijos potencialo, bendra DKE II ir AŠS sistema dirbs ne efektyvumo pike. Todėl labai svarbu tinkamai organizuoti ir optimizuoti antros pakopos dūmų kondensacinio ekonomizaierio darbą bei charakteringus darbo parametrus organizuoti taip, kad absorbcinis šilumos siurblys veiktų kaip įmanoma optimaliai.

3.3 Žemos temperatūros kondensacinių ekonomaizerio empirinių duomenų apžvalga

Šilumos ir masės mainų įrenginiai – šilumokaičiai bei jų įrengimų termohidromechaniniai skaičiavimai ir būdingi parametrai, pritaikomumo praktikoje analizės inžinerinės srities atstovams buvo prieinamos jau XX amžiaus pirmoje pusėje [24]. Sparčiai vystantis energetikos pramonei, ilgainiui, dėl itin sparčiai naudojamų iškastinių kuro išteklių energijos gamybai, susidurta su globaliniais klimato kaitos reiškiniais, kurie ilgainiui tik stiprėjo. Siekiant suvaldyti klimato kaitos procesą bei ilgalaikėje tendencijoje mažinti veiksnius, spartinančius procesą, 2003 m. spalio 13 d. Briuselyje buvo priimta Europos Parlamento ir Tarybos direktyva 2003/87/EB [25], nustatanti šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijos leidimų sistemą ir padedanti pirmąjį tvirtą strateginį žingsnį ekologinės problemos suvaldymui. Kadangi bendras pasaulio suvartojamos energijos kiekis nuo 1950 metų iki šių dienų auga eksponentiškai [26], vienas iš pagrindinių būdų, mažinti klimato efektą sukeliančių dujų emisijas optimizuojant, modernizuojant ir efektyvinant energijos gamybos technologijas, jas plečiant bei diegiant naujas.

Be šiluminės ir/ ar elektros energijos gamybos tipo, kitas, itin svarbus kriterijus, siekiant sumažinti šiltnamio efektą sukeliančias emisijas – esamų energijos gamybos įrenginių efektyvinimas. Tokiu būdu, pagaminamas šiluminės ir/ ar elektros energijos kiekis sunaudojant mažesnę kiekį kuro – pirminio energijos šaltinio. Regionuose, kuriuose biokuro energetikos plėtra buvo pradėta 2010 – 2012 metais, šilumos gamybai efektyvinti iškart buvo įdiegiami kondensaciniai dūmų ekonomaizeriai, galintys papildomai padidinti biokurą deginančios katilinės efektyvumą iki 20 – 30 % nuo nominalios katilų galios.

Šiai dienai, dūmų kondensacinis ekonomaizeris yra neatsiejama technologinės visumos dalis energetiniuose objektuose, deginančiuose biokurą ar gamtines dujas, jeigu tik yra techninės galimybės efektyviai ir ekonomiškai pagrįstai tą padaryti:

- technologinis aušinantysis vanduo (termofikacinis vanduo) turi būti tiekiamas į kondensacinį ekonomaizerį temperatūros, žemesnės nei degimo produktuose (dūmuose) esančio vandens garo rasos taško temperatūra,
- deginama 30 – 60 % drėgmės smulkinta mediena ar dujinis kuras, kurio degimo produktuose (dūmuose) termocheminių reakcijų metu susidaro vandens garas.

Dūmų kondensacinio ekonomaizerio termohidromechaniniai procesai bei charakteringų parametru priklausomybės šiai dienai yra itin plačiai išgvildinti mokslinių grupių bei pramonės įmonių, mokslo leidinių duomenų bazėse sukaupti šių šilumos ir masės mainų įrenginių teoriniai projektiniai skaičiavimai su empiriniais pataisos kriterijais, įgytais eksperimentuojant su įranga realiomis eksploatacinėmis arba tyrimų bazės sukurtomis, priimtomis sąlygomis.

Dėl santykinai didelio temperatūrų skirtumo tarp degimo produktų ir aušinančiojo technologinio vandens, susidaro nepalyginamai didesnė mastelio terminė varančioji jėga, nulemianti, kad šilumos ir masės mainų procesams įvykdyti iki užsibrėžtų parametru, reikalingas mažesnis kontakto paviršius bei trumpesnis fluidų dalyvavimas sąveikoje. Deja, sukaupti dideli informaciniai išteklių dalinai arba visai netinkami projektuoti antros pakopos dūmų kondensacinį ekonomaizerį, bei pritaikyti darbui su gilesnio vėsinimo įrenginiais, tokiais kaip šilumos siurblys.

Antros pakopos dūmų kondensaciniame ekonomaizeryje šilumos ir masės mainuose dalyvaujantys fluidai yra daug mažesnės terminės varančiosios jėgos sąveikos sistemoje, dėl santykinai mažo temperatūrų skirtumo tarp jų. Norint išvengti didelės technologinės rizikos veiksnių, technologiškai

parinkti ir paskaičiuoti antros pakopos dūmų kondensacinio ekonomizaizerio įrenginį pasitelkiamos viešai arba specialaus priėjimo reikalaujančių mokslo bendruomenių duomenų bazių archyvuose skelbiamos publikacijos, empirinių rodiklių ir išvestinių palyginamųjų kriterijų variacijos.

Žemesnės dūmų temperatūros nei įprasta (įtekančių į kondensacinį įrenginį degimo produktų temperatūra $<65\text{ }^{\circ}\text{C}$), kondensaciniai ekonomizaizeriai įprastai projektuojami tiesioginio kontakto su išvystyto šilumos ir masės mainų paviršiaus įkrova. Santykinai mažame būdingame darbiname tūryje, lyginant su dūmavamzdžių dūmų kondensaciniu ekonomizaizeriu, tiesioginio kontakto su integruota įkrova kondensaciniame ekonomizaizeryje išvystomas šilumos ir masės mainų paviršiaus plotas gali būti iki 2 – 5 kartų didesnis [27]. Siekiant minimizuoti žemos dūmų temperatūros antros pakopos dūmų kondensacinio ekonomizaizerio gabaritus, įmanoma integruoti vandens vamzdžių technologiją, tačiau šis sprendinio patikimumas ir efektyvumas yra labai priklausomas nuo degimo produktuose esančių kietųjų dalelių koncentracijos ir dažniausiai tinkamas tik dujiniu kuru kūrenamiems energetiniams įrenginiams [28].

Eksperimentinėse bazėse detalai analizuota ir tiesioginio kontakto vertikalūs bei horizontalūs žemos dūmų temperatūros kondensaciniai ekonomizaizeriai sinerginėje sistemoje su žemos temperatūros aušinančiaisiais kontūrais, siekiant imituoti darbą su šilumos siurbliais. Esminė problema, kurios nepavyko išspręsti – be išvystyto didelio šilumos ir masės mainų ploto (įkrovos), kondensaciniame įrenginyje privalėjo būti išpurškiamas iki 3 – 5 kartų didesnis dūmus aušinančiojo fluideo kiekis, kas lėmė itin išaugusias elektros sąnaudas ir sunkų technologinį suderinamumą su kompresoriniu ar absorbciniu šilumos siurbliu. Tiesioginio kontakto vertikaliame ar horizontaliame dūmų kondensaciniame ekonomizaizeryje be išvystyto šilumos ir masės mainų paviršiaus įkrovos, išpurkštas dūmus aušinantysis fluideo šilumokaitos procese išbūna daug trumpiau ir dėl mažos terminės varančiosios jėgos, apatiniame kolektoriuje surenkamas santykinai nedaug pašilęs. Norint perduoti ekvivalentų šiluminės energijos kiekį iš dūmų kondensatui, tiesioginio kontakto kondensaciniame ekonomizaizeryje be įkrovos elementų, reikia purkšti tiek kartų daugiau kondensato, kiek kartų sumažėjo temperatūrų skirtumas tarp išpurškiamo ir surenkamo dūmus aušinančiojo fluideo. Gal įterpti balanso formulę? Įprastai, absorbcinio šilumos siurblio vėsiausias (garintuvo) šilumokaičio kontūras projektuojamas gamintojų dirbti išlaikant $8 - 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrų skirtumą tarp įtekančio ir ištekančio fluideo linijų. Mažinti šilumnešio (antro laipsnio dūmų kondensacinio ekonomizaizerio kondensato) temperatūrų skirtumą, konstrukciniu – mechaniniu ir ekonominiu atžvilgiu nėra efektyvu, kadangi tokiu atveju išaugtų projektinis šilumą sutiekiančio fluideo (kondensato) debitas, norint optimizuoti elektros sąnaudas dėl padidėjusio hidrodinaminio pasipriešinimo, tektų didinti absorbcinio šilumos siurblio garintuvo kontūro šilumokaitę. Garintuvo kontūre yra sukuriamas gilus vakuumas ($0,01 - 0,25\text{ bar(a)}$), konstrukcijos yra masyvios, todėl bet koks šio kontūro šilumokaičio gabarito didinimas, iki tam tikro mastelio faktoriaus yra ekonomiškai neoptimalus sprendinys, o nuo tam tikro gabarito – ir stipruminio konstravimo sprendinio sukūrimo iššūkis.

Mokslinių straipsnių ir tyrimų duombazėse „Researchgate, „Science direct“, „Springer, „Google mokslinčius“ prieinamų duomenų analize remiantis, siekiant optimizuoti sinerginės antros pakopos dūmų kondensacinio ekonomizaizerio ir absorbcinio šilumos siurblio įrengimo kaštus, optimaliausia kondensacinio įrenginio konstrukcija – tiesioginio kontakto priešpriešinių srautų dūmų kondensacinis ekonomizaizeris su išvystyto šilumos ir masės mainų paviršiaus įkrova [29].

Priešrovinio tiesioginio kontakto antros pakopos dūmų kondensacinio ekonomizaizerio su išvystyto šilumos ir masės mainų paviršiaus įkrova konstrukcijos ir darbo optimizavimo projektiniai darbai pradedami išanalizavus esminius technologinius kriterijus, kurie tarpusavyje turi būti įvertinti.

Pasirenkamos kraštinės sąlygos

Identifikuojamos arba priimamos dūmų fizikinės (srautas, temperatūra) ir cheminės (elementinė sudėtis, gretutiniai elementai) savybės ir nustatomas šiluminės energijos likutinis potencialas degimo produktuose [30].

Pagal technologiškai ir ekonomiškai optimaliausio absorbcinio šilumos siurblio techninius darbo parametrus (garintuvo kontūras) priimama išpurškiamo dūmus aušinančiojo fluideo (kondensato) termodinaminiai rodikliai (temperatūros bei jų skirtumas tarp pašilusio ir atvėsinto kondensato, srautas ir reikiamos perduoti šiluminės energijos kiekis skirtingais įrangos aprovimo režimais) [31]. Šiame etape faktiškai identifikuojamas maksimalus leistinas išpurškiamo į šilumos ir masės mainų tūrį kondensato srautas, su kuriuo privalu pasiekti nominalią antros pakopos dūmų kondensacinio ekonomizaizerio ir absorbcinio šilumos siurblio garintuvo kontūro šiluminę galią.

Identifikuojami faktiškai norimo įdiegti antros pakopos kondensacinio ekonomizaizerio konstrukcijos gabaritus ribojimai, jeigu tokie yra. Nenustačius gabaritų ribojimų, remiantis inžinerinio – technologinio racionalumo kriterijumi, konstrukcijos gabaritai nulemiami aerodinaminių ir hidrodinaminių pasipriešinimų optimizavimo kriterijais.

Parenkama šilumos ir masės mainų išvystyto paviršiaus įkrova, jos elementai ir būdingi rodikliai. Šios dalies inicijavimui turi įtakos užsibrėžti geometriniai kriterijai, jeigu tokie buvo identifikuoti. Atliekami skaičiavimai remiantis įkrovos elementų techninėmis charakteristikomis ir empiriniais duomenimis [32].

Parenkama kondensato išpurškimo sistema: kolektoriai, purkštukai, kokybiniai jų parametrai, dispersijos charakteristikos ir išdėstymas sistemoje [33].

Atliekami pirminės konstrukcijos aerodinaminiai skaičiavimai, kuriais remiantis nustatomi kondensacinio ekonomizaizerio gabaritai, degimo produktų įtekėjimo ir ištekėjimo kanalai, jų išdėstymas.

Jeigu po pirminio antros pakopos dūmų kondensacinio ekonomizaizerio projektavimo etapo nei vieno etapo rezultatai neoponuoja tarpusavyje, projektavimo etapas baigiamas ir išdetalizuota technologija laikoma maksimaliai optimalia.

4 Antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio projektavimas

4.1 Antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio šiluminės galios potencialo įvertinimas

Antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio šiluminės galios potencialas nustatomas atlikus šiluminio balanso skaičiavimus dūmų daliai. Jeigu sąlygos nenumato kitaip, atliekami dviejų tipų antros pakopos dūmų kondensacinio ekonomaizerio šiluminės galios įvertinimai:

- kuomet nėra apibrėžta reikalaujama išgauti antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio ir absorbcinio šilumos siurblio garintuvo kontūro galia, parenkama dūmų atvėsavimo technologija pagal optimaliausią absorbcinio šilumos siurblio garintuvo kontūro temperatūrų režiminę suvestinę,
- kuomet yra apibrėžta antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio ir absorbcinio šilumos siurblio garintuvo šiluminė galia, pagal reikiamą pasiekti atvėsintų dūmų temperatūrą po antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio, parenkamas toks absorbcinis šilumos siurblys, kad jo garintuvo režiminiai temperatūriniai parametrai tenkintų šilumos srautų balansą dūmų daliai.

Įprastai, investuojantis subjektas į antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio ir absorbcinio šilumos siurblio technologinę sistemą jau turi pagrindinius, norimos įdiegti, įrangos techninius rodiklius (šiluminė galia, technologinių kontūrų debitai), apskaičiuotus galimybių studijos rengimo stadijoje ir įvertintus beruošiant investicinį planą. Tokiu atveju, pradėdant antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio projektavimo darbus, atliekamas šilumos balanso skaičiavimas dūmų daliai, kad nustatyti iki kokios temperatūros užsibrėžtomis sąlygomis reikia atvėsinti degimo produktus, norint išgauti reikalaujamą šiluminę galią.

Šiuo atveju antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio galia apibrėžta bei suteikta biokurą deginančių ir šilumą gaminančių įrenginių charakteristikų suvestinė (žr. 5 lentelę). Detalizuoti reikiami užtikrinti (garantinio darbo taško) parametrai pateikiami 9 lentelėje.

9 lentelė. Antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio garantinio taško apibrėžti ir apskaičiuoti parametrai

Garantinio darbo taško rodikliai ir jų vertės		
Rodiklio Nr.	Rodiklio pavadinimas	Rodiklio vertė
1	Katilų apkrovimas, %	100
2	Katilų šiluminė galia, MW	16
3	Katilo naudingo veiksmo koeficientas	86
4	Kuro drėgnis, %	45
5	Deguonies kiekis sausuose dūmuose, %	6
6	Dūmų temp. į DKE I, °C	180
7	Sausų dūmų kiekis į DKE I, Nm ³ /h	25076
8	Vandens garo kiekis dūmuose į DKE I, Nm ³ /h	6546
9	Bendras dūmų kiekis į DKE I, Nm ³ /h	31622
10	Bendras dūmų kiekis į DKE I, m ³ /h	52472

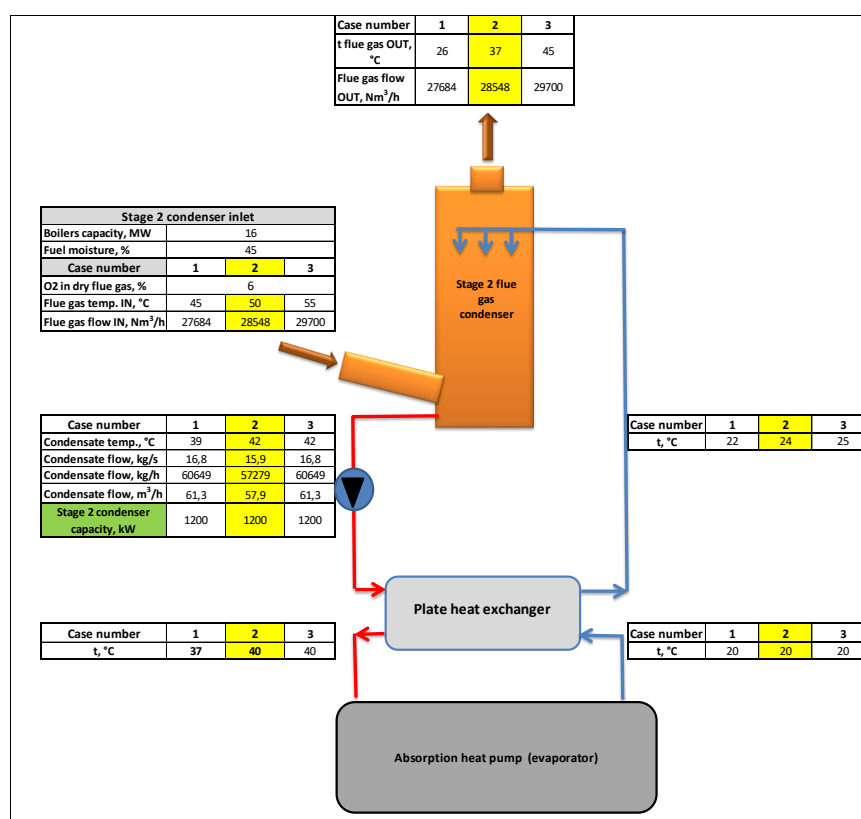
Garantinio darbo taško rodikliai ir jų vertės		
Rodiklio Nr.	Rodiklio pavadinimas	Rodiklio vertė
11	Santykinė dūmų drėgmė prieš DKE I, %	2,15
12	Dūmuose esančio vandens garo rasos taško temp. prieš DKE I, °C	61,67
13	Dūmų temp. po DKE I, °C	50
14	Bendras dūmų kiekis po DKE I, Nm ³ /h	28548
15	Bendras dūmų kiekis po DKE I, m ³ /h	33776
16	Vandens garo tūrio dalis bendrame dūmų po DKE I kiekyje, %	12,2
17	DKE I šiluminė galia, MW	3,37
18	Dūmų temp. į DKE II, °C	50
19	Santykinė dūmų drėgmė į DKE II, %	100
20	Dūmuose esančio vandens garo rasos taško temp. į DKE II, °C	50
21	Dūmų temp. po DKE II, °C	37
22	DKE I šiluminė galia, MW	3,37
23	DKE I + II suminė galia, MW	4,71
24	DKE II šiluminė galia, MW	≥1,2
25	Bendras dūmų kiekis po DKE II, Nm ³ /h	26748
26	Bendras dūmų kiekis po DKE II, m ³ /h	30373
27	Vandens garo tūrio dalis bendrame dūmų po DKE I kiekyje, %	6,21
28	DKE II susidariusio kondensato kiekis, kg/h	1322
29	DKE II šiluminė galia, MW	1,22
30	Kondensato temp. prieš šilumokaitį, °C	42
31	Kondensato temp. po šilumokaičio, °C	24
32	Kondensato srautas per šilumokaitį, kg/s	16,15
33	Kondensato srautas per šilumokaitį, kg/h	58147
34	Kondensato srautas per šilumokaitį, m ³ /h	58,44
35	Kondensatų aušinančio fluideo temp. (įtekančio/ ištekančio iš šilumokaičio) AŠS garintuvo kontūre °C	20/40
a) Pilkai pažymėtuose langeliuose pateikti garantiniai parametrai. b) Baltuose langeliuose pateikti išskaičiuoti garantinio darbo taško parametrai, kurie gali kisti. c) Rusvuose langeliuose pateikti skaičiavimams priimtos parametrų vertės.		

Siekiant minimizuoti neapibrėžčių kiekį garantinio darbo taško parametrų suvestinėje, lygiagrečiai esamiems (investuotojo apibrėžtiems) parametrams, priimami ir apskaičiuojami kiti, būdingi rodikliai. Degimo procesų ir šilumos balanso skaičiavimai atliekami programine įranga „POWER

PLANT SIMULATOR & DESIGNER“ (PPSD) [34]. Patikrinamieji validaciniai skaičiavimai atliekami su programine įranga „EnviLoop FlueGas“.

4 lentelėje pilkai pažymėti ir privalomi užtikrinti parametrai tarpusavyje yra susiję bei esant bent vieno garantinio (investuotojo pateikto, pilkai pažymėto) parametro neatitikčiai, technologinėje sistemoje kinta ir kiti darbo parametrai. Jų pokyčio tarpusavyje priklausomybės, esant poreikiui atvaizduojamos charakteringų parametų korekcinių kreivių ir įtakos pokyčiui grafikuose. Korekcinių kreivių sistemą optimaliausia parengti esant ne daugiau kaip 3 – 4 tarpusavyje priklausomiems rodikliams.

DKE II garantinio darbo taško ir kitų, kraštinių atvejų darbo parametų skaičiavimų su „POWER PLANT SIMULATOR & DESIGNER“ (PPSD) ir „EnviLoop FlueGas“ programinėmis įrangomis, patikrinamieji balansiniai skaičiavimai atliekami „MS Excel Visual basic“ pakete. Vizualinė patikrintų ir validžių parametų pateiktis matoma 11 paveiksle.



11 pav. Antros pakopos kondensacinio ekonomizerio projektavimo charakteringų parametų patikros skaičiavimai „MS Excel Visual basic“ programos lange ir rezultatų technologinio vizualumo pateiktis

Gauti susisteminti rezultatai naudojami sekančiuose etapuose projektuojant šilumos ir masės mainų išvystyto paviršiaus įkrovą.

4.2 šilumos ir masės mainų išvystyto paviršiaus įkrovos projektavimas ir parinkimas

Išvystyto ploto įkrovos parinkimas yra vienas kertinių antros pakopos kondensacinio ekonomizerio technologinio projektavimo žingsnių, kadangi iš esmės apibrėžia ekonomizerio gabaritus ir didžiąja dalimi daro įtaką galutinei įrenginio konstrukcijos kainai.

Įkrovos charakterizavimui nustatomi pradiniai mechaniniai kriterijai, kurie sekantiems įkrovos projektiniams skaičiavimams susiaurina pasirinkimų imtį ir leidžia greičiau atlikti technologijos projektavimo darbus. Pradiniai kriterijai, apibrėžiantys įkrovos elementų technologinę imtį:

- kontaktuojančių medžiagų suderinamumas (įkrovos elementų medžiagai parinkti),
- temperatūrų diapazonas bei laikymo sąlygos (darbo, aptarnavimo ir sandėliavimo metu),
- stipruminės charakteristikos (būtina, norint apibrėžti maksimalų leistiną įkrovos sluoksnio storį).

Identifikavus išvystyto paviršiaus šilumos ir masės mainų įkrovos elementų tipą, atliekami šie technologinio projektavimo etapai:

- identifikuojami fizikiniai hidrodinaminiai, aerodinaminiai kriterijai ir atliekami charakteringų parametrų palyginimai,
- palyginamosios analizės metu minimizuojama įkrovos elementų pasirinkimo imtis,
- atliekami detalių charakteristikų skaičiavimai kiekvieno potencialaus pasirinkti įkrovos elemento modeliui,
- pasirinktų įkrovos elementų tūrio išdėstymo (diametro ir aukščio santykio) nustatymas.

4.2.1 Įkrovos elementų charakterizavimas ir mechaninių kriterijų nustatymas

Įkrovos elementai įprastai gaminami iš:

- plastiko,
- metalų ir jų mišinių,
- keramikos.

Plastikai labiausiai tinka naudoti sistemose, kur jų maksimali darbinė temperatūra nepasiekia daugiau kaip 90 – 100 °C. Plastikiniai (PP – polipropilenas, PVC – polivinilchloridas, ETFE ir PTFE – teflonas) įkrovos elementai gamybos proceso metu yra liejami, jų tankis santykinai mažas (40 – 110 kg/m³), atitinkami plastikai gali būti eksploatuojami stipriai rūgštinėje ir šarminėje aplinkoje. Plastikinės įkrovos gamyba ir transportavimas santykinai pigūs, lyginant su metalo ir keramikos įkrovos elementais. Didžiausias trūkumas – sandėliavimo ir eksploatavimo aplinkos užtikrinimas su apsauga nuo tiesioginių ultravioletinių Saulės spindulių, kurie gali negrįžtamai pažeisti elementų elastingumą. Priklausomai nuo vienetinio elemento konstrukcinių savybių, apatiniams įkrovos elementams galima maksimali apkrova 500 – 1200 kg/m².

Metalų ir jų mišinių įkrovos elementai dažniausiai naudojami aukštesnės temperatūros darbo aplinkai (110 – 450 °C). Šių elementų piltinis tankis gali siekti (450 – 3000 kg/m³), dėl ko šio tipo įkrovos gamybai sunaudojama didelė metalų išeiga, kas lemia galutinio produkto brangumą. Metalų įkrovos elementai, priklausomai nuo cheminės sudėties, gali būti liejami arba gaminami iš ruošinių, juos surenkant, suvirinant, todėl šie elementai naudojami kuomet reikalingas specifinis įkrovos elementų dizainas ir struktūra. Priklausomai nuo vienetinio elemento konstrukcinių savybių, apatiniams įkrovos elementams galima maksimali apkrova 1500 – 3000 kg/m².

Keramikiniai įkrovos elementai yra brangiausi, dėl jų gamybos specifikos ir trapumo. Keramika itin trapi kuomet yra sausa. Piltinis tankis gali siekti (350 – 1800 kg/m³). Priklausomai nuo vienetinio elemento konstrukcinių savybių, apatiniams įkrovos elementams galima maksimali apkrova 300 –

800 kg/m². Keramika įprastai naudojama kaip katalizatorius ar korėtas paviršius cheminių procesų reakcijos bokštuose (skruberiuose), todėl vien tik šilumos ir masės mainams tokios medžiagos įkrovą integruoti – ekonomiškai nepatrauklu [35].

Biokuro (smulkintos medienos, pagal standarto LST EN ISO 17225-1:2014 B1 lentelę) [19] degimo metu susidarančiuose degimo produktuose yra junginių, kurie kondensuojantis ar vykstant cheminėms reakcijoms, sudaro produktus, galinčius energijos gamybos įrenginiuose sukurti agresyvias terpes. Pagrindiniai junginiai yra sieros oksidai (SO_x), kurie gali sudaryti sulfatus (SO₄), o pastarieji kondensuotis ant vėsių paviršių. Chloridai taip pat gali sukelti agresyvią terpę, todėl parenkant įkrovos elementų plastiko tipą, būtina įvertinti ir palyginti plastikų ir pavojingų komponentų suderinamumą.

10 lentelė. Įkrovos elementų cheminio suderinamumo palyginimas

Įkrovos elemento medžiaga	Cheminis komponentas						Tinkamumo balai (maks. vertė - 5 balai)
	Sulfatai (SO ₄)			Chloridai (Cl)			
	20 °C	60 °C	100 °C	20 °C	60 °C	100 °C	
Polipropilenas (PP)	A	A	N/A	A	A	N/A	5
Polivinilchloridas (PVC)	A	A	N/A	A	A	N/A	5
Etileno tetrafluoretilenas (ETFE)	A	A	A	A	A	A	5
Teflonas (PTFE)	A	A	A	A	A	A	5
Čia: A - Puikus suderinamumas, B - Geras suderinamumas, galimi smlukūs irimo požymiai, C - Tenkinamas suderinamumas, tinkamas trumpalaikiai eksploatacijai, D - Nesuderinamas medžiagų kontaktas, N/A - nėra duomenų.							

Visų analizuojamų plastikų cheminis suderinamumas su agresyviomis cheminėmis medžiagomis yra įvertintas puikiai [36]. Kadangi projektuojamo įrenginio maksimali eksploatacinė ilgalaikė temperatūra yra ≤ 80 °C ties dūmų įtekėjimo atvamzdžiu, o patys įkrovos elementai nuolat bus apipurškiami aušinančiuoju fluidu (kondensatu), priimama, kad nuolatinio darbo metu įkrovos elementai neįkaks iki aukštesnės nei 60 °C temperatūros. PP ir PVC įkrovos elementų medžiagų cheminio suderinamumo duomenų iki 60 °C pilnai pakanka įvertinti šių medžiagų tinkamumą kuriamai sistemai ir šios medžiagos, pagal cheminio suderinamumo kriterijų yra vienodai puikiai įvertintos kaip ir ETFE bei PTFE medžiagos [37].

11 lentelė. Įkrovos elementų plastikų mechaninių charakteristikų palyginimas

Palyginamasis parametras	
--------------------------	--

Įkrovos elemento medžiaga	Tankis, kg/m ³	Tamprumo modulis (elastingumas), GPa	Maksimali ilgalaikė darbinė temperatūra, °C	Atsparumas erozijai ir mechaniniam dilimui	Atsparumas UV spinduliams	Tinkamumo balai (maks. vertė - 5 balai)
Polipropilenas (PP)	900	3,5	90	A	C	5
Polivinilchloridas (PVC)	1440	1	60	A	B	4
Etileno tetrafluoretilenas (ETFE)	1700	0,8	155	B	A	3
Teflonas (PTFE)	2200	1,7	260	C	A	2

A - Puikus atsparumas,
B - galimi smulkūs degradacijos požymiai,
C - mažas atsparumas,
D - netinkamas eksploatuoti tokiomis sąlygomis.

Be cheminio suderinamumo su susidarančiais cheminiais junginiais darbo terpėje labai svarbu įvertinti ir mechaninius rodiklius, kurie gali nulemti konstrukcinius, eksploatavimo ir aptarnavimo ypatumus. Antros pakopos kondensacinio ekonomazerio konstrukcijos svorį ir dydį galima minimizuoti parenkant mažiausio tankio medžiagą. Šiuo atveju polipropilenas yra mažiausio tankio plastikas [38]. Taip pat labai svarbus yra medžiagos tamprumo modulio kriterijus. Kuo medžiaga elastingesnė, tuo didesnes išskirstytas apkrovas gali atlaikyti, o po deformavimo atkurti pradinę formą, nesuaižėti. Polipropilenas net iki 2 – 3 kartų yra elastingesnis už kitus, palyginamus plastikus (PVC, ETFE, PTFE) [39]. Įkrovos elementus veikiant trifaziams srautui (dujos, skystis ir kietosios dalelės) susidaro abrazyvi terpė. Didžiausią atsparumą mechaniniam nusidėvėjimui charakterizuoja polipropilenas (PP) ir polivinilchloridas (PVC). Deja, pastariesiems plastikams yra būtina užtikrinti apsaugą nuo tiesioginių Saulės spindulių, kadangi tiesioginė ultravioletinė (UV) spinduliuotė per 4 – 6 dienas gali negrįžtamai pakeisti plastikų molekulių tarpusavyje ryšį ir taip padaryti plastiko elementus trapiais [40].

Užtikrinus atitinkamas sandėliavimo ir eksploatavimo sąlygas ir apsaugant įkrovos elementus nuo tiesioginių Saulės spindulių, iš polipropileno (PP) plastiko pagaminti įkrovos elementai mechaninio, cheminio atsparumo atžvilgiais yra optimaliausias sprendinys, kuriuo bus remiamasi tolesniame technologiniame projektavime.

4.2.2 Įkrovos elementų hidrodinaminis ir termodinaminis projektiniai skaičiavimai

Siekiant užtikrinti antros pakopos kondensacinio ekonomazerio konstravimo, gamybos, surinkimo ir aptarnavimo paprastumą bei taip optimizuoti investicines bei einamąsias eksploatacines sąnaudas, priimama, kad kondensacinio ekonomazerio išvystyto šilumos iš masės mainų paviršiaus ploto įkrova bus chaotiško išdėstymo., t.y. atskiri įkrovos elementai bus atsitiktinai supilti į darbo tūrį [28]. Kondensacinio ekonomazerio įkrovos sistemos parinkimo ir charakteringų parametrų nustatymas atliekamas hidrodinaminių ir termodinaminių skaičiavimų programa „VFF – Packed tower design V14.1“ (žr. 12 pav.).



12 pav. Skirtingų tipų įkrovos elementų hidrodinaminių ir termodinaminių skaičiavimų programos „VFF – Packed tower design V14.1“ langai

Remiantis empirinėmis tiesioginio kontakto kondensacinio ekonomizerio su įkrova projektavimo charakteristikomis priimama, kad ant įkrovos elementų paviršiaus įvyksta 80 % projektinės šilumos ir masės pernašos. Likusi 20 % dalis šilumos perduodama dūmams ištekėjus iš įkrovos ir patekus į tūrinę kontakto zoną, kurioje yra gausus kiekis disperguotų vandens – kondensato mišinio lašelių [27]. Šiame būdingame tūryje šilumos ir masės mainai vyksta priešpriešiniame sraute tarp dujų ir skysčio, vietomis vandens garai besikondensuojant ant lašelio paviršiaus ir vietomis atitekančių degimo produktų entalpija sunaudojama vandens lašelio garinimui.

Projektuojant tiesioginio kontakto priešpriešinių srautų dūmų kondensacinio ekonomaizerio su išvystytu šilumos ir masės mainų paviršiumi papildomai šilumokaitos ploto atsargos koeficientas nevertinamas. Įkrovos hidrauliniuose ir termodinaminiuose skaičiavimuose vertinama, kad įkrovos tūryje iš dūmų skysčiui bus perduota visas užsibrėžtas šilumos kiekis. Tokiu būdu atsarga termodinaminių procesų vyksmui perkeliama į skysčio išpurškimo zoną be įkrovos, kur išpurkšto skysčio lašeliai tiesiogiai kontaktuoja su degimo produktais tūryje [41]. Šia projektavimo metodika užtikrinama, kad esant net ir prastai skysčio dispergavimo kokybei, bus užtikrinamas nominali antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio šiluminė galia duotosiomis sąlygomis.

Atliktų hidrodinaminių ir termodinaminių skaičiavimų su programiniu paketu „VFF – Packed tower design V14.1“ rezultatai susisteminti ir pateikiami 12 lentelėje.

12 lentelė. Įkrovos hidrodinaminių ir termodinaminių skaičiavimų programiniu paketu „VFF – Packed tower design V14.1“ rezultatų suvestinė

Parametro Nr.	Įkrovos eilės Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
1	Įkrovos tipas	Hiflow ring	SnowFlake	Nor-Pac spike	Pall ring Black	Envipac	Pall ring	Tellerette	Ralu ring
2	Paviršiaus plotas piltiniame tūryje, m ³ /m ²	165	142	135	124	115	102	96	85
3	Specifinis įkrovos svoris, kg/m ³	63	54	52	48	44	39	37	33
4	Laisvasis tūris, %	85	95	95	91	87	90	91	98
5	Dūmų srautas į DKE II, m ³ /h	33776							
6	Dūmų srautas iš DKE II, m ³ /h	30373							
7	Vidutinis srautas DKE II, m ³ /h	32235							
8	Maksimali projektinė vidutinio srauto vertė, m ³ /h	37070							
9	Dūmų srauto greitis prieš įkrovą, m/s	1,07	1,46	1,47	1,37	1,28	1,15	1,32	1,27
10	Dūmų srauto greitis įkrovoje be kondensato, m/s	1,57	1,70	1,70	1,63	1,60	1,42	1,62	1,43
11	Dūmų srauto greitis įkrovoje purškiant kondensatą, m/s	2,85	2,44	2,43	2,33	2,29	2,02	2,31	2,04

Parametro Nr.	Įkrovos eilės Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
12	Dūmų srauto užlaikymas įkrovoje, s	0,75	1,23	1,59	1,75	1,87	1,94	2,31	2,93
13	Dūmų srauto greitis užsėmimo faktoriui, m/s	2,95	3,2	3,35	3,4	3,27	3,4	3,25	3,64
14	Atsarga iki užsėmimo greičio, %	3,5	23,9	27,5	31,5	29,9	40,4	28,9	44,0
15	Dūmų temp. įtekėjime, °C	50							
16	Dūmų temp. ištekėjime, °C	37							
17	Kondensato srautas, m ³ /h	57,3							
18	Maksimalus projektinis kondensato srautas, m ³ /h	77,36							
19	Kondensato temp. išpurškime, °C	24							
20	Kondensato temp. surinkime, °C	42							
21	Kondensato kiekis dūmų tūriui, l/Nm ³	2,42							
22	Logaritminis temperatūrų skirtumas ΔT_{log} , K	7,21							
23	Apibendrintas šilumos perdavimo koeficientas α_{OG} , W/m ² ·K	50,3	57,1	46,9	45,1	43,4	47,8	43,1	41,8
24	DKE II šiluminė galia, MW	1,2							
25	Įkrovos išvystyto paviršiaus plotas, m ²	3414	3010	3662	3809	3962	3594	3985	4110
26	Įkrovos paviršiaus plotas šiluminės galios vienetui, m ² /MW	2845	2508	3052	3174	3302	2995	3321	3425

Parametro Nr.	Įkrovos eilės Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
27	DKE II vidinis diametras, m	3,51	3,00	2,99	3,10	3,20	3,38	3,15	3,21
28	Įkrovos sluoksnio storis, m	2,14	3,00	3,87	4,07	4,30	3,93	5,34	5,98
29	Įkrovos aukščio ir diametro santykis	0,61	1,00	1,30	1,31	1,34	1,16	1,70	1,86
30	Įkrovos kiekis, m ³	20,7	21,2	27,1	30,7	34,5	35,2	41,5	48,4
31	Išpurškiamo kondensato kiekis įkrovos skerspjūviui, m ³ /m ² ·h	8,00	10,95	11,04	10,26	9,65	8,62	9,95	9,56
32	Sausos įkrovos aerodinaminis pasipriešinimas, Pa/m	142	105	102	91	75	98	62	41
33	Aerodinaminis pasipriešinimas su purškiamu kondensatu, Pa/m	257	154	142	135	128	140	103	92
34	Sausos įkrovos aerodinaminis pasipriešinimas, Pa	304	315	395	371	322	385	331	245
35	Aerodinaminis pasipriešinimas su purškiamu kondensatu, Pa	550	462	550	550	550	550	550	550
36	Leistinas įkrovos aerodinaminis pasipriešinimas, Pa	550							
37	Užsilaikančio kondensato kiekis įkrovoje, l/m ³	68	45	40	41	32	38	30	22
38	Specifinis šlapios įkrovos svoris, kg/m ³	131	99	92	89	76	77	67	55
39	Įkrovos darbinis svoris, kg	2720	2098	2494	2724	2627	2721	2778	2645
40	DKE II ir pagalbinių įrenginių santykinė kaina	1	0,7	0,74	0,82	0,86	0,87	0,8	0,87

Hidrodinaminių ir termodinaminių skaičiavimų metu nustatyti skirtingų įkrovų elementų būdingi parametrai, apibrėžiantys antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio sistemos gabaritus bei numatomus palyginamuosius santykinius investicinius kaštus. Šiuo atveju optimaliausias konstrukcinis sprendinys pasiekiamas su įkrovos lementais Nr.2 „SnowFlake“ (žr. 12 lentelę). Didelę įtaką kondensacinio ekonomaizerio investicinių kaštų minimizavimui turi šie faktoriai: įrenginio svoris ir transportavimo ypatumai. Projektuojant antros pakopos kondensacinį ekonomaizerį, labai svarbu, kad jo transportavimo gabaritas, šiuo atveju diametras, neviršytų leistinų maksimalių leidžiamų transporto priemonių matmenų gabaritinio krovinio transportavimo metu [42]. Kitu atveju programinių skaičiavimų metu optimizuota konstrukcija su neužsibrėžtomis maksimaliomis gabaritų vertėmis, gali nulemti bendrą padidėjusią įrenginio kainą dėl nestandartinio transportavimo metodo.

4.2.3 Kondensato išpurškimo sistemos projektavimas

Kondensato išpurškimo sistema projektuojama remiantis trimis pagrindiniais kriterijais:

- technologinių charakteristikų palaikymas
- patikimumas
- aptarnavimo paprastumas

Projektuojant tiesioginio kontakto kondensacinio ekonomaizerio skysčio išpurškimo sistemą, ypatingai svarbu apsibrėžti kuriame būdingame atstume disperguotas skysčio srautas padengs visą dujų (dūmų) pratekėjimo skerspjūvio plotą. Minimalus atstumas, kuriame išpurškstas srautas pilnai turi padengti dūmų pratekėjimo plotą – 0,3 – 1,5 m [43]. Per daug atitrukta nuo įkrovos elementų paviršiaus išpurškimo pilno padengimo srauto zona gali lemti perteklinius gabaritus ar įrangos sienelių dėvėjimąsi, dėl nuolatinio srauto su abrazyviomis dalelėmis purškiamoms į įrenginio sienelės paviršių.

Dūmus aušinančiojo, išpurškiamo fluideo sistemos projektavimo etapai sudaromi eiliškumu:

- charakterizuojamas fluideo fizikinės savybės ir tūrinis srautas,
- nustatomi išpurškiamo fluideo kokybiniai parametrai purkštukų tipui ir medžiagai identifikuoti,
- nustatomas purkštukų kiekis ir pozicionavimo tvarka kondensaciniame ekonomaizeryje, remiantis užsiduotu dūmų pratekėjimo pilno skerspjūvio ploto padengimo atstumu nuo įkrovos elementų paviršiaus,
- parenkami aušinančiojo fluideo purkštukų modeliai ir nustatomi kokybiniai parametrai (priklausomybė tarp tūrinio srauto, dispersijos kokybinių parametrų ir fluideo slėgio) bei nominalaus darbo taško diapazonas,
- purkštukų kolektoriuose fluideo greitis parenkamas pagal fluideo fizikines savybes, kad nesukeltų vamzdynų priešlaikinės erozijos ir vibracijų.

Išpurškiamo fluideo fizikinės savybės pateikiamos 13 lentelėje.

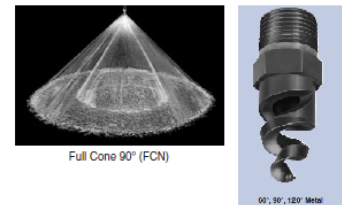
13 lentelė. Išpurškiamo fluideo fizikinės savybės

Parametras	Vertė
Fluideo tipas	Vanduo (kondensatas)

Priemaišos	Skendinčių dalelių pėdsakai
Temperatūra, °C	5...80
pH	4...10
Tankis, kg/m ³	999,93...971,76
Dinaminė klampa, Pa·s	1,522·10 ⁻³ ...3,537·10 ⁻⁵
Kinematinė klampa, m ² /s	1,521·10 ⁻⁶ ...3,639·10 ⁻¹⁰
Laidumas, μS/cm	500...10000
Debitas, m ³ /h	30...80

Remiantis išpurškiamo fluido fizikinių parametru suvestine (žr. 13 lentelę), dėl fluido pH reikšmės plataus diapazono, purkštukų medžiaga privalo būti atspari korozijai. Numatoma, kad kondensato sraute bus kietųjų skendinčių dalelių, kurios, esant dideliems srauto greičiams purkštuko konstrukcijoje, gali sukelti priešlaikinę eroziją ir pakeisti gamintojo numatytas išpurškimo kokybės charakteristikas. Pagal plienų markių atsparumo korozijai duomenų bazę parenkamas plienas, tinkantis purkštukų konstrukcinei medžiagai [44]. Parenkama purkštuko medžiaga – nerūdijantis plienas, markė „AISI 316“. Siekiant išvengti purkštukų erozijos ir galimo užsikimšimo, parenkami mažo slėgio atviro tipo purkštukai su papildomu srauto dispergavimo paviršiumi [45].

Parenkama energiją taupanti ir santykinai mažo darbo slėgio kondensato išpurškimo sistema, kurią sudaro 7 vienetai „BETE full cone 90° TF48“ purkštukų (žr. 13 paveikslą), išdėstyti šachmatiškai taip, kad išpurškiami tūriai persidengtų pilnai iki srautas pasiekia įkrovos paviršių.



TF Full Cone Flow Rates and Dimensions																		
Full Cone, 60° (NN), 90° (FCN or FFCN), 120° (FC or FFC), 150° and 170° Spray Angles, 1/8" to 4" Pipe Sizes, BSP or NPT																		
Male Pipe Size	Nozzle Number	Available Spray Angles	K Factor	LITERS PER MINUTE @ BAR							PTFE not recommended at pressures above red line Metal ONLY at pressures above green line	Approx. (mm) Orif. Dia. Pass Dia.	Dim. (mm) for Metal Only ¹ A B C	Wt. (g) 60° 90° 120° Metal Plas.				
				0.5 bar	0.7 bar	1 bar	2 bar	3 bar	5 bar	10 bar					20 bar			
1/8	TF6	60° 90° 120° 150° 170°	3.19	2.26	2.67	3.19	4.5	5.5	7.1	10.1	14.3	2.38	2.38	42.9	14.3	42.9	28	6
	TF8	60° 90° 120° 150° 170°	5.93	4.19	4.96	5.93	8.4	10.3	13.2	18.7	26.5	3.18	3.18	42.9	14.3	55.6		
1/4	TF6	60° 90° 120° 150° 170°	3.19	2.26	2.67	3.19	4.5	5.5	7.1	10.1	14.3	2.38	2.38	47.6	14.3	47.6	35	6
	TF8	60° 90° 120° 150° 170°	5.93	4.19	4.96	5.93	8.4	10.3	13.2	18.7	26.5	3.18	3.18	47.6	14.3	60.3		
3/8	TF10	60° 90° 120° 150° 170°	9.12	6.45	7.63	9.12	12.9	15.8	20.4	28.8	40.8	3.97	3.18	47.6	14.3	60.3	46	7
	TF6	60° 90° 120°	3.19	2.26	2.67	3.19	4.5	5.5	7.1	10.1	14.3	2.38	2.38	47.6	17.5	60.5		
1/2	TF8	60° 90° 120°	5.93	4.19	4.96	5.93	8.4	10.3	13.2	18.7	26.5	3.18	3.18	47.6	17.5	60.5	85	14
	TF10	60° 90° 120°	9.12	6.45	7.63	9.12	12.9	15.8	20.4	28.8	40.8	3.97	3.18	47.6	17.5	60.5		
3/4	TF12	60° 90° 120° 150° 170°	13.7	9.67	11.4	13.7	19.3	23.7	30.6	43.2	61.1	4.76	3.18	47.6	17.5	60.5	156	25
	TF14	60° 90° 120° 150° 170°	18.5	13.1	15.4	18.5	26.1	32.0	41.3	58.4	82.6	5.56	3.18	47.6	17.5	60.5		
1	TF16	60° 90° 120° 150° 170°	24.2	17.1	20.2	24.2	34.2	41.8	54.0	76.4	108	6.35	3.18	47.6	17.5	60.5	241	71
	TF20	60° 90° 120° 150° 170°	37.6	26.6	31.5	37.6	53.2	65.1	84.1	119	168	7.94	3.18	47.6	17.5	60.5		
1 1/2	TF24	60° 90° 120° 150° 170°	54.9	38.8	46.0	54.9	77.7	95.1	123	174	246	9.53	4.76	63.5	22.2	77.7	424	120
	TF28	60° 90° 120° 150° 170°	75.2	53.2	62.9	75.2	106	130	168	238	336	11.1	4.76	63.5	22.2	77.7		
2	TF32	60° 90° 120° 150° 170°	95.7	67.7	80.1	95.7	135	166	214	303	428	12.7	4.76	69.9	28.6	88.9	567	156
	TF40	60° 90° 120° 150° 170°	153	108	128	153	216	264	341	483	683	15.9	6.35	92.1	34.9	111		
3	TF48	60° 90° 120° 150° 170°	217	153	181	217	306	375	484	685	968	19.1	6.35	92.1	34.9	111	824	227
	TF56	60° 90° 120° 150° 170°	294	208	245	294	416	509	657	930	1320	22.2	7.94	111	50.8	137		
4	TF64	60° 90° 120° 150° 170°	385	272	322	385	545	667	861	1220	1720	25.4	7.94	111	50.8	137	1300	255
	TF72	60° 90° 120° 150° 170°	438	309	366	438	619	758	978	1380	1960	28.6	7.94	111	50.8	143		
5	TF88	60° 90° 120° 150° 170°	638	451	534	638	902	1110	1430	2020	2850	34.9	11.1	143	63.5	175	1530	255
	TF96 ¹	60° 90° 120° 150° 170°	806	570	674	806	1140	1400	1800	2550	3600	38.1	11.1	176	63.5	178		
6	TF112 ¹	60° 90° 120° 150° 170°	1170	825	976	1170	1650	2020	2610	3690	5220	44.5	14.3	219	88.9	235	1530	255
	TF128 ¹	60° 90° 120° 150° 170°	1550	1090	1290	1550	2190	2680	3460	4891	6920	50.8	14.3	219	88.9	235		
7	TF160 ¹	60° 90° 120°	2390	1690	2000	2390	3380	4140	5350	7570	10700	63.5	15.9	257	114	4790	765	

Flow Rate (l/min) = K√Bar *Dimensions are for bar stock, cast sizes may vary. **60° nozzles slightly longer; call BETE for details ¹Three turn nozzles

Standard Materials: Brass, 316 Stainless Steel, PVC, Polypropylene, and PTFE (Poly not available for TFs thru TF16).

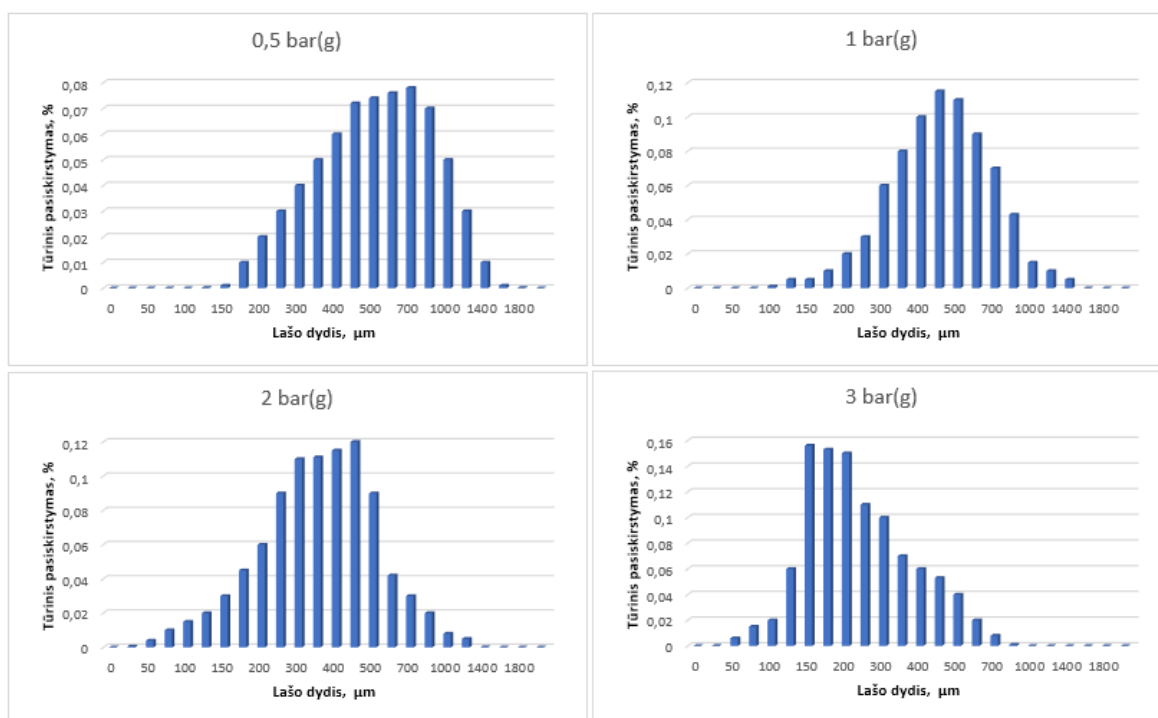
13 pav. Fluido purkštuko parinkimo lentelė pagal išpurškiamo srauto priklausomybę nuo modelio tipo ir slėgio

Nerūdijančio plieno „AISI316“ „TF48 90“ modelio purkštukų sistema projektuojama atsižvelgiant į faktorių, jog esant poreikiui keisti išpurškiamo fluido dispergavimo kokybinius parametrus, išliktų techninė galimybė padengti visą dūmų pratekėjimo skerspjūvio plotą išlaikant ekvivalentų kondensato debitą per kintantį veikiančių purkštukų kiekį. 14 lentelėje pateikti gelsvai pažymėti projektiniai darbo slėgio ir kondensato srauto diapazonai, priklausomai nuo veikiančių purkštukų kiekio.

14 lentelė. TF48 purkštukų darbo slėgio ir srauto priklausomybė nuo veikiančių purkštukų kiekio

Purkštukų kiekis, vnt	Slėgis, bar(g)							
	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	
1	153,4	217,0	265,8	306,9	343,1	375,9	406,0	l/min
1	9,2	13,0	15,9	18,4	20,6	22,6	24,4	m ³ /h
3	27,6	39,1	47,8	55,2	61,8	67,7	73,1	m ³ /h
4	36,8	52,1	63,8	73,7	82,3	90,2	97,4	m ³ /h
7	64,4	91,1	111,6	128,9	144,1	157,9	170,5	m ³ /h

„TF48 90“ purkštuko lašelių dydžio pasiskirstymas išpurškiamo fluido tūrio dalyje pateikiama 15 paveiksle.

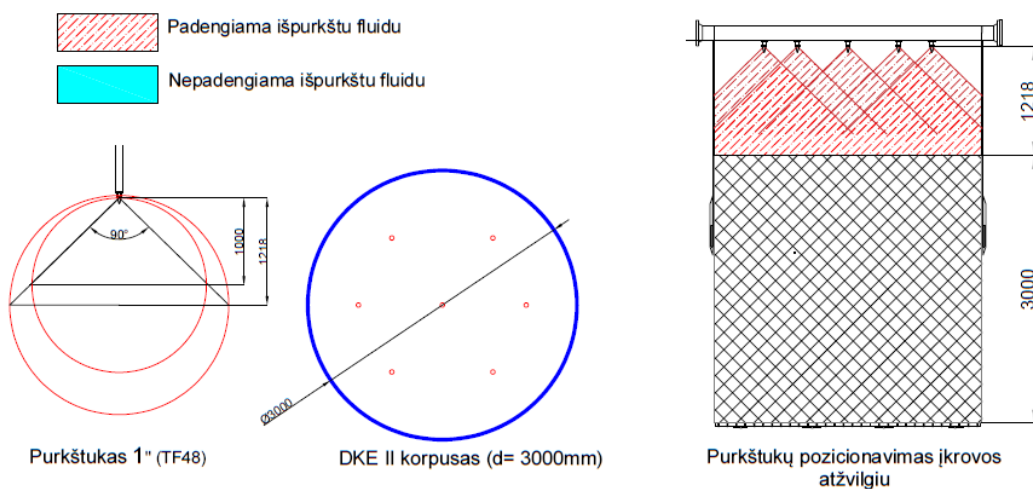


14 pav. Purkštuko „TF48 90“ išpurškiamų lašų dydžio dispersijos priklausomybė nuo slėgio

Lašelių dydžio tūrinis pasiskirstymas prie skirtingų išpurškimo slėgio verčių itin svarbus rodiklis įrenginio technologinio derinimo metu, kuomet nustatomas optimalus darbo parametrų ir energijos sąnaudų santykis.

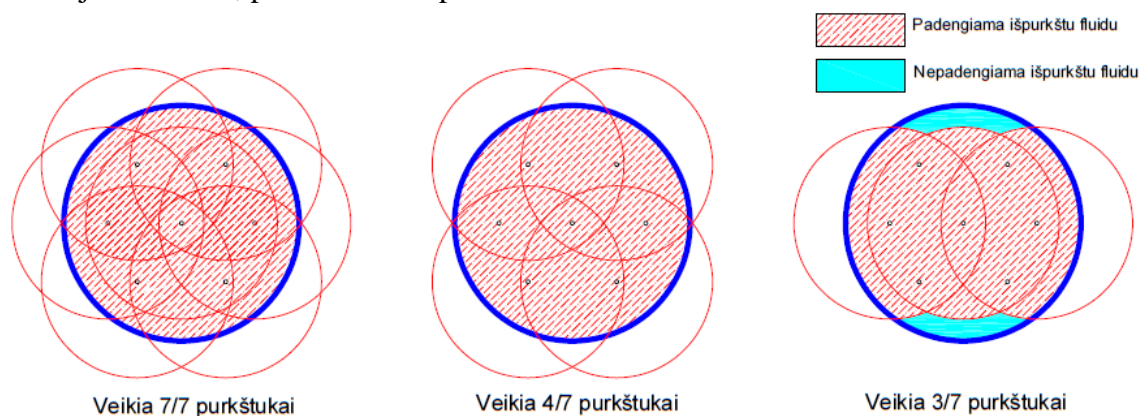
Projektuojamos fluido išpurškiamo fluido sistemos pozicionavimas aukštyje įkrovos atžvilgiu nustatomas taip, kad pasiekus įkrovos elementus, srautas pilnai padengtų dūmų pratekėjimo

skerspjūvio plotą. Vizualinė purkštukų pozicionavimo įkrovos atžvilgiu vaizdinė analizė pateikta 15 paveiksle.



15 pav. Fluido purkštuko ir kondensacinio ekonomaizerio įkrovos techniniai geometriniai parametrai

Išpurkšto fluido dūmų pratekėjimo skerspjūvio ploto, priklausomai nuo veikiančių purkštukų kiekio duotuoju momentu, pateikiama 16 paveiksle.



16 pav. Išpurkšto fluido padengiamo skerspjūvio ploto, priklausomai nuo veikiančių purkštukų kiekio ir pozicijos, vizualinė analizė

Grafinės analizės metodu nustatyta, kad kondensaciniam ekonomaizeriui dirbant su 7 ir 4 purkštukų variacija, fluidas pilnai padengia įkrovos paviršių. Palikus dirbti 3 purkštukus, apie 10 % įkrovos paviršiaus kokybiškai nebus padengta išpurškiamu fluidu, todėl tokiu būdu antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio įrenginys gali dirbti tik išskirtiniais atvejais, kuomet empiriniu būdu nustatomas darbo efektyvumas.

4.2.4 Aerodinaminis antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio modeliavimas baigtinių elementų metodu konstrukcijos gabaritui nustatyti

Baigtinių elementų metodo skaitiniai modeliavimai atliekami, siekiant nustatyti optimaliausią sprendinį antros pakopos dūmų kondensacinio ekonomaizerio konstrukcijai ir jos būdingiems gabaritams bei dūmų įtekėjimo ir ištekėjimo atvamzdžių pozicijų nustatymui, siekiant optimizuoti įtekančių dujų kuo geresnį pasiskirstymą prieš įtekant į įkrovos tūrį. Rezultatai padės nustatyti bei prognozuoti visos antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio konstrukcijos darbinį aerodinaminį

pasipriešinimą, kurio identifikavimas labai svarbus parenkant dūmų šalinimo įrenginių technines charakteristikas. Skaičiavimai atliekami programinės įrangos „SolidWorks“ paketu „FlowSimulation“ [46].

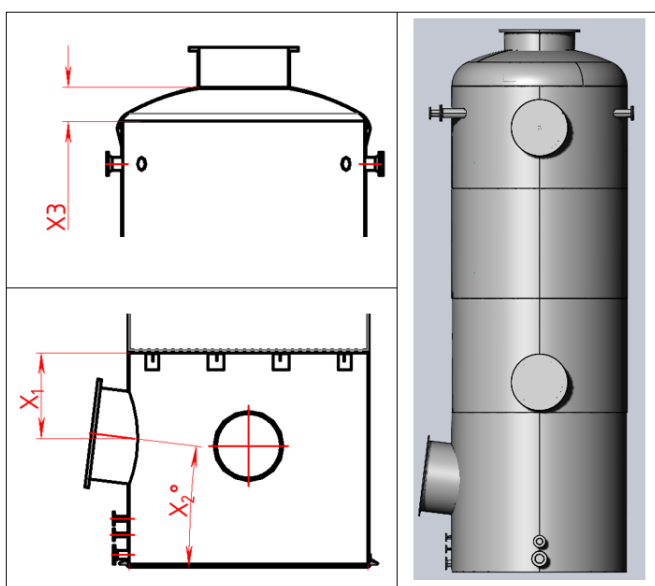
Skaičiavimų vykdymo seka:

- nubraizoma trimatė antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio konstrukcija, siekiant apibrėžti dujų tekėjimo tūrį programinėje įrangoje,
- remiantis projektiniais duomenimis, aprašomos kraštinės sąlygos,
- sukuriama baigtinių elementų tinklėlis, kuris gali būti tankinamas ir koreguojamas pagal rezultatų kitimo faktorių tarp ekvivalenčios sistemos su tais pačiais geometrijos ir kraštinių sąlygų skaičiavimų parametrais, tol kol skirtumas tarp gautų rezultatų yra tenkinamai mažas,
- nustatomi skaičiavimų konvergavimo kriterijai,
- atliekamas skaičiavimas,
- atliekama rezultatų palyginamoji analizė
- pateikiamos rezultatų išvados.

Pirminių patikrinamųjų modeliavimų metu naudojama bendrinė, įkrovos projektavimo stadijoje priimta antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio konstrukcija, apibrėžianti fluido tekėjimo tūrį. Skaičiavimuose kintamieji geometriniai parametrai yra:

- dūmų įtekėjimo kanalo ašies atstumas nuo įkrovos tūrio pradžios, žymima X_1 (žr.17 paveikslą),
- dūmų įtekėjimo kanalo posvyrio kampas horizontalės atžvilgiu, žymima X_2 (žr. 17 paveikslą),
- dūmų ištekėjimo zonos apvalumo aukščio kriterijus, žymima X_3 (žr. 17 paveikslą).

Matmenys X_1 , X_2 ir įtekančių dujų srauto greitis apibrėžia dujų srauto pasiskirstymo tolygumą įtekant į įkrovos tūrį. Skaitinių modeliavimų metu jų vertės 600, 900, 1200 mm bei 4, 7, 10 ° atitinkamai. Parametras X_3 daro įtaką ištekančių dujų srauto aerodinaminio kaklelio formavimuisi ir aerodinaminio pasipriešinimo vertei. Šio parametro vertės yra 400, 600, 800 mm.



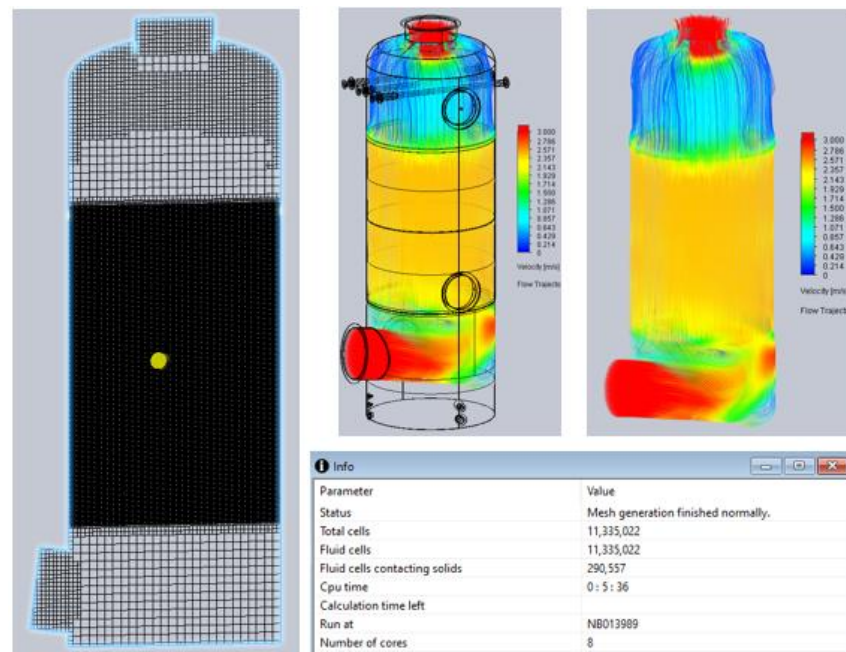
17 pav. Antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio būdingi kintamieji matmenys X_1 , X_2 ir X_3

Sudaromos skaitinio modeliavimo bendrosios ir kraštinės sąlygos:

- skaičiavimo analizės tipas – vidinė dujų tekėjimo sistema,

- skaičiavimas – stacionarus, nusistovėjusio režimo,
- silumos mainai netaikomi, sistema adiabatinė,
- tekėjimo režimas – laminarinis ir turbulentinis,
- fluidas – oras (priimama alternatyva degimo produktams dėl artimų fizikinių savybių),
- antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio vidinės sienelės šiurkštumas priimamas lygus 50 μm ,
- sistemos vidinis slėgis pradžios momentu 101325 Pa, temperatūra 35 $^{\circ}\text{C}$,
- įkrovos elementų tūris aprašomas kaip porėtoji medžiaga ir iš 12 lentelės fizikinės charakteristikos importuojamos į „SolidWorks“ programinės įrangos duomenų bazę,
- kondensato srauto išpurškimas imituojamas keičiant įkrovos aerodinamines savybes, kurios yra ekvivalenčios purškiant ant įkrovos atitinkamą kiekį fluideo,
- dujų įtekėjimo kanalas – atviro tipo,
- dujų ištekėjimo kanalo skerspjūvyje užduodamas tūrinis debitas pagal skaičiavimo variantą (žr. 12 lentelę),
- konvergavimo kriterijus – statinio slėgio skirtumo tarp įtekančių ir ištekančių dujų santykinė paklaida,
- patikrinamasis konvergavimo kriterijus – įtekančių ir ištekančių dujų masių srautų skirtumo artumas nulinei reikšmei.

Atlikus pirminius skaitinius modeliavimus, grafinės analizės metodu identifikuotos optimalios X_1 , X_2 , X_3 geometrinių parametrų vertės, kurios atitinkamai yra 1200 mm, 7 $^{\circ}$, 400 mm. Toliau tęsiami skaičiavimai pagal atskirtų variantų duomenų sistemą (žr. 12 lentelę) su susmulkintu baigtinių elementų tinkleliu, kurį sudaro 11 mln. elementų (žr. 18 pav.).



18 pav. „SolidWorks“ plėtinio „FlowSimulation“ aplinkoje sukurto skaitinio tinklelio kondensacinio ekonomaizerio konstrukcijos fluidų tekėjimo tūryje vaizdinė pateiktis

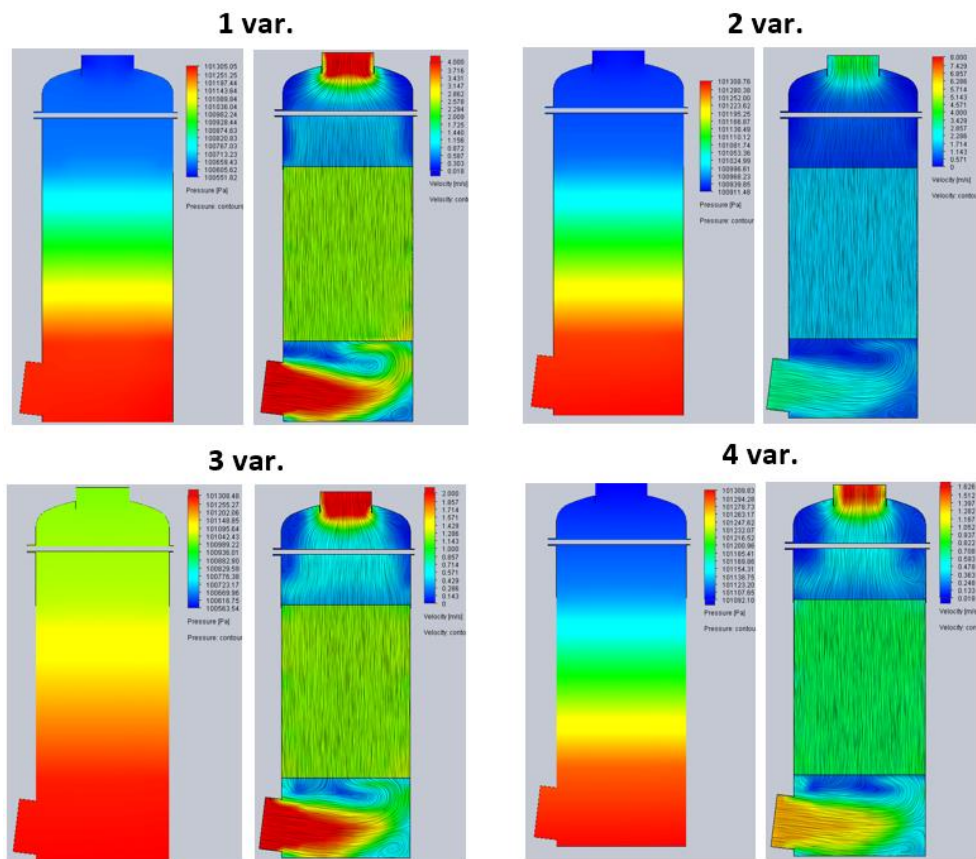
Būdingi skaičiuojamosios sistemos parametrai diferencijuoti technologinės režiminės įrenginio matricos principu. Dūmų srautai suskirstyti į degimo produktų debitus, susidarancius kietą kurą (biokurą) deginančiuose įrenginiuose esant atitinkamoms, 30, 50, 70 ir 100 % apkrovoms.

Išpurškiamo fluído (kondensato) debito vertės priimamos, vertinant išpurškiamo fluído ir dujų srautų santykį, kuris privalo didėti, kuomet bendras dujų srautas mažėja.

15 lentelė. Skaitinio modeliavimo, atlikto programinės įrangos „SolidWorks“ plėtinio „FlowSimulation“ aplinkoje, rezultatai

		Varianto Nr.				
		1	2	3	4	
Dūmų srautas	%	100	70	50	30	
	Nm ³ /h	31927	22349	15964	9578	
	m ³ /h	37070	25949	18535	11121	
Kondensato srautas per įkrovą	%	100	80	60	40	
	m ³ /h	77,36	61,89	46,42	30,94	
	l/h	77360	61888	46416	30944	
Kondensato ir dūmų srautų santykis	l/Nm ³	2,42	2,77	2,91	3,23	
Aerodinaminis pasipriešinimas per įkrovą su išpurkštu kondensatu	Pa	462	275	163	103	
Tūrio be įkrovos aerodinaminis pasipriešinimas	Pa	277,20	165,00	97,80	61,80	
Suminis aerodinaminis pasipriešinimas	Pa	739,20	440,00	260,80	164,80	
Vidutinis dūmų srauto greitis	Įtekėjimo kanale	m/s	8,12	6,01	4,55	2,76
	Įkrovoje	m/s	2,44	1,81	1,37	0,83
	Prieš įkrovą	m/s	1,70	1,26	0,95	0,58
	Po įkrovos	m/s	1,45	1,07	0,81	0,49
	Ištekėjimo kanale	m/s	8,70	6,44	4,87	2,96

Fizinių ir fizikinių parametų apibrėžtos įkrovos ir parinktos optimalios antros pakopos kondensacinio ekonomizerio geometrijos skaitinių aerodinaminių modeliavimų skirtingų variantų rezultatų vaizdinė pateiktis atvaizduota 19 paveiksle.

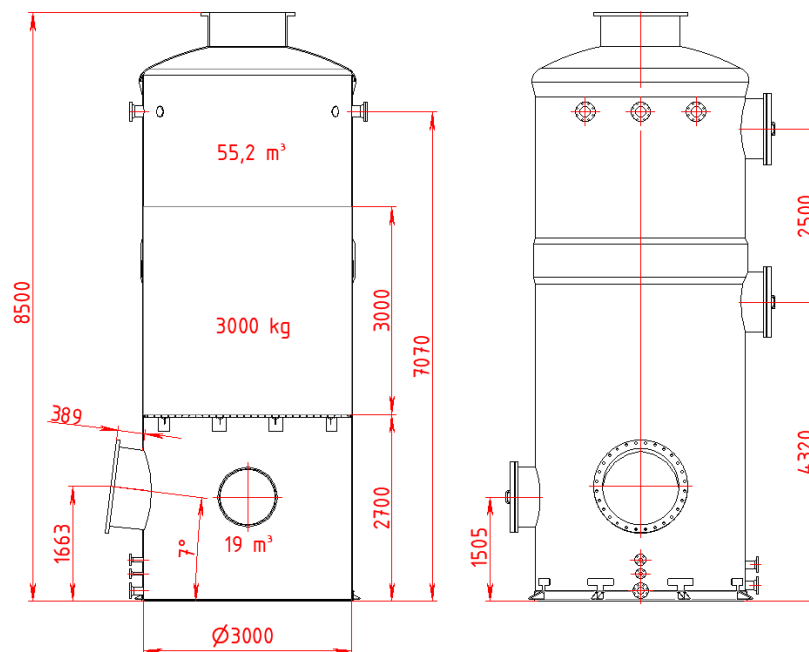


19 pav. Skaitinio modeliavimo, atlikto programinės įrangos „SolidWorks“ plėtinio „FlowSimulation“ aplinkoje, rezultatų vaizdinė pateiktis

Charakteringos analizuojamos srauto pasiskirstymo dinaminės zonos yra dūmų įtekėjimo į įkrovos tūrį ruožas, dujų (dūmų) greičio profilio pasiskirstymas įkrovos tūryje bei dūmų ištekėjimo susiaurėjantis ruožas prieš ištekėjimo kanalą, kuriame privalo būti minimizuoti turbulentiniai sūkuriai, galintys padidinti sistemos aerodinaminį pasipriešinimą. Dėl sūkurių sugeneruojamos sistemos slėgio pulsacijos gali išderinti dūmų šalinimo įrenginių darbą, jeigu netinkamai technologiškai suderintas išretėjimo dūmų kanale (prieš antros pakopos kondensacinį ekonomaizerį) reguliatorius.

Skaitinių modeliavimų metu patvirtintas identifikuotos kondensacinio ekonomaizerio geometrinių parametų optimalumas, esant skirtingiems dujų debitams. Keičiant dujų debitą bei keičiant įkrovos aerodinamines bei fizikines savybes, siekiant sukurti ekvivalenčias sąlygas, susidarancias purškiant fluidą, dujų srauto greitis per įkrovos tūrį nuokrypis visuose keturiuose modeliavimų variantuose yra $\leq 15\%$.

Technologinio projektavimo metu nustatytos optimalios antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio konstrukcijos geometrija su charakteringais matmenimis pateikiami 20 paveiksle.



20 pav. Optimizuota antros pakopos kondensacinio ekonomizerio konstrukcija

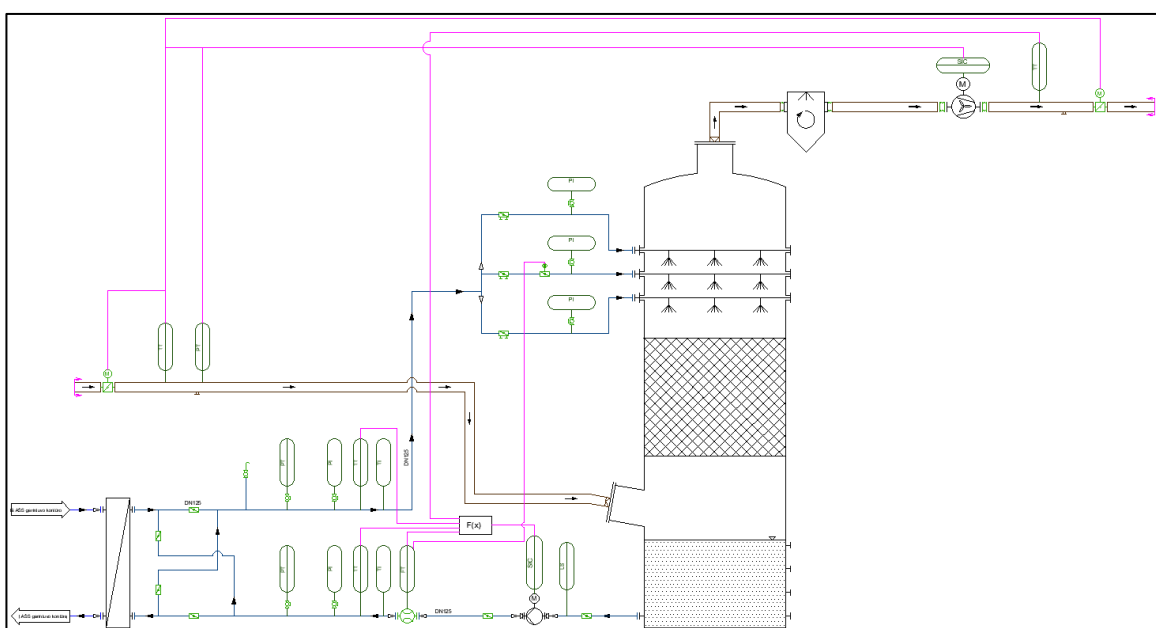
Antros pakopos kondensacinio ekonomizerio konstrukcijos būdingi geometriniai parametrai:

- Dūmų įtekėjimo kanalo diametras – DN1100,
- Dūmų įtekėjimo kanalo posvyrio kampas horizontalės atžvilgiu – 7° ,
- Dūmų įtekėjimo kanalo ašies atstumas iki įkrovos tūrio pradžios – 1200 mm,
- Dūmų ištekėjimo kanalo diametras – DN1000,
- Vidinis diametras – 3000 mm,
- Įkrovos aukštis – 3000 mm,
- Purkštukų išpurškiamo srauto pradinio taško aukštis nuo įkrovos – 1200 mm,
- Bendras gabaritinis aukštis – 8500 mm.

5 Antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio darbo optimizavimo eksperimentiniai tyrimai

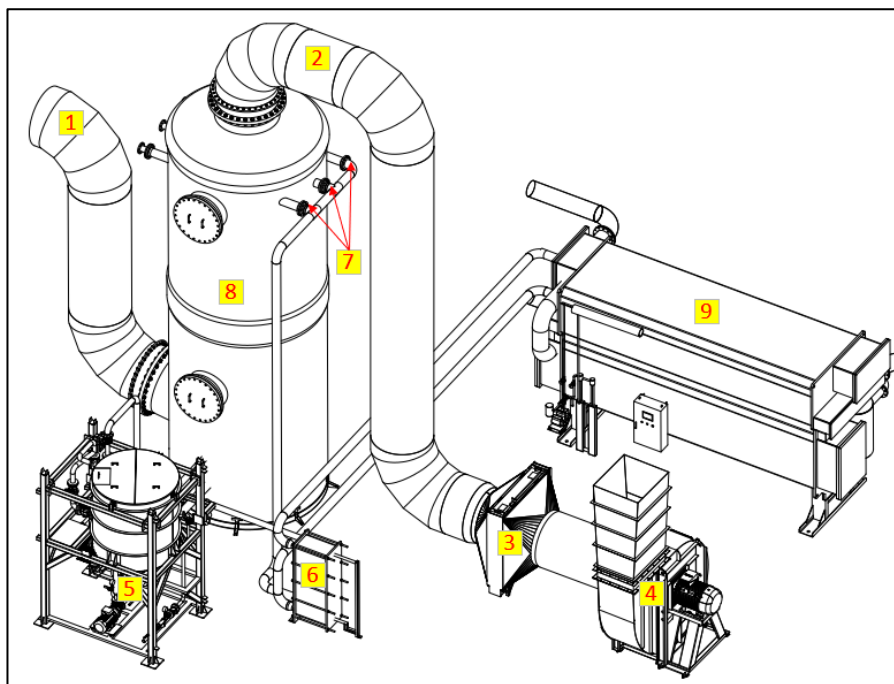
Atlikus antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio technologinio projektavimo darbus, sistemai priklausantys įrenginiai įdiegiami esamoje biokuro vandens šildymo katilinėje. Prieš pilnai perduodant įrenginio eksploatavimo atsakomybę užsakovui, atliekami antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio ir absorbcinio šilumos siurblio bendros sistemos technologinio derinimo ir darbo režimų optimizavimo darbai. Siekiant identifikuoti charakteringus technologinius parametrus, kurie leistų ne tik pasiekti garantinius išsipareigojimus, bet ir technologinėmis organizacinėmis priemonėmis užtikrintų maksimaliai efektyvų sistemos darbą kituose, negarantiniuose, darbo režiuose. Šiuos tikslus įgyvendinti, lygiagrečiai technologinio derinimo darbams, atliekami eksperimentiniai tyrimai pagal iš anksto apibrėžtą metodiką.

Tyrimo objekto – antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio kompleksinės sistemos pagrindinių įrenginių technologinė schema pateikta 21 paveiksle.



21 pav. Tyrimų objekto – antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio technologinė schema

Technologinių įrenginių visumai priklausantys įrenginiai ir įrenginių priklausiniai, kurie eksperimentinių tyrimų metu daro įtaką antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio darbo parametrų, pavaizduoti 22 paveiksle.



22 pav. Tiriamos antros pakopos kondensacinio ekonomizaierio technologinės sistemos pagrindiniai įrenginiai ir jų priklausiniai: 1. dūmų įtekėjimo kanalas, 2. dūmų ištekėjimo kanalas, 3. lašų gaudytuvas, 4. dūmų ventiliatorius, 5. kondensato išpurškimo įranga, 6. tarpinis šilumokaitis, 7. kondensato kolektoriai, 8. antros pakopos kondensacinis ekonomizaieris, 9. absorbcinio šilumos siurblio agregatas

Schemoje pažymėti įrenginiai (žr. 22 paveikslą) eksperimentinių tyrimų metu dirba įprastais režimais, prisitaikant prie antros pakopos kondensacinio darbo parametrų, jų darbas, išskyrus kondensato išpurškimo siurblių, eksperimento metu nekoreguojami, siekiant eksperimentinius tyrimus atlikti imituojant įprasta ir papildomai specialiai nepritaikytą darbo režimą.

5.1 Eksperimentinio tyrimo tikslai ir metodika

Parenkant antros pakopos kondensacinio ekonomizaierio tyrimų metodiką, buvo atsižvelgta į reikiamų nustatyti parametrų ypatumus, jų nustatymo galimybes bei techninį matavimų įgyvendinamumą.

Eksperimentinio tyrimo metu siekiama nustatyti:

- antros pakopos kondensacinio ekonomizaierio aerodinaminį pasipriešinimą skirtingais darbo režimais,
- optimalų išpurškiamo kondensato ir dūmų srautų santykinį rodiklį,
- kondensato išpurškimo kokybės įtaką antros pakopos kondensacinio ekonomizaierio galiai,
- pritaikomumą kompleksinio antros pakopos kondensacinio ekonomizaierio galios reguliatoriaus skirtingiems darbo režimams.

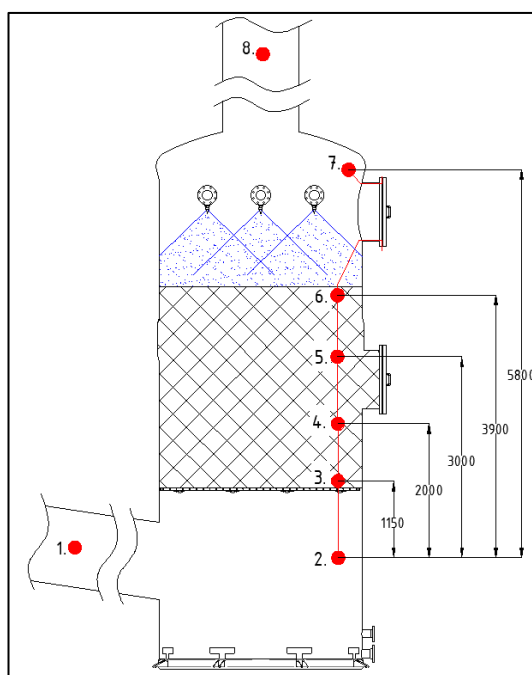
Užsibrėžtų tikslų pasiekimui, eksperimentinių tyrimų metu atliekami matavimai:

- dūmų temperatūros matavimas charakteringuose ruožuose,
- kondensato temperatūros matavimas charakteringuose ruožuose,
- antros pakopos kondensacinio ekonomizaierio dūmų trakto aerodinaminis pasipriešinimas,
- išpurškiamo kondensato linijos slėgis,
- dūmų srauto greičio matavimas charakteringuose taškuose, dūmų debitui nustatyti.

Elektros įrenginių momentinė galia indikuojama pagal įrenginyje išmatuotą srovę bei fiksuojama tų įrenginių (kondensato išpurškimo siurblio ir dūmų ventiliatoriaus) elektrinė momentinė galia išeities įtampos dažnio keitikliuose.

5.1.1 Dūmų temperatūros matavimas charakteringuose ruožuose

Degimo produktų temperatūros matavimas atliekamas prieš kondensacinį ekonomaizerį, kondensaciniame ekonomaizeryje, jo įkrovoje bei dūmų trakte po kondensacinio ekonomaizerio. Detali degimo produktų temperatūros matavimo taškų schema pateikta 23 paveiksle.



23 pav. Antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio temperatūrų matavimo taškų schema

Taškuose Nr. 1 ir 8 temperatūra matuojama technologiniais, stacionariais temperatūros jutikliais, kurie įprastai naudojami kondensacinio ekonomaizerio valdymo procesams. Temperatūros jutiklių techninės charakteristikos pateiktos 16 lentelėje.

16 lentelė. Matavimo taškuose Nr.1 ir 8 naudojamų temperatūros jutiklių charakteristikos

Dūmų temperatūros jutiklis	
Modelis	Aplisens, APT-2000ALW-GN1
Techniniai parametrai	
Matavimo technologija	Varžinis temp. jutiklis
Matavimo ribos	0...300 °C
Tikslumo klasė	A
Matavimo paklaida	±0,15 °C

Išvesties signalas	4...20mA
Ilgis	600 mm

„Aplisens“ temperatūros jutikliais išmatuotos dūmų temperatūros vertės įrašinėjamos katilinės valdymo kompiuterio atminties laikmenoje.

Taškuose Nr. 2, 3, 4, 5, 6 ir 7 dūmų temperatūra matuojama K tipo termoporomis, prijungtomis prie duomenų kaupiklio „Huato S220-T2/S220-T8“ (žr. 17 lentelę). K tipo termoporos atitinkamais atstumais pritvirtinamos prie plieninio 13 mm diametro strypo. Strypas įleidžiamas į antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio įkrovą, taip, kad termoporų matavimo taškai atitiktų matavimo schemą. Matavimo tūryje termoporas nuolat apiplaus chaotiškas dujų ir skysčio srautas. Matavimo reikšmės nuolat pulsuos, tačiau duomenų imtyje aukščiausios indikuojamos vertės priimamos kaip dūmų temperatūros vertės būdingame matavimo taške. Toks matavimo teisingumas grindžiamas, kad aukščiausia įšilimo laipsnį matavimų sistemoje turi tiriamos dujos (dūmai), o dėl termoporos jutiklio taško itin mažos masės ir paviršiaus ploto, fiksuojamai aukščiausiai temperatūros vertei šaltesnis, termoporą apiplaunantis, kondensatas neturi didelės įtakos rezultatų tikslumui, jeigu rezultatai tinkamai analizuojami [47].

17 lentelė. Dūmų temperatūros matavimo termoporomis sistemos charakteristikos

Dūmų temperatūros matavimo sistema	
Duomenų kaupiklio modelis	Huato S220-T2/S220-T8
Techniniai parametrai	
Matavimo ribos	0...1200 °C
Tikslumo klasė	A
Duomenų kaupiklio matavimo paklaida	±0,1 °C
Termoporų tipas	K
Termoporos matavimo paklaida	±0,5 °C

5.1.2 Kondensato temperatūros matavimas

Kondensato temperatūra antros pakopos kondensaciniame ekonomaizeryje matuojama technologiniais temperatūros jutikliais (žr. 18 lentelę) prieš ir po šilumokaičio. Tarpinės kondensato temperatūros vertės kondensacinio ekonomaizerio viduje bus interpoliuojamos pagal šiluminį dūmų pusės balansą. Išmatuotos vertės kaupiamos pagrindinio katilinės valdymo kompiuterio.

18 lentelė. Kondensato temperatūros matavimo technologinių jutiklių charakteristikos

Dūmų temperatūros jutiklis	
Modelis	Aplisens, APT-2000ALW-GN1
Techniniai parametrai	
Matavimo technologija	Varžinis temp. jutiklis
Matavimo ribos	0...100 °C
Tikslumo klasė	A
Matavimo paklaida	±0,15 °C
Išvesties signalas	4...20mA

5.1.3 Antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio dūmų trakto aerodinaminio pasipriešinimo matavimas

Diferencialiniais slėgio jutikliais nustatomas aerodinaminis antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio pasipriešinimas. Per įrenginį susidarancio dūmų trakto aerodinaminio pasipriešinimo vertės nustatomos „Aplisens APR-2000ALW“ jutikliais, kurie stacionariai įrengti darbo procesui reguliuoti.

19 lentelė. Diferencialinio dūmų slėgio jutiklio techninės charakteristikos

Diferencialinis dūmų slėgio jutiklis	
Modelis	Aplisens, APR-2000ALW
Techniniai parametrai	
Matavimo ribos	-10...10kPa
Tikslumo klasė	A
Matavimo paklaida	±0,075 %
Išvesties signalas	4...20mA

Vienas iš diferencialinio slėgio jutiklių matuoja slėgio skirtumą tarp dūmų kanale esancio statinio dūmų slėgio ir atmosferos, kitas – po antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio, prieš lašų gaudytuvą. Gautų verčių skirtumas yra antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio įrenginio aerodinaminio pasipriešinimo vertė. Dūmų slėgio perkryčio vertė, gauta charakteringomis sąlygomis, palyginama su projektavimo etape gautais skaičiuotiniais aerodinaminiais pasipriešinimais.

5.1.4 Išpurškiamo kondensato linijos slėgio matavimas

Išpurškiamo kondensato linijos slėgį svarbu išmatuoti, siekiant atlikti išpurškiamo kondensato dispersijos kokybės įtaką antros pakopos dūmų kondensacinio ekonomaizerio galiai, ypač žemos

dūmų temperatūros režimuose, kuomet yra sudėtinga užtikrinti tinkamus temperatūrinius parametrus absorbcinio šilumos siurblio garintuvo kontūro šilumokaičiui.

20 lentelė. Kondensato linijos slėgio jutiklio techninės charakteristikos

Kondensato linijos slėgio jutiklis	
Modelis	Aplisens, APC-2000ALW
Techniniai parametrai	
Matavimo ribos	0...25 bar
Tikslumo klasė	A
Matavimo paklaida	±0,075 %
Išvesties signalas	4...20mA

Kondensato slėgis matuojamas kondensato linijoje, slėginėje dalyje. Patikrinamajai indikacijai, prieš purkštukų kolektorius įrengti vietiniai slėgio jutikliai.

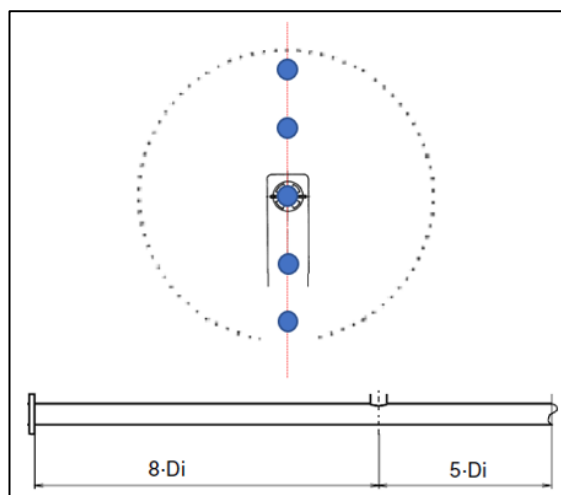
5.1.5 Dūmų srauto greičio matavimas dūmų kanaluose

Dūmų srauto matavimas reikalingas patikrinti skaičiuotiną degimo produktų srautą, atitekantį į antros pakopos kondensacinį ekonomizerį. Dūmų srautui nustatyti išmatuojamas dujų srauto greitis dūmų kanale. Matavimai vykdomi anemometru „ZS16 ZG1ZG2 – Höntzsch“.

21 lentelė. Dujų srauto greičio matavimo prietaiso techninės charakteristikos

Dujų srauto greičio matuoklis - anemometras	
Modelis	ZS16 ZG1ZG2 - Höntzsch
Techniniai parametrai	
Matavimo ribos	0,6...120 m/s
Matavimo terpės temperatūra	-40...+370 °C
Tikslumo klasė	A
Matavimo paklaida	±0,05 %

Matavimai vykdomi pagal gamintojo pateiktas gaires, laikantis tiesių ruožų prieš ir po matavimo taškų bei atliekant dujų srauto greičio profilio patikrą (žr. 24 pav.).



24 pav. Anemometro „ZS16 ZG1ZG2 – Höntzsch“ gamintojo pateiktos dūmų srauto greičio matavimo gairės: privalomasis dujų srauto greičio profilio įvertinimas bei būtini srauto stabilizacijos ruožai prie ir po matavimo taško

Anemometro zondo valdymo pulte nustatomas dujų tekėjimo kanalo diametras ir ekrane gaunami taškai, kuriuose privaloma atlikti greičio profilio patikrą. Atlikus dūmų srauto greičio matavimus, duomenis suvedami į anemometro valdymo kompiuterį ir įvertinus srauto greičio profilio koeficientą, kompiuteris pateikia dūmų debitą, kurio vertė naudojama patikrinamiesiems skaičiavimams.

5.2 Eksperimentinių tyrimų planas ir eiga

Eksperimentinių tyrimų planą sudaro trys skirtingi matavimų ciklai:

1. Eksperimentinis tyrimas Nr.1 skirtas nustatyti optimalią L/G parametro vertę kai dūmų srautas, atitenkantis į antros pakopos kondensacinį ekonomizerį, sudaro bent 90 % numatyto nominalaus dūmų srauto, t.y., norint pradėti šį eksperimentinį matavimą, turi būti tenkinama sąlyga $V_{dF}/V_{dN} \geq 0,9$;
2. Eksperimentinis tyrimas Nr.2 skirtas nustatyti optimalią L/G parametro vertę kai dūmų srautas, atitenkantis į antros pakopos kondensacinį ekonomizerį, sudaro mažiau kaip 90 % numatyto nominalaus dūmų srauto, t.y., norint pradėti šį eksperimentinį matavimą, turi būti tenkinama sąlyga $V_{dF}/V_{dN} < 0,9$;
3. Eksperimentinis tyrimas Nr.3 skirtas nustatyti kondensato išpurškimo kokybinių parametru įtaką antros pakopos kondensacinio ekonomizerio galios parametru, kuomet į antros pakopos kondensacinį ekonomizerį tiekiami degimo produktai mažesnės nei 45 °C temperatūros.

22 lentelė. Eksperimentinio tyrimo Nr.1 ir Nr.2 plano suvestinė

Eksperimentinio tyrimo Nr.1/Nr.2					
Tikslas	Nustatyti optimalią L/G parametro vertę kai parametras $V_{dF}/V_{dN} \geq 0,9 / V_{dF}/V_{dN} < 0,9$				
Matavimai	Nr.1	Nr.2	Nr.3	Nr.4	Nr.5

	Trukmė, min	15	15	15	15	15	
Parametras	L/G, l/Nm ³	1	1,5	2	2,42	3	
	Dūmų debitas, m ³ /h	A	A	A	A	A	
	Dūmų temperatūra charakteringuose taškuose, °C	I	I	I	I	I	
	Kondensato temperatūra charakteringuose taškuose, °C	I	I	I	I	I	
	Kondensato srautas, m ³ /h	A	A	A	A	A	
	DKE II aerodinaminis pasipriešinimas, Pa	A	A	A	A	A	
	Dūmų ventiliatoriaus el.rovė, A	I	I	I	I	I	
	Dūmų ventiliatoriaus momentinė el. galia, kW	I	I	I	I	I	
	Kondensato išpurškimo siurblio el.rovė, A	I	I	I	I	I	
	Kondensato išpurškimo siurblio momentinė el. galia, kW	I	I	I	I	I	
	Žymėjimo reikšmės	A - apskaičiuojamos vertės iš kitų matavimo duomenų					
		I - išmatuojamos/ nustatomos vertės					

Eksperimentinio tyrimo Nr.3 metu pagrindinis kintamasis yra išpurškiamo kondensato slėgis, o dūmų srautas ir išpurškiamo kondensato debitai privalo išlikti kuo vienodesni viso tyrimo Nr.3 ciklo metu.

23 lentelė. Eksperimentinio tyrimo Nr.3 plano suvestinė

Eksperimentinio tyrimo Nr.3					
Tikslas	Nustatyti optimalų išpurškiamo kondensato slėgį prieš purkštukus kai parametras $V_{dF}/V_{dN} < 0,9$ ir dūmų temp. į DKE II ≤ 45 °C				
Matavimai	Nr.1	Nr.2	Nr.3	Nr.4	Nr.5
Trukmė, min	15	15	15	15	15

	Kondensato slėgis prieš purkštukus, bar(g)	0,5	1	1,5	2	2,5
Parametras	L/G, l/Nm ³	A	A	A	A	A
	Dūmų debitas, m ³ /h	A	A	A	A	A
	Dūmų temperatūra charakteringuose taškuose, °C	I	I	I	I	I
	Kondensato temperatūra charakteringuose taškuose, °C	I	I	I	I	I
	Kondensato srautas, m ³ /h	A	A	A	A	A
	DKE II aerodinaminis pasipriešinimas, Pa	A	A	A	A	A
	Dūmų ventiliatoriaus el. srovė, A	I	I	I	I	I
	Dūmų ventiliatoriaus momentinė el. galia, kW	I	I	I	I	I
	Kondensato išpurškimo siurblio el. srovė, A	I	I	I	I	I
	Kondensato išpurškimo siurblio momentinė el. galia, kW	I	I	I	I	I
	Žymėjimo reikšmės	A - apskaičiuojamos vertės iš kitų matavimo duomenų				
I - išmatuojamos/ nustatomos vertės						

5.3 Eksperimentinių tyrimų rezultatai

Eksperimentinių tyrimų metu išmatuotos ir apskaičiuotos parametų vertės atvaizduojami grafiniu analizės metodu. Palyginamosios vertės susistemintai pateikiamos suvestinės lentelės forma.

5.3.1 Eksperimentinio tyrimo Nr. 1 rezultatai

Atlikus eksperimentinių tyrimų Nr. 1 etapą, gauti rezultatai iš skirtingų sistemų perkeltami į MS Excel duomenų apdorojimo paketą. Priklausomai nuo esamų, šilumą gaminančių įrenginių, momentinio režimo eksperimento metu, nustatomi pagrindiniai būdingi rodikliai:

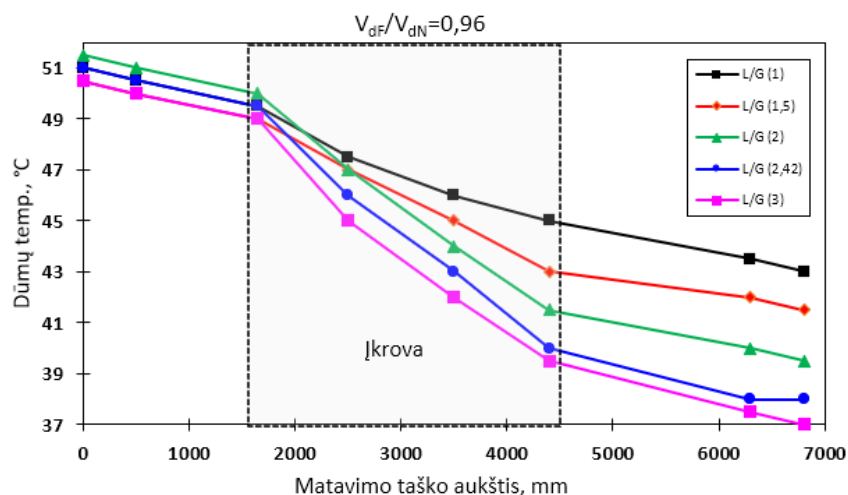
Apskaičiuotas faktinio ir nominalaus dūmų srautų santykis V_{dF}/V_{dN} eksperimentinio tyrimo Nr.1 skirtingų matavimų metu buvo palaikomas pastovios vertės, o tarp matavimų dūmų srauto vertės pokyčiai buvo nežymūs, iki 1 – 3 %. Nustatytas V_{dF}/V_{dN} yra lygus 0,96 vertei, t.y. eksperimentinio tyrimo Nr.1 metu, į antros pakopos kondensacinį ekonomaizerį buvo tiekiami degimo produktai (dūmai), kurių srautas sudarė 96 % projektinės nominalios dūmų srauto vertės. Eksperimentinio tyrimo metu buvo išlaikoma ne žemesnės nei 45 °C temperatūros ir santykinės degimo produktų drėgmės $\varphi=100$ % sąlygos.

Antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio šiluminės galios balansas verifikuotas remiantis trimis metodais:

1. Išskaičiavimas pagal kondensato entalpijos pokytį;
2. Išskaičiavimas pagal dūmų entalpijos pokytį;
3. Nustatoma, remiantis absorbcinio šilumos siurblio šilumos apskaitos metrologiškai sertifikuotu prietaisu.

Pastarieji verifikacijos metodai leidžia įvertinti antros pakopos kondensaciniame ekonomaizeryje matuojamų temperatūrų teisingumą ar verčių nuokrypius.

Dūmų temperatūrų verčių nustatymas charakteringuose taškuose leidžia identifikuoti koks šiluminės energijos kiekis, šilumos ir masės mainų procesų metu, iš dūmų perduodamas purškiamam fluidui bei nustatyti kokio tendencingumo poveikį turi L/G kriterijus antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio ir absorbcinio šilumos siurblio sistemos darbui. L/G kriterijaus įtaka temperatūrų verčių dispersijai antros pakopos kondensaciniame ekonomaizeryje, kuomet kriterijus $V_{dF}/V_{dN}=0,96$, ir dūmų temperatūra įtekėjime > 45 °C, pateikta 25 paveiksle.

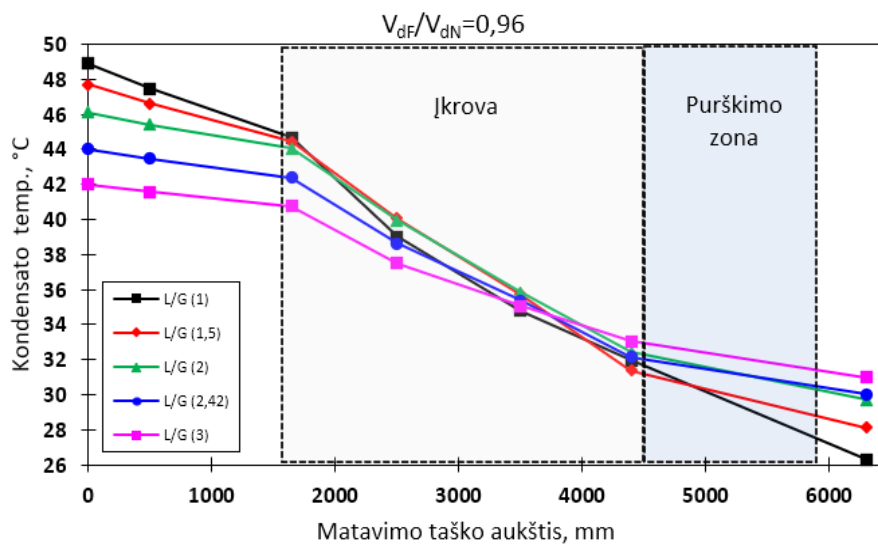


25 pav. L/G kriterijaus įtaka temperatūrų verčių dispersijai antros pakopos kondensaciniame ekonomaizeryje kai $V_{dF}/V_{dN}=0,96$

Visų matavimų metu fiksuojamas bendras tendencingumas – įkrovos slauksnyje dūmų temperatūros mažėjimo sparta yra intensyviausia. Šilumos ir masės mainų pokyčio tendencingumas ruože prieš įkrovą ir po įkrovos, nepriklausomai nuo L/G parametro, išlieka ekvivalenčių tendencijų, tačiau nuo L/G parametro skiriasi jų amplitudė. Optimaliausias L/G verčių ruožas yra 2 – 2,42 l/Nm³, kuriame

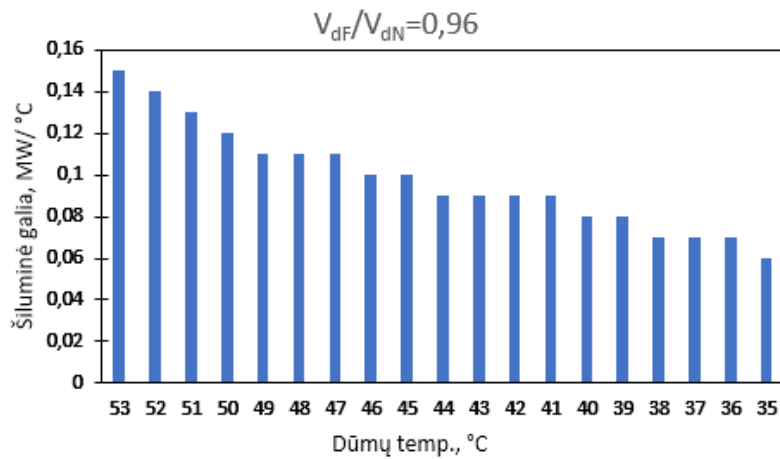
pasiekiamas tapataus temperatūrų žemėjimo tendencingumas kaip ir pasiekus parametro $L/G = 3$ l/Nm^3 . Papildomai didinamas kondensato srautas mažina temperatūrų skirtumą tarp išpurškiamo ir surenkamo kondensato, kuris po truputi slenkasi iš absorbcinio šilumos siurblio darbo režimo.

Kondensato temperatūros vertės eksperimentinių tyrimų metu nustatytos pradiniam išpurškimo taške ir galutiniame – kondensato prieš tarpinį šilumokaitį. Tarpinės vertės interpoliuojamos pagal dūmų temperatūros pokytį ir dėl to pokyčio atsiradusio entalpijos sumažėjimo. Pagal šilumos balansą, visa iš dūmų išlaisvinama šiluma perduodama kondensatui. Atitinkama perduotos entalpijos vertė pakelia prieš dūmų srovę tekančio kondensato temperatūrą. Interpoliuotos ir faktiškai išmatuotos kondensato temperatūrų vertės antros pakopos kondensaciniame ekonomizaizeryje pateiktos 27 paveiksle.



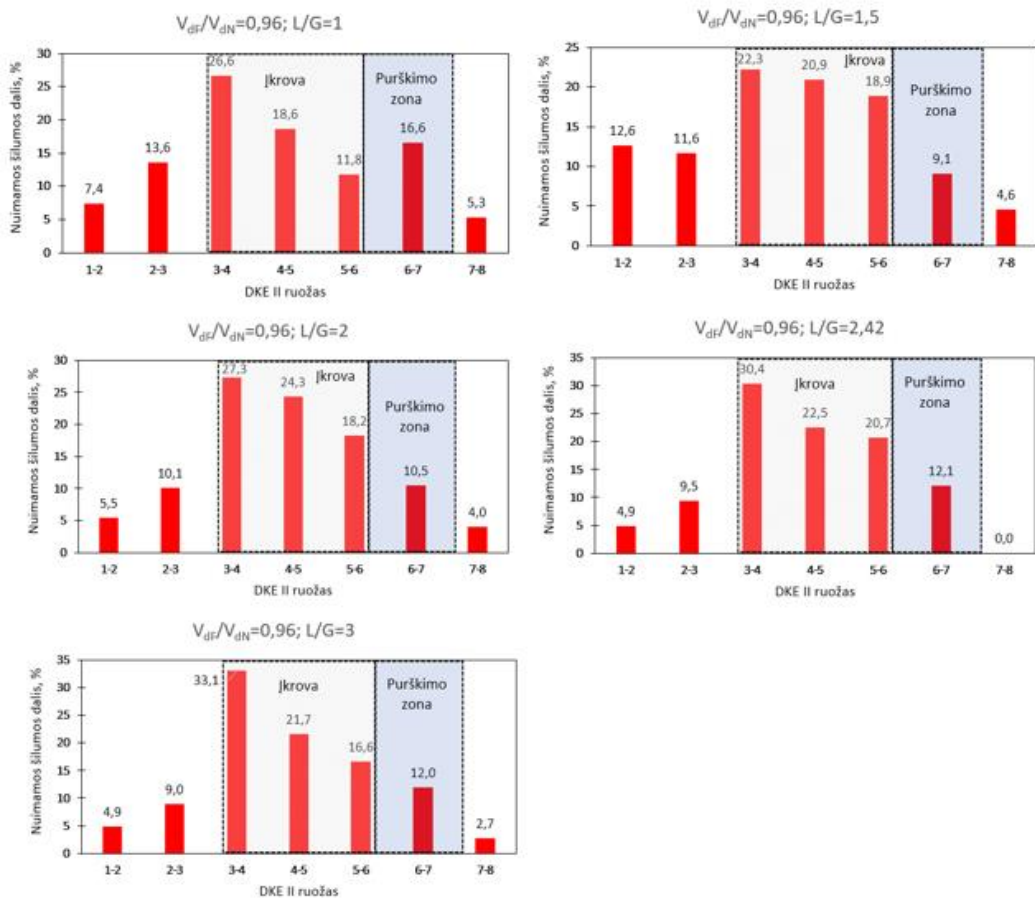
26 pav. L/G kriterijaus įtaka kondensato temperatūros verčių dispersijai antros pakopos kondensaciniame ekonomizaizeryje kai $V_{dF}/V_{dN} = 0,96$

Antros pakopos kondensaciniame ekonomizaizeryje išpurškstas mažesnis kiekis kondensato sukuria sąlygas fluidui ilgiau užsibūti kontakte su degimo produktais ir apatiniuose įkrovos sluoksniuose sąveikauti su aukštesnės temperatūros dūmais. Didžiausias temperatūros skirtumas tarp surenkamo ir išpurškiamo kondensato pasiekiamas L/G rodikliui pasiekus žemiausią vertę – $1 l/Nm^3$. Mažiausią įšilimo laipsnį turintis kondensatas, L/G $1 - 3 l/Nm^3$ atvejais, giliau atvėsina dūmus ir absorbuoja didesnę šiluminės energijos kiekį. Kadangi degimo produktų vandens garo talpa eksponentiškai priklauso nuo dujų temperatūros, kiekvienas aukštesnės temperatūros dūmų tūrelis atvėsęs vienu laipsniu išlaisvina daugiau šiluminės energijos nei žemesnės temperatūros vienu laipsniu atušintas dujų tūrelis (žr. 27 paveikslą).



27 pav. Šiluminės energijos kiekio paskirstymas vienetiniame degimo produktų temperatūros laipsnio pokyčiui, išlaisvinamas ataušinus dūmus vienu laipsniu kiekvienam degimo produktų temperatūros laipsniui kai užtikrinama $V_{df}/V_{dN}=0,96$ ir $\varphi=100\%$ sąlygos.

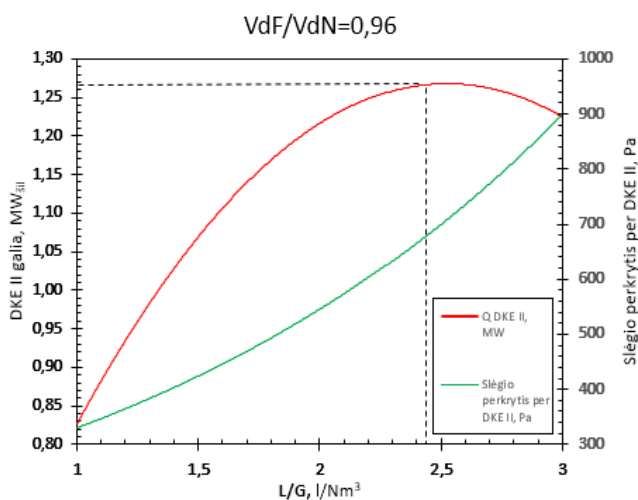
Pagal charakteringas sąlygas sudarytą šiluminės energijos potencialo vienetiniame degimo produktų temperatūros laipsnio skirtume, grafiką nustatoma eksperimentinio tyrimo Nr.1 metu, visų matavimų antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio ruožuose iš dūmų kondensatui perduodamą šilumos kiekį (žr. 28 paveikslą).



28 pav. Antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio charakteringų ruožų šiluminės galios santykinis pasiskirstymas

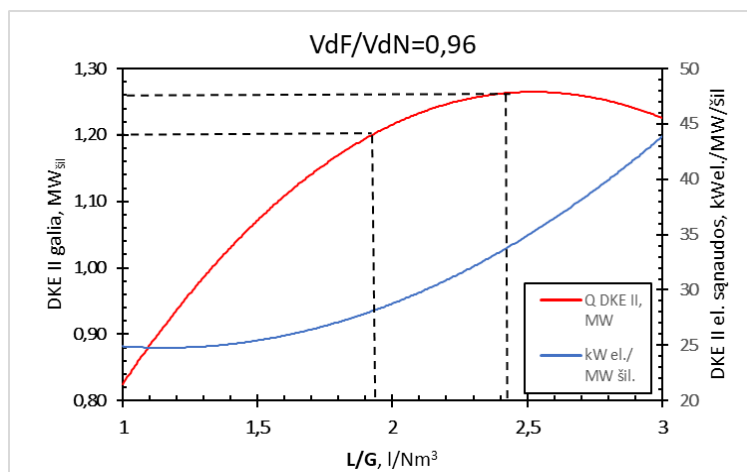
Eksperimentinio tyrimo Nr.1 metu identifikuota, kad didėjant L/G parametrai, su išpurškiamu didesniu kondensato srautu, kondensatui perduodamos šiluminės energijos santykinė vertė intensyviau persikelia į įkrovos vidurinę ruožą (4 – 5) bei ypač suintensyvėja žemiausiame įkrovos sluoksnyje (3 – 4). Matavimo Nr. 5 metu, išpildant kondensato išpurškiamo srauto vertę, kad būtų tenkinama $L/G=3 \text{ l/Nm}^3$ sąlyga, apatiniame įkrovos sluoksnyje susikaupia didelis tekančio kondensato srautas, kuris intensyviai sąveikauja su priešais atitekančiu dūmų srautu. Pastaruoju atveju apatinėje įkrovos dalyje, 1000 mm ruože (3 – 4) iš dūmų kondensatui perduodama net 33,1 % visame antros pakopos kondensaciniame ekonomizaizeryje utilizuojamos šilumos.

Didėjant išpurškiamo kondensato kiekiui, įkrova tekantis kondensato srautas užima dalį laisvo pratekėjimo skerspjūvio, todėl padidėja degimų produktų srauto greitis įkrovoje. Išaugęs dujų srauto greitis, kvadratine priklausomybe didina aerodinaminį įkrovos pasipriešinimą ir tuo pačiu bendrą antros pakopos kondensacinio ekonomizaizerio slėgio perkrytį (žr. 29 paveikslą).



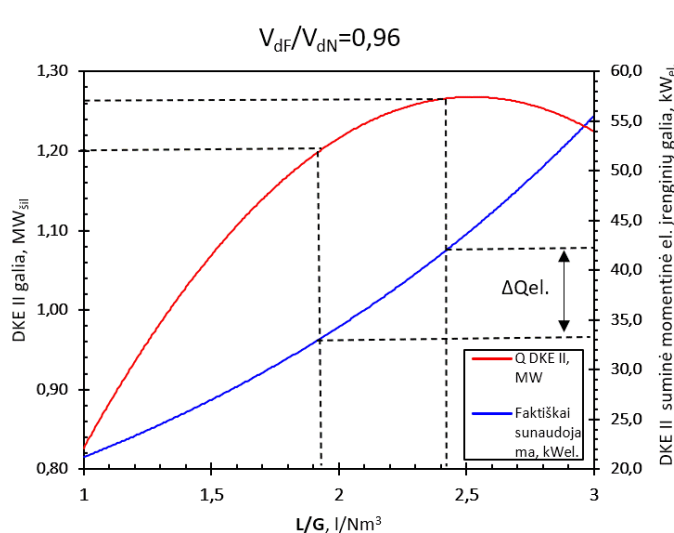
29 pav. L/G parametro įtaka antros pakopos kondensacinio ekonomizaizerio suminiam aerodinaminiam pasipriešinimui

Antros pakopos kondensacinio ekonomizaizerio projektavimo etape, nustatytas optimalus L/G santykinis rodiklis yra $2,42 \text{ l/Nm}^3$. Eksperimentinių tyrimų Nr.1 grafinė duomenų analizė leido identifikuoti, kad šį darbo taško charakteringą rodiklį galima sumažinti iki $1,92 \text{ l/Nm}^3$ ir vis vien išlaikyti nominalią antros pakopos kondensacinio ekonomizaizerio galią – 1,2 MW (žr. 30 paveikslą).



30 pav. L/G parametro įtaka antros pakopos kondensacinio ekonomizaizerio suminei elektros įrenginių momentinei galiai, skirtai vienetinei antros pakopos kondensacinio ekonomizaizerio galiai

Antros pakopos kondensacinio ekonomizaierio nominalią galią apibrėžia absorbcinio šilumos siurblio garintuvo ir kitų kontūrų darbo režimai. Projektinė absorbcinio šilumos siurblio garintuvo kontūro galia yra ekvivalenti projektinei antros pakopos kondensacinio ekonomizaierio galiai – 1,2 MW. Technologiniai absorbcinio šilumos siurblio ypatumai leidžia išvystyti garintuvo kontūro šiluminę galią iki 5 – 10 % didesnę nei nominali, tačiau darbo ruože virš nominalaus našumo ribos, gali atsirasti parametrų nestabilumo tendencija, o kiekvienam, virš nominalios šiluminės galios ribos utilizuotas šiluminės energijos vienetas reikalauja eksponentiškai didėjančių elektros įrenginių (darbo fluideo siurblių) momentinių elektrinės galios verčių. Toks nestabilus galios režimas gali absorbcinį šilumos siurblių išvesti iš normalaus darbo ir bendroje laiko imtyje, pagamintos šilumos kiekis antros pakopos kondensaciniame ekonomizaieryje, gali būti dar mažesnis už nominalų. Optimizuojant antros pakopos kondensacinio ekonomizaierio darbą, pasirenkama L/G vertė, prie kurios pasiekama nominali šiluminė galia – 1,2 MW. Tokia L/G vertė yra 1,92 l/Nm³, galiojant faktiniam ir nominalaus dūmų srautų santykių sąlygai $V_{dF}/V_{dN} = 0,96$. Pastaruoju atveju, projektinis L/G parametras, kurio vertė 2,42 l/Nm³, sumažinamas iki eksperimentinių tyrimų metu nustatyto optimalaus L/G = 1,92 l/Nm³, taip sumažinant sumines kondensato išpurkšimo siurblio ir dūmų ventiliatoriaus elektros sąnaudas 21,1 % (žr. 31 paveikslą).



31 pav. L/G parametro įtaka antros pakopos kondensacinio ekonomizaierio suminei elektros įrenginių momentinei galiai

Eksperimentinių tyrimų metu nustatyta optimali L/G vertė, apibrėžtomis sąlygomis leidžia sumažinti antros pakopos kondensacinio ekonomizaierio elektros įrenginių suminę momentinę galią 8,9 kW_{el}.

24 lentelė. Technoekonominių parametrų priklausomybė nuo L/G parametro

L/G, l/Nm ³	1	1,5	1,92	2	2,42	3
Slėgio perkrytis per DKE II, Pa	339	424	508	539	657,888	931
kW el./ MW _{sil}	25,1	25,0	27,9	28,8	34,2	43,7
Q DKE II, MW	0,83	1,05	1,2	1,25	1,24	1,23
Faktiškai sunaudojama, kW _{el}	20,8	26,3	33,5	36,0	42,4	53,7

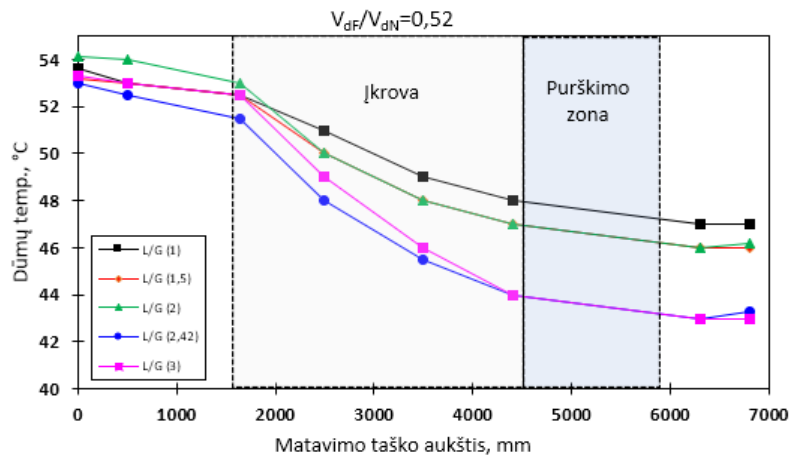
L/G, l/Nm ³	1	1,5	1,92	2	2,42	3	
Skirtumas nuo projektuoto optimalaus 2,42 L/G, kW _{el} /MW _{šil}	9,1	9,2	6,3	5,4	0	-9,5	
Bendras kW el skirtumas nuo projektuoto 2,42 L/G	21,6	16,1	8,9	6,4	0	-11,3	
Sutaupoma el. sąnaudų, lyginant su projektiniu optimaliu L/G=2,42, %	50,9	38,1	21,1	15,1	0,0	-26,6	
Sutaupomos el. energijos kiekis, kWh _{el}	Per 1 val.	21,6	16,1	8,9	6,4	0,0	-11,3
	Per 24 val	518,0	387,5	214,8	153,7	0,0	-271,1
	Per savaitę	3625,8	2712,4	1503,4	1076,0	0,0	-1897,8
	Per mėnesį	15539,2	11624,4	6443,0	4611,3	0,0	-8133,4
	Per pusę metų	93235,5	69746,5	38657,8	27667,7	0,0	-48800,6
	Per 7900 val. (metai)	170500,1	127545,7	70693,6	50596,1	0,0	-89241,9
El. energijos kaina, €/kWh _{el}	0,245*						
Sutaupoma eksploatacinių kaštų, €	41772,5	31248,7	17319,9	12396,0	0,0	-21864,3	

Optimizuotas L/G rodiklis nuo 2,42 iki 1,92 l/Nm³ per pusę metų leistų sumažinti eksploatacijos sąnaudas apie 8,5 tūkst. €, o vienerių metų (7900 val.) antros pakopos kondensacinio ekonomizaierio optimizuotas darbas nominaliu galios režimu leistų sumažinti sąnaudas 17,3 tūkst. € (žr. 24 lentelę).

5.3.2 Eksperimentinio tyrimo Nr. 2 rezultatai

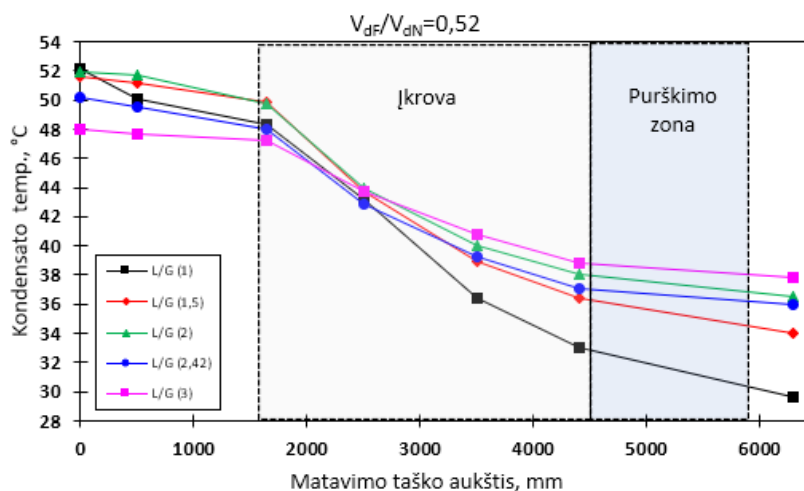
Eksperimentinių tyrimų Nr.2 duomenų analizės metodas išlaikomas ekvivalentus tyrimui Nr.1. Esminis skirtumas, atskiriantis šiuos du eksperimentus – šilumą gaminančių įrenginių galia ir sugeneruojamas degimo produktų kiekis. Šiuo atveju dūmų kiekis, atitekančias į antros pakopos kondensacinį ekonomizaierį sudaro 52 % projektinės nominalios dūmų srauto vertė, t.y. santykinis rodiklis $V_{dF}/V_{dN}=0,52$. Eksperimento Nr.2 į antros pakopos kondensacinį ekonomizaierį atitekančių dūmų temperatūra išlaikyta > 45 °C, santykinė degimo produktų drėgmė $\varphi=100$ %.

Dūmų temperatūrų verčių nustatymas charakteringuose taškuose leidžia identifikuoti koks šiluminės energijos kiekis, šilumos ir masės mainų procesų metu, iš dūmų perduodamas purškiamam fluidui bei nustatyti kokio tendencingumo poveikį turi L/G kriterijus antros pakopos kondensacinio ekonomizaierio ir absorbcinio šilumos siurblio sistemos darbui. L/G kriterijaus įtaka temperatūrų verčių dispersijai antros pakopos kondensaciniame ekonomizaierio, kuomet į antros pakopos kondensaciniame ekonomizaierio tiekiamas per pusę mažesnis už nominalų dūmų srautas. Eksperimentinio tyrimo Nr.2 dūmų temperatūrų pasiskirstymas antros pakopos kondensaciniame ekonomizaierio, priklausomai nuo L/G parametro pokyčio, pateikiamas 32 paveiksle.



32 pav. L/G kriterijaus įtaka temperatūrų verčių dispersijai antros pakopos kondensaciniame ekonomizaizeryje kai $V_{dF}/V_{dN} = 0,52$

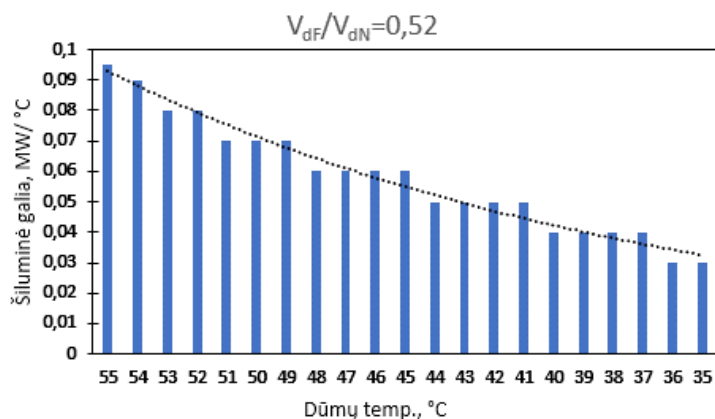
Antros pakopos kondensaciniame ekonomizaizeryje sumažinus dūmų srautą ir darbo režimui pasislinkus drastiškai nuo nominalios įrenginio galios, atsiranda didesnis skirtumas tarp charakteringo darbo taško nominalios galios ir potencialiai maksimalios šiluminės galios vertės. Kadangi absorbcinis šilumos siurblys eksperimentinių tyrimų Nr.2 metu dirbo nutolęs nuo savo maksimalios galios vertės, didinant išpurškiamo kondensato kiekį, tenkanti vienetiniam dūmų srauto tūriui, pasiekiamas gilesnis degimo produktų ataušinimas ir antros pakopos kondensacinio ekonomizaizero galios didėjimas.



33 pav. L/G kriterijaus įtaka kondensato temperatūros verčių dispersijai antros pakopos kondensaciniame ekonomizaizeryje kai $V_{dF}/V_{dN} = 0,52$

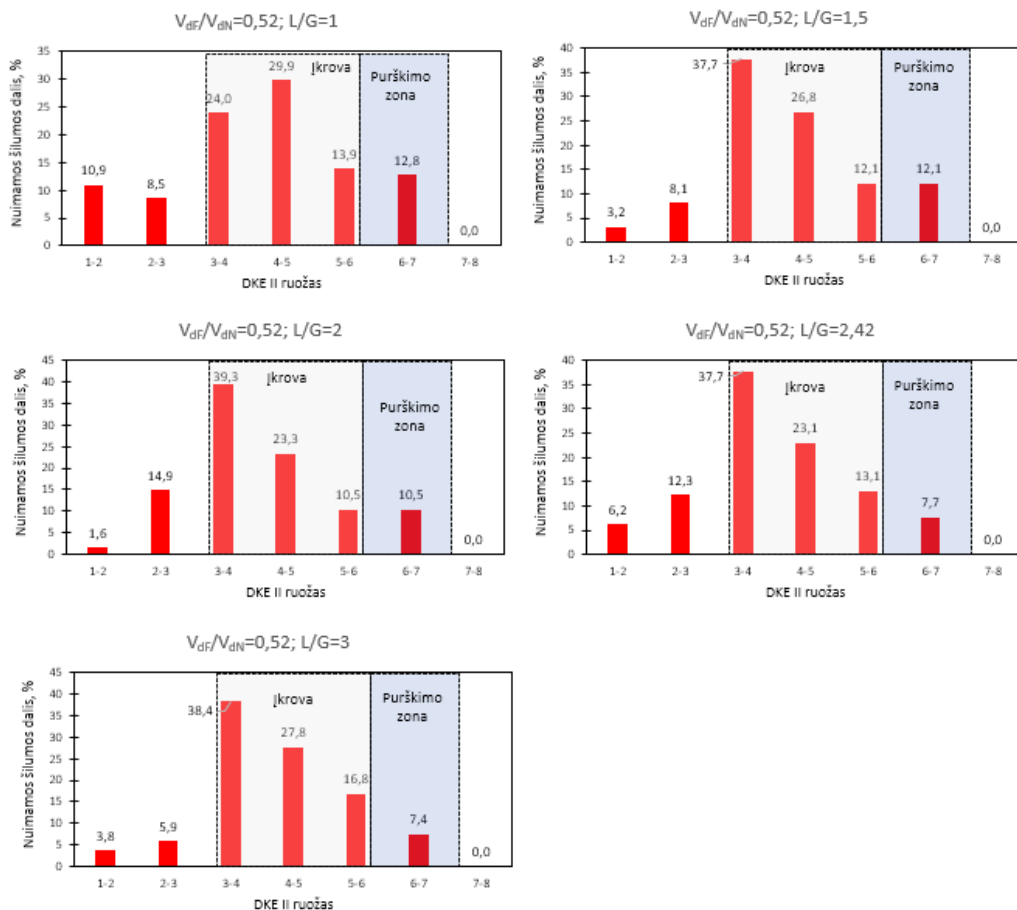
Mažesnis degimo produktų kiekis, lyginant su eksperimentiniu tyrimu Nr.1, nulemia mažesnę degimo produktų greitį įkrovos tūryje. Didesnis užlaikymo intervalas leidžia dūmų srautui ilgiau kontaktuoti su priešinga kryptimi, įkrovos paviršiumi tekančiu vandens srautu. Didesnis fluidų kontakto laikas nulemia didesnę išpurškto kondensato pašilimo laipsnį (žr. 33 paveikslą). Bendras L/G parametro įtakos kondensato temperatūros pokyčio, charakteringuose taškuose, tendencingumas indikuoja, kad išpurškiamas didesnis kondensato kiekis lemia mažesnę kondensato pašilimą, tačiau antros pakopos kondensacinio ekonomizaizero galia didėja (žr. 36 paveikslą). Šiluminės galios padidėjimas pagrindžiamas padidėjusio srauto kompensavimu kondensato temperatūrų skirtumo sumažėjimą. Kondensato temperatūros vertės eksperimentinių tyrimų metu nustatytos pradiniam išpurškimo

taške ir galutiniame – kondensato prieš tarpinį šilumokaitį. Tarpinės vertės interpoliuojamos pagal dūmų temperatūros pokytį ir dėl to pokyčio atsiradusio entalpijos sumažėjimo. Pagal šilumos balansą, visa iš dūmų išlaisvinama šiluma perduodama kondensatui. Atitinkama perduotos entalpijos vertė pakelia prieš dūmų srovę tekančio kondensato temperatūrą. Interpoliuotos ir faktiškai išmatuotos kondensato temperatūrų vertės antros pakopos kondensaciniame ekonomizaizeryje pateiktos 35 paveiksle.



34 pav. Šiluminės energijos kiekio paskirstymas vienetiniam degimo produktų temperatūros laipsnio pokyčiui, išlaisvinamas ataušinus dūmus vienu laipsniu kiekvienam degimo produktų temperatūros laipsniui kai užtikrinama $V_{dF}/V_{dN}=0,52$ ir $\varphi=100\%$ sąlygos.

Pagal charakteringas sąlygas sudarytą šiluminės energijos potencialo vienetiniame degimo produktų temperatūros laipsnio skirtume, grafiką nustatoma eksperimentinio tyrimo Nr.2 metu, visų matavimų antros pakopos kondensacinio ekonomizaizerio ruožuose iš dūmų kondensatui perduodamą šilumos kiekį (žr. 35 paveikslą).

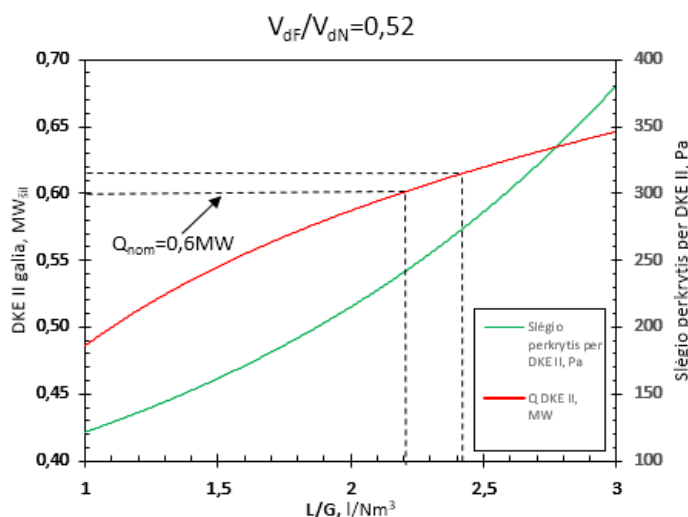


35 pav. Antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio charakteringų ruožų šiluminės galios santykinis pasiskirstymas

Eksperimentinio tyrimo Nr.2 metu nustatyta, kad didėjant esant mažesnėms L/G parametro vertėms ($1 - 1,5 \text{ l/Nm}^3$), kondensatui perduodamos šiluminės energijos santykinė vertė didėja įkrovos viduriniame ruože ($4 - 5$). Didėjant L/G parametru ($2 - 3 \text{ Nm}^3$) iš dūmų kondensatui perduodamos šilumos kiekis ypač suintensyvėja žemiausiame įkrovos sluoksnyje ($3 - 4$).

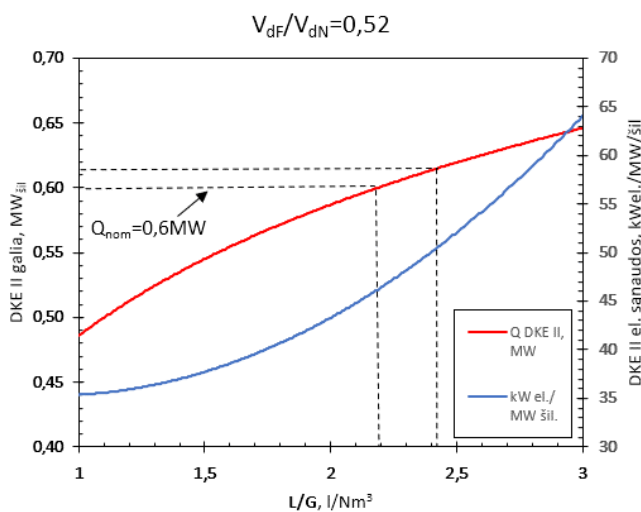
Matavimo Nr. 5 metu, išpildant kondensato išpurškiamo srauto vertę, kad būtų tenkinama $L/G=3 \text{ l/Nm}^3$ sąlyga, apatiniame įkrovos sluoksnyje susikaupia didelis tekančio kondensato srautas, kuris intensyviai sąveikauja su priešais atitekančiu dūmų srautu. Pastaruoju atveju apatinėje įkrovos dalyje, 1000 mm ruože ($3 - 4$) iš dūmų kondensatui perduodama $38,4 \%$ visame antros pakopos kondensaciniame ekonomaizeriulyje utilizuojamos šilumos.

Didėjant išpurškiamo kondensato kiekiui, įkrova tekantis kondensato srautas užima dalį laisvo pratekėjimo skerspjūvio, todėl padidėja degimų produktų srauto greitis įkrovoje. Išaugęs dujų srauto greitis, kvadratine priklausomybe didina aerodinaminį įkrovos pasipriešinimą ir tuo pačiu bendrą antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio slėgio perkrytį (žr. 36 paveikslą).



36 pav. L/G parametro įtaka antros pakopos kondensacinio ekonomizerio suminiam aerodinaminiam pasipriešinimui

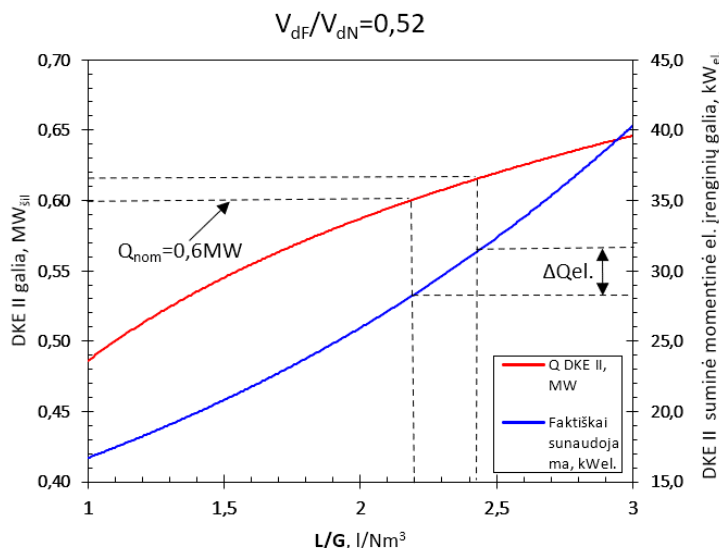
Antros pakopos kondensacinio ekonomizerio projektavimo etape, nustatytas optimalus L/G santykinis rodiklis yra 2,42 l/Nm³. Eksperimentinių tyrimų Nr.2 grafinė duomenų analizės pagalba nustatyta, kad šį darbo taško charakteringą rodiklį galima sumažinti iki 2,2 l/Nm³, norint palaikyti nominalią antros pakopos kondensacinio ekonomizerio galia pagal režiminę kortelę – 0,6 MW (žr. 37 paveikslą).



37 pav. L/G parametro įtaka antros pakopos kondensacinio ekonomizerio suminei elektros įrenginių momentinei galiai, skirčiai vienetinei antros pakopos kondensacinio ekonomizerio galiai

Dūmų kiekį, atitekančią į antros pakopos kondensacinį ekonomizerį, apibrėžiantis santykinis parametras $V_{dF}/V_{dN}=0,52$, nustato būdingame režime veikiančio antros pakopos kondensacinio ekonomizerio šiluminę galią. Eksperimentinio tyrimo Nr.2 metu antros pakopos kondensacinio ekonomizerio galia yra 0,6 MW. Šią vertę užduoda absorbcinio šilumos siurblio technologiniai ypatumai. Technologiniai absorbcinio šilumos siurblio ypatumai leidžia išvystyti garintuvo kontūro šiluminę galią iki 5 – 10 % didesnę nei nominali būdingame darbo taške, tačiau darbo ruože virš nominalaus našumo ribos, gali atsirasti parametru nestabilumo tendencija, o kiekvienam, virš nominalios šiluminės galios ribos utilizuotas šiluminės energijos vienetas reikalauja eksponentiškai didėjančių elektros įrenginių (darbo fluido siurblių) momentinių elektrinės galios verčių. Toks

nestabilus galios režimas gali absorbcinį šilumos siurblių išvesti iš normalaus darbo ir bendroje laiko imtyje, pagamintos šilumos kiekis antros pakopos kondensaciniame ekonomizaizeryje, gali būti dar mažesnis už nominalų. Optimizuojant antros pakopos kondensacinio ekonomizaizerio darbą, pasirenkama L/G vertė, prie kurios pasiekama nominali šiluminė galia – 0,6 MW. Tokia L/G vertė yra 2,2 l/Nm³, galiojant faktiniam ir nominalaus dūmų srautų santykių sąlygai $V_{dF}/V_{dN}=0,52$. Pastaruoju atveju, projektinis L/G parametras, kurio vertė 2,42 l/Nm³, sumažinamas iki eksperimentinių tyrimų metu nustatyto optimalaus $L/G = 2,2$ l/Nm³, taip sumažinant sumines kondensato išpurkšimo siurblio ir dūmų ventiliatoriaus elektros sąnaudas 9,3 % (žr. 38 paveikslą).



38 pav. L/G parametro įtaka antros pakopos kondensacinio ekonomizaizerio suminei elektros įrenginių momentinei galiai

Eksperimentinių tyrimų Nr.2 metu nustatyta optimali L/G vertė, apibrėžtomis $V_{dF}/V_{dN}=0,52$ sąlygomis leidžia sumažinti antros pakopos kondensacinio ekonomizaizerio elektros įrenginių suminę momentinę galią 2,8 kW_{el}.

25 lentelė. Technoekonominių parametru priklausomybė nuo L/G parametro

L/G, l/Nm ³	1	1,5	2	2,2	2,42	3
Slėgio perkrytis per DKE II, Pa	125	161	210	236	263	400
kW _{el} / MW šil.	34,6	39,1	44,0	45,9	49,0	64,7
Q DKE II, MW	0,5	0,52	0,59	0,6	0,62	0,65
Faktiškai sunaudojama, kW _{el} .	17,3	20,3	25,9	27,5	30,4	42,1

L/G, l/Nm ³	1	1,5	2	2,2	2,42	3	
Skirtumas nuo projektuoto optimalaus 2,42 L/G, kW _{el} /MW _{šil}	14,4	9,8	5,0	3,1	0	-15,7	
Bendras kW _{el} skirtumas nuo projektuoto 2,42 L/G	13,1	10,0	4,4	2,8	0	-11,7	
Sutaupoma el. sąnaudų, lyginant su projektiniu optimaliu L/G=2,42, %	43,0	33,0	14,6	9,3	0,0	-38,5	
Sutaupomos el. energijos kiekis, kWh _{el}	Per 1 val.	13,1	10,0	4,4	2,8	0,0	-11,7
	Per 24 val	313,3	240,4	106,1	67,8	0,0	-280,9
	Per savaitę	2193,0	1682,8	743,0	474,7	0,0	-1966,4
	Per mėnesį	9398,6	7212,1	3184,2	2034,5	0,0	-8427,6
	Per pusę metų	56391,3	43272,4	19105,1	12207,0	0,0	-50565,7
	Per 7900 val. (metai)	103123,0	79132,4	34937,6	22323,0	0,0	-92469,7
El. energijos kaina, €/kWh _{el}	0,245*						
Sutaupoma eksploatacinių kaštų, €	25265,1	19387,4	8559,7	5469,1	0,0	-22655,1	

Optimizuotas L/G rodiklis nuo 2,42 iki 2,2 l/Nm³ per pusę metų leistų sumažinti eksploatacijos sąnaudas apie 2,8 tūkst. €, o vienerių metų (7900 val.) antros pakopos kondensacinio ekonomizaizerio optimizuotas darbas nominaliu galios režimu leistų sumažinti sąnaudas 5,5 tūkst. € (žr. 25 lentelę).

5.3.3 Eksperimentinio tyrimo Nr. 3 rezultatai

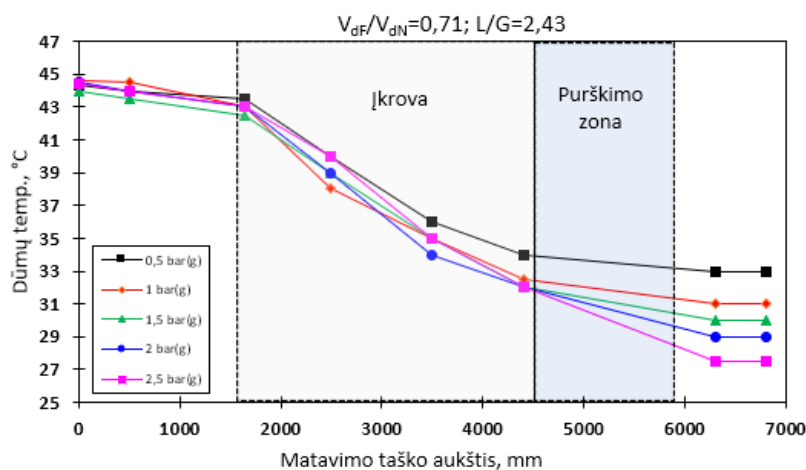
Eksperimentinis tyrimas Nr.3 skirtas nustatyti kondensato išpurškimo kokybinių parametų įtaką antros pakopos kondensacinio ekonomizaizerio galios parametrai, kuomet į antros pakopos kondensacinį ekonomizaizerį tiekiami degimo produktai mažesnės nei 45 °C temperatūros ir pašilusio kondensato temperatūra yra per žema užtikrinti nominalius temperatūrinius parametrus absorbcinio šilumos siurblio garintuvo kontūrai. Šiuo atveju dūmų kiekis, atitekančias į antros pakopos kondensacinį ekonomizaizerį sudaro 0,71 % projektinės nominalios dūmų srauto vertė, t.y. santykinis rodiklis $V_{dF}/V_{dN}=0,71$. Eksperimento Nr.3 metu į antros pakopos kondensacinį ekonomizaizerį atitekančių dūmų temperatūra išlaikyta < 45 °C, santykinė degimo produktų drėgmė $\varphi=100$ %.

Dūmų temperatūrų verčių nustatymas charakteringuose taškuose leidžia identifikuoti koks šiluminės energijos kiekis, šilumos ir masės mainų procesų metu, iš dūmų perduodamas purškiamam fluidui bei nustatyti kokio tendencingumo poveikį turi išpurškiamo kondensato slėgio vertė antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio ir absorbcinio šilumos siurblio sistemos darbui. Tyrimuose naudojamos išpurškiamo kondensato slėgio vertės:

- 0,5 bar(g);
- 1 bar(g);
- 1,5 bar(g);
- 2 bar(g);
- 2,5 bar(g).

L/G kriterijus palaikomas pastovios vertės – 2,43, t.y. išpurškiamo kondensato kiekis ir degimo produktų srautų vertės nekinta, keičiamas išpurškiamo kondensato slėgis koreguojant veikiančių purkštukų kiekį.

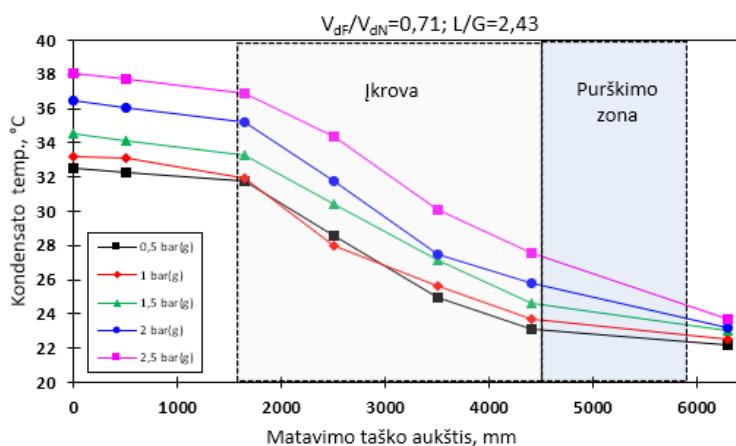
Eksperimentinio tyrimo Nr.3 dūmų temperatūrų pasiskirstymas antros pakopos kondensaciniame ekonomaizeryje, priklausomai nuo išpurškiamo kondensato slėgio parametro, pateikiamas 39 paveiksle.



39 pav. Išpurškiamo kondensato slėgio įtaka dūmų temperatūrų verčių dispersijai antros pakopos kondensaciniame ekonomaizeryje kai $V_{dF}/V_{dN} = 0,71$, $L/G = 2,43$

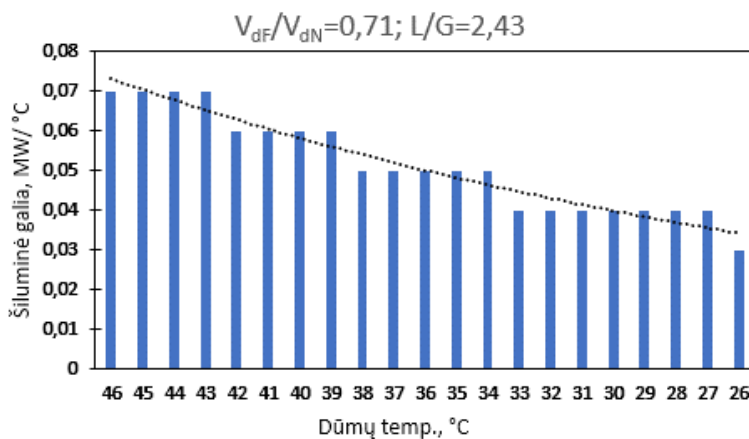
Antros pakopos kondensaciniame ekonomaizeryje didinant išpurškiamo kondensato slėgį, prieš įkrovą ir įkrovoje charakteringų pokyčių nenustatyta. Kondensato išpurškimo zonoje, nuo purkštukų iki įkrovos paviršiaus degimo produktų temperatūra mažėja sparčiau ir pokytis yra didesnės vertės, kuomet išpurškiamo kondensato slėgio vertė didėja.

Didėjant išpurškiamo kondensato slėgiui, disperguojamas mažesnio diametro kondensato lašelių srauto tūris, mažesnio diametro lašeliai greičiau pašyla dėl mažesnės masės, todėl nereikalingas ilgas užlaikymo tarpas dūmų sraute, o tolygiau po įkrovos paviršių paskirstyti mažesnio diametro lašai užtikrina ilgesnį kondensato srauto užlaikymą įkrovos tūryje. Smulkiau disperguojamas lašelių srautas leidžia pasiekti didesnę kondensato temperatūrų skirtumą ir padidinti utilizuojamos šiluminės energijos kiekį. Kondensato temperatūrų pasiskirstymas antros pakopos kondensaciniame ekonomaizeryje, priklausomai nuo išpurškiamo kondensato slėgio parametro, pateikiamas 40 paveiksle.



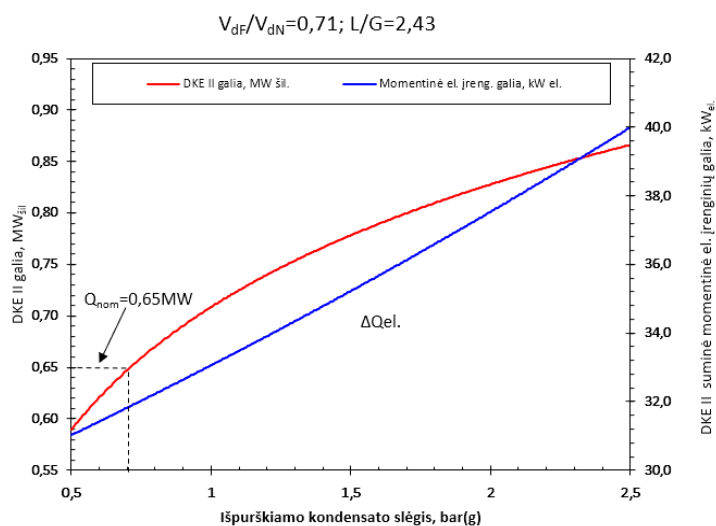
40 pav. Išpurškiamo kondensato slėgio įtaka dūmų temperatūrų verčių dispersijai antros pakopos kondensaciniame ekonomizaizeryje kai $V_{dF}/V_{dN}=0,71, L/G=2,43$

Kondensato temperatūros vertės eksperimentinių tyrimų metu nustatytos pradiniam išpurškimo taške ir galutiniame – kondensato prieš tarpinį šilumokaitį. Tarpinės vertės interpoliuojamos pagal dūmų temperatūros pokytį ir dėl to pokyčio atsiradusio entalpijos sumažėjimo. Pagal šilumos balansą, visa iš dūmų išlaisvinama šiluma perduodama kondensatui. Atitinkama perduotos entalpijos vertė pakelia prieš dūmų srovę tekančio kondensato temperatūrą. Interpoliuotos ir faktiškai išmatuotos kondensato temperatūrų vertės antros pakopos kondensaciniame ekonomizaizeryje pateiktos 41 paveiksle.



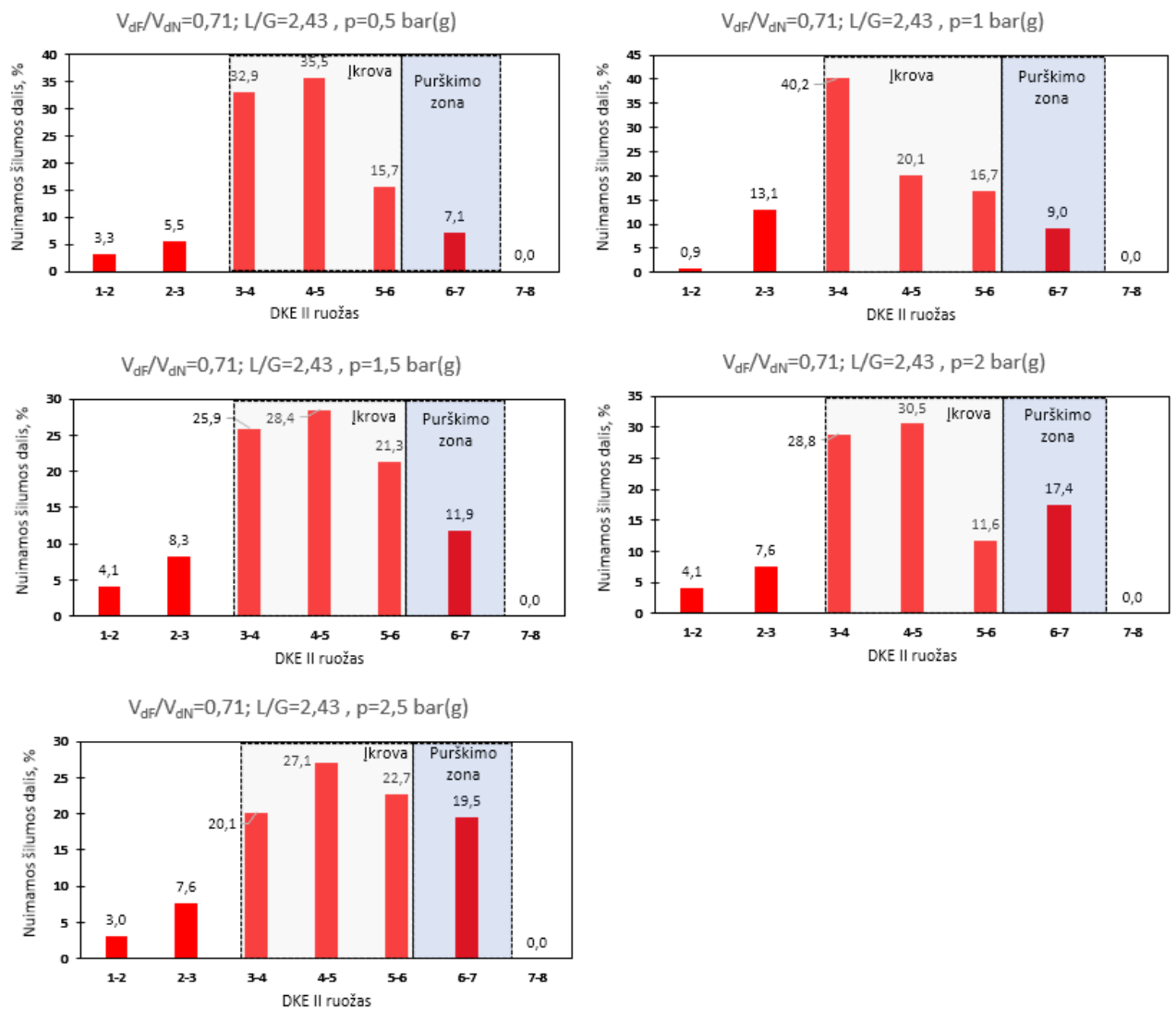
41 pav. Šiluminės energijos kiekio paskirstymas vienatiniam degimo produktų temperatūros laipsnio pokyčiui, išlaisvinamas ataušinus dūmus vienu laipsniu kiekvienam degimo produktų temperatūros laipsniui kai užtikrinama $V_{dF}/V_{dN}=0,71$ ir $\varphi=100\%$, $L/G=2,43$ sąlygos.

Pagal charakteringas sąlygas sudarytą šiluminės energijos potencialo vienatiniam degimo produktų temperatūros laipsnio skirtume, grafiką nustatoma eksperimentinio tyrimo Nr.3 metu, visų matavimų antros pakopos kondensacinio ekonomizaizero ruožuose iš dūmų kondensatui perduodamą šilumos kiekį (žr. 42 paveikslą).



42 pav. Išpurškiamo kondensato slėgio parametro įtaka antros pakopos kondensacinio ekonomizerio suminei elektros įrenginių momentinei galiai

Eksperimentinio tyrimo Nr. 3 metu, užtikrinant $V_{dF}/V_{dN} = 0,71$, $\varphi = 100\%$, $L/G = 2,43 \text{ l/Nm}^3$, dūmų temperatūra į DKE II $< 45\text{ }^\circ\text{C}$ sąlygas, antros pakopos kondensacinio ekonomizerio projektuotina nominali galia – 0,65 MW. Ši vertė nepasiekama kondensatą purškiant 0,5 bar(g) slėgiu. Projektinei vertei užtikrinti reikia pasiekti išpurškiamo kondensato slėgį, lygų 0,7 bar(g). Didinant išpurškiamo kondensato slėgį, antros pakopos kondensacinio ekonomizerio galia tendencingai kyla (žr. 43 paveikslą). Slėgio vertei pasiekus 2,2 – 2,3 bar(g), dėl smulkių lašų dispersijos ir mažos jų masės, pastebimas kondensato masės išnešimas iš antros pakopos kondensacinio ekonomizerio, lašų gaudytuvo ir dūmų ventiliatoriaus drenažiniuose kanaluose. Siekiant minimizuoti inšesamų fizinių lašų kiekį, išpurškiamo kondensato maksimali slėgio vertė apribojama iki 2,2 bar(g).



43 pav. Antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio charakteringų ruožų šiluminės galios santykinis pasiskirstymas

Antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio kondensato išpurškimo ruože (6 – 7), didžiausias efektyvumas išgaunamas kondensato srautą disperguojant į mažiausius lašų diametrus, t.y. didinant išpurškiamo kondensato slėgį. Pasiiekti projektinę antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio galią būdingame taške – 0,65 MW, pradinę 0,5 bar(g) slėgio vertę reikia padidinti iki 0,7 bar(g). Pastaruoju atveju pasiekiami nominali galia, o išpurškiamo kondensato tūryje, bendros utilizuojamos šilumos kiekis, antros pakopos kondensaciniame ekonomaizeryje, sudaro 7 – 9 %. Padidinus išpurškiamo kondensato slėgį iki maksimaliai optimalios vertės – 2 bar(g), išpurškimo zonoje atgaunamos šilumos kiekis sudaro 19,5 % bendro balanso (žr. 43 paveikslą).

26 lentelė. Išpurškiamo kondensato slėgio pokyčio įtakos DKE II galiai ir el. sąnaudoms suvestinė

	$V_{dF}/V_{dN}=0,71; L/G=2,43$			
	Išpurškiamo kondensato slėgis, bar(g)			
	0,7	1	1,5	2
DKE II galia, MWšil.	0,65	0,67	0,75	0,83

	$V_{dF}/V_{dN}=0,71; L/G=2,43$			
Skirtumas nuo nominalaus darbo taško (0,7 bar (g)), MW	0	0,02	0,1	0,18
DKE II galios padidėjimas nuo nominalaus darbo taško (0,7 bar (g)), %	0	3,0	13,3	21,7
El. įrenginių momentinė galia, kW	31,9	33,4	35,8	38,1
El. įreng. moment. galių skirtumas nuo nominalaus darbo taško (0,7 bar (g)), kW	0,0	1,5	3,9	6,2
El. sanaudų padidėjimas nuo nominalaus darbo taško (0,7 bar (g)), %	0,0	4,4	10,9	16,3
Vienas kW el. padidina DKEII šil. galią nuo nominalaus darbo taško (0,7 bar (g)), kWšil./kWel.	29,0			

Kadangi antros pakopos kondensacinio ekonomizaierio maksimalią galimą šiluminę galią charakteringomis sąlygomis apibrėžia absorbcinio šilumos siurblio technologinės ypatybės, eksperimentinio tyrimo Nr.3 užtikrinant $V_{dF}/V_{dN} = 0,71$, $\varphi=100\%$, $L/G= 2,43 \text{ l/Nm}^3$, dūmų temperatūra į DKE II $< 45\text{ }^\circ\text{C}$ sąlygas, absorbcinio šilumos siurblio galimos utilizuoti šiluminės energijos kiekis gali būti padidintas, jeigu antros pakopos kondensacinio ekonomizaierio darbas bus optimizuotas. Priemonė optimizuoti antros pakopos kondensacinio ekonomizaierio darbą – organizuoti technologinį šilumos ir masės mainų procesą taip, kad išpurškiamo ir surenkamo kondensato temperatūrų skirtumas būtų kuo artimesnis absorbcinio šilumos siurblio garintuvo kontūro vertei. Didinant išpurškiamo kondensato slėgį sukuriama kokybiškesnio kondensato lašų dispergavimo sąlygos, kas lemia didesnę perduodamos šilumos kondensatui kiekį (žr. 26 lentelę). Duotosiomis sąlygomis, nominali antros pakopos kondensacinio ekonomizaierio galia yra 0,65 MW ir pasiekama palaikant 0,7 bar(g) irpuškimo slėgį, o didinant slėgį iki 2 bar(g), šiluminė galia pasiekia 0,83 MW vertę. Šiame parametru diapazone, nuo 0,7 bar(g) didinant slėgį iki 2 bar(g), kiekvieno papildomai sunaudotas elektros energijos vienetas padidina šiluminę galią 29 šiluminės galios vienetais (žr. 26 lentelę).

5.4 Eksperimentinių tyrimų metu nustatytų priemonių panaudojimo apibendrinimas

Antros pakopos kondensacinio ekonomizaierio darbui optimizuoti, pasitelkti eksperimentiniai tyrimai siekiant:

1. Technologinėmis organizacinėmis priemonėmis minimizuoti elektros įrenginių (kondensato išpurškimo siurblio ir dūmų ventiliatoriaus) sunaudojamą elektros energijos kiekį, išlaikant garantinio darbo taške numatytą antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio šiluminę galią;
2. Technologinėmis organizacinėmis priemonėmis padidinti kondensacinio ekonomaizerio našumą ne garantinio taško parametrų režiuose, užtikrinant kondensato temperatūros parametrų skirtumus ir diapazonus, optimalius absorbcinio šilumos siurblio garintuvo kontūrai;
3. Technologinėmis organizacinėmis priemonėmis užtikrinti, kad antros pakopos kondensacinio ekonomaizerio darbo optimizavimo technologinis valdymas vyktų pagal technologinių optimizavimo priemonių technologinės tvarkos palaikymo reguliatorių didžiausio išėties signalo vertę, t.y. tik viena iš technologinių optimizavimo priemonių naudojama vienu metu, priklausomai, kurios priemonės poreikis technologijoje duotuoju momentu yra reikalingiausias.

Išvados

1. Atlikus antros pakopos kondensacinio ekonomizaizerio užduotų techninių charakteristikų analizę bei remiantis literatūros apžvalga parinktas technologiškai optimalus antros pakopos kondensacinio ekonomizaizerio tipas – priešpriešinių srautų, tiesioginio kontakto su išvystyto šilumos ir masės mainų paviršiaus ploto įkrova.
2. Inžinerinėmis ir ekonominėmis analitinėmis priemonėmis nustatyta antros pakopos kondensacinio ekonomizaizerio korpuso medžiaga – stikloplasčio kompozitas (GRP), kuri leidžia sumažinti įrenginio kainą 30 %, lyginant su nerūdijančio plieno (AISI316) konstrukcija.
3. Baigtinių elementų metodu apskaičiuotų ir eksperimentinių tyrimų metu išmatuotų antros pakopos kondensacinio ekonomizaizerio aerodinaminių pasipriešinimų verčių nesutaptis – 11 % (658 ir 739 Pa) , esant $V_{dF}/V_{dN} = 0,96$, %, $L/G = 2,43 \text{ l/Nm}^3$ rodikliams bei 15 % rezultatų nesutaptis (263 ir 312 Pa) esant $V_{dF}/V_{dN} = 0,52$, %, $L/G = 2,43 \text{ l/Nm}^3$.
4. Optimalaus išpurškiamo kondensato kiekio, tenkančio dūmų tūriui verčių nesutaptis tarp inžinerinių skaičiavimų ir eksperimentinių tyrimų kai $V_{dF}/V_{dN} = 0,96 - 29$ % (2,42 ir $1,92 \text{ l/Nm}^3$) ir atitinkamai kai $V_{dF}/V_{dN} = 0,52 - 9,9$ % (2,42 ir $2,2 \text{ l/Nm}^3$).
5. Eksperimentinių tyrimų metu nustatyta, kad antros pakopos kondensaciniame ekonomizaizeryje sumažinus purškiamo kondensato kiekį nuo 2,42 iki $1,92 \text{ l/Nm}^3$, kai užtikrinamas dūmų srautas $V_{dF}/V_{dN} = 0,96$ ir 50 °C temperatūra įtekėjime – išlaikoma nominali 1,2 MW šiluminė galia, o elektros įrenginių suminė momentinė elektrinė galia sumažėja 21,1 % (8,9 kW_{el.}).
6. Eksperimentinių tyrimų metu nustatyta, kad antros pakopos kondensaciniame ekonomizaizeryje sumažinus purškiamo kondensato kiekį nuo 2,42 iki $2,2 \text{ l/Nm}^3$, kai užtikrinamas dūmų srautas $V_{dF}/V_{dN} = 0,52$ ir 50 °C temperatūra įtekėjime – išlaikoma nominali 0,6 MW šiluminė galia, o elektros įrenginių suminė momentinė elektrinė galia sumažėja 9,3 % (2,8 kW_{el.}).
7. Žemos dūmų temperatūros režimo atveju (45°C) kai dūmų srautas į antros pakopos kondensacinį ekonomizaizerį $V_{dF}/V_{dN} = 0,71$, o išpurškiamo kondensato kiekis $L/G = 2,42 \text{ l/Nm}^3$, nominali darbo taško galia (0,65 MW) pasiekama kondensato kolektoriuje palaikant 0,7 bar(g) slėgį. Ekvivalenčiomis sąlygomis padidinus kondensato kolektoriuje slėgį nuo 0,7 bar(g) iki 2 bar(g), antros pakopos kondensacinio ekonomizaizerio šiluminė galia padidėjo 21,7 % (nuo 0,65 iki 0,83 MW).
8. Žemos dūmų temperatūros režimo atveju (45°C) kai dūmų srautas į antros pakopos kondensacinį ekonomizaizerį $V_{dF}/V_{dN} = 0,71$, o išpurškiamo kondensato kiekis $L/G = 2,42 \text{ l/Nm}^3$, didinant išpurškiamo kondensato slėgį nuo 0,7 bar(g) iki 2 bar(g), kiekvienas padidėjęs elektros įrenginių galios vienetas leidžia 29 kartais padidinti šiluminę galią (1 kW_{el.}/ 29 kW_{šil.}).
9. Bendros technologinio proceso optimizavimo priemonės (reikiamo išpurkšti kondensato kiekio minimizavimas ir kondensato srauto dispergavimas) per mėnesio eksploatacinį laikotarpį sumažina elektros sąnaudų kaštus 2 – 6,5 tūkst. €, kai į antros pakopos kondensacinį ekonomizaizerį tiekiamų dūmų kiekis $> V_{dF}/V_{dN} = 0,5$ ir $\geq 45^\circ\text{C}$ temperatūra.

Literatūros sąrašas

1. APLINKOS PROJEKTŲ VALDYMO AGENTŪRA. 2020-06-01 kvietimas teikti paraiškas skatinamajai išmokai gauti dėl saulės energijos technologijų, šilumos siurblių ir šilumos saugyklų panaudojimo centralizuotais tinklais tiekiamos šilumos energijai gaminti, pakeičiant iškastinio kuro naudojimą. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-02-22]. Prieiga per: <https://www.apva.lt/saules-energijos-technologiju-silumos-siurbliu-ir-silumos-saugyklu-panaudojimo-centralizuotais-tinklais-tiekiamos-silumos-energijai-gaminti-skatinimas-pakeiciant-iskastinio-kuro-naudojima/>
2. LIETUVOS RESPUBLIKOS APLINKOS MINISTRAS. Įsakymas dėl klimato kaitos programos lėšų naudojimo 2021 m. sąmatą detalizuojančio plano patvirtinimo 2021 balandžio 21 d. . [interaktyvus] [žiūrėta 2022-03-03]. Prieiga per: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/9e49e292a2d811ebb458f88c56e2040c>
3. PRIMOZ, Poredos, Nada PETELIN, Boris VIDRIH, Tilen ZEL, Qiuming MA, Ruzhu WANG, Andrej KITANOVSKI. Condensation of water vapor from humid air inside vertical channels formed by flat plates. Shanghai Jiao Tong University, Institute of Refrigeration and Cryogenics, Engineering Research Center of Solar Power and Refrigeration, Kinija, 2022.
4. STULL, Roland. An algebra-based survey of atmospheric science. *Practical Meteorology*. 2017, 96-102.
5. GIMBUTIS, Gajus, Kazimieras KAJUTIS, Vytautas KRUKONIS, Algimantas PRANCKŪNAS ir Petras ŠVENČIANAS. *Šiluminė technika*. Vilnius: Mokslas, 1993, 89, 155, 312.
6. M.WALLACE, John, Peter V.HOBS. Atmospheric Thermodynamics. *Atmospheric Science (Second Edition)*. University of Washington, JAV, 2012.
7. D.KOOL, E.AGRA, A.DRABKIN, A.DUNCAN. The overlooked non-rainfall water input sibling of fog and dew: Daily water vapor adsorption on a !Nara hummock in the Namib Sand Sea. *Journal of Hydrology*. 2021, 2-4.
8. KOROTCENKOV, Ghenadii. Pectroscopic Methods Of Humidity Measurement: Methods, Materials and Technologies. *Handbook of Humidity Measurement*. 2018, 8-12.
9. DROBAVIČIUS, Alfonsas. *Bendroji šiluminė technika*. Vilnius: Mintis, 2014, 235.
10. SU, Jiqiang, Zhongning SUN, Guangming FAN, Ming DING. Experimental study of the effect of non-condensable gases on steam condensation over a vertical tube external surface. *Nuclear Engineering and Design*. Harbin Engineering University, Kinija, 2013.
11. VEIDENBERGS, Ivars. Heat and Mass Transfer Processes in Scrubber of Flue Gas Heat Recovery Device. *Scientific Journal of Riga Technical University*. Riga Technical University, Latvija, 2010.
12. NOVOŠINSKAS, Henrikas. *Inžinerinių technologijų projektavimas*. Vilnius, 2012, 14-17.
13. HERRAIZ, Laura, Dougal Watson HOGG, Jim COOPER, Jon GIBBINS. Reducing water usage with rotary regenerative gas/gas heat exchangers in natural gas-fired power plants with post-combustion carbon capture. The University of Edinburgh, Škotija, 2015.
14. ACKERMANN, Robert A. . Regenerative Heat Exchanger Theory. *Cryogenic Regenerative Heat Exchangers*. 1997, 15-22.
15. G.MUSGROVE, S.SULLIVAN, D.SHIFERAW, P.FOURSPRING. Fundamentals and Applications of Supercritical Carbon Dioxide (sCO₂) Based Power Cycles. Southwest Research Institute, JAV. 2017.

16. LEARN ENGINEERING „Types Of Heat Exchangers And Their Working Principle“ duomenų bazė. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-03-14]. Prieiga per: <https://www.learnengineering.net/types-of-heat-exchangers-and-their-working-principle/>
17. L.DALLUGE, Dustin, Lysle E.WHITMER, Joseph P.POLIN, Yong S.CHOI. Comparison of direct and indirect contact heat exchange to improve recovery of bio-oil. *Applied Energy*. Iowa State University, JAV, 2019.
18. LIETUVOS RESPUBLIKOS APLINKOS MINISTRAS. Įsakymas dėl Lietuvos Respublikos energetikos ministro 2013 m. rugsėjo 20 d. įsakymo Nr. 1-185 „dėl kietojo biokuro apskaitos taisyklių patvirtinimo“ pakeitimo. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-03-15]. Prieiga per: https://e-seimas.lrs.lt/rs/legalact/TAD/6783bbb060f511e7a53b83ca0142260e/format/ISO_PDF/
19. KIETOJO BIOKURO STANDARTAS ISO 17225-1:2014, kuro specifikacija ir klasifikavimas, bendrieji reikalavimai, B1 lentelė. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-03]. Prieiga per: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:17225:-1:ed-1:v1:en>
20. BAEHR H.D. The COP of absorption and resorption heat pumps with ammonia-water as working fluid. *International Journal of Refrigeration*. Vokietija, 2003.
21. ABRAHAMSSON, Klas. Absorption Heat Cycles An Experimental and Theoretical Study. Švedija, 1997.
22. LIETUVOS RESPUBLIKOS APLINKOS MINISTRAS. Įsakymas dėl klimato kaitos programos priemonės „esamos įrangos modernizavimas pritaikant šilumos akumuliacijai, absorbcinių šilumos siurblių diegimas ir (ar) atsinaujinančių energijos išteklių (saulės energijos elementai) panaudojimas centralizuoto šilumos tiekimo sektoriuje siekiant didinti energinį efektyvumą, esamų įrenginių, naudojančių atsinaujinančius išteklius, apkrovimą ir atsinaujinančių energijos išteklių dalį“ valstybės pagalbos schemos patvirtinimo. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-07]. Prieiga per: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/11b4fa93006d11ea90d5d63c859a8aa7?jfwid=2lxb8pqqd>
23. B. BOMAN, Daniel, Srinivas GARIMELLA. Absorption Heat Pump Cycles For Simultaneous Space Conditioning And Graywater Purification. *Elsevier*. Institute of Technology, JAV, 2019, 5-6.
24. C.F.BRAUN. Heat Exchangers. JAV, 1949.
25. EUROPOS PARLAMENTO IR TARYBOS DIREKTYVA 2003/87/EB. Nustatanti šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijos leidimų sistemą Bendrijoje ir iš dalies keičianti Tarybos direktyvą 96/61/EB. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-15]. Prieiga per: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=CELEX:32003L0087>
26. JUNG TINIŲ TAUTŲ STATISTIKOS SKYRIUS. Bendras Pasaulio suvartojamos energijos kiekis. Tendencija nuo 1950 [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-08]. Prieiga per: <https://unstats.un.org/unsd/energystats>
27. CUI, Zhaoyang, Qian DU, Jianmin GAO, Rushan BIE. Development of a direct contact heat exchanger for energy and water recovery from humid flue gas. *Applied Thermal Engineering*. Harbin Institute of Technology, Kinija, 2020, 1-3.
28. E. DIAZ-BEJARANO, E. BEHRANVAND, F. COLETTI, M.R. MOZDIANFARD, S. MACCHIETTO. Organic and inorganic fouling in heat exchangers – Industrial case study. *Applied Energy*. Imperial College London, JK, 2017, 1250-1266.

29. YANG, Bo, Yi JIANG, Lin FU, Shigang ZHANG. Conjugate heat and mass transfer study of a new open-cycle absorption heat pump applied to total heat recovery of flue gas. *Applied Thermal Engineering*. Tsinghua University, Kinija, 2018, 888-899.
30. VIGANTS, Edgars, Toms PRODANUKS, Girts VIGANTS, Ivars VEIDEBERGS, Dagnija BLUMBERGA. Modelling of Technological Solutions to 4th Generation DH Systems. *Environmental and Climate Technologies*. Riga Technical University, Latvija, 2017.
31. JANGHORBAN, Iman, Janghorban ESFAHANIA, Yong TAE, Kang CHANG, Kyoo YOOA. A high efficient combined multi-effect evaporation–absorption heat pump and vapor-compression refrigeration. *Applied Energy*. Kyung Hee University, Pietų Korėja, 2014, 314-320.
32. LOTFI, Samira, Weiguo MA. A wet packed-bed scrubber for removing tar from biomass producer gas. *Fuel Processing Technology*. National Research Council of Canada, Kanada, 2014, 198-199.
33. GALUSTOV, V. S. . The direct – flow spray devices in heat – power engineering. Rusija, 1989.
34. POWER PLANT SIMULATOR AND DESIGNER. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-19]. Prieiga per: <https://powerplantsimulator.com/about-ppsd/>
35. COKER, A. Kayode. Distillation, packed towers, petroleum fractionation, gas processing and dehydration. *Ludwig's Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants*. JK, 2007.
36. FISHER SCIENTIFIC. Chemical compatibility chart data base. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-22]. Prieiga per: <https://www.wisconsin.edu/ehs/download/Fisher-Scientific-Chemical-Compatibility-Chart.pdf>
37. CPLABSAFETY. PVC Chemical Compatibility data base. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-22]. Prieiga per: <https://www.calpaclab.com/pvc-polyvinyl-chloride-chemical-compatibility-chart/>
38. POUZADA, Antonio Sergio. Selection of thermoplastics. *Design and Manufacturing of Plastics Products*. University of Minho, Portugalija, 2021.
39. OMNEXUS MATERIAL SELECTION PLATFORM. Data base for plastics. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-23]. Prieiga per: <https://omnexus.specialchem.com/polymer-properties/properties/young-modulus>
40. GIJSMANA, Pieter, Guido MEIJERSA, Giacomo VITARELLI. Comparison of the UV-degradation chemistry of polypropylene, polyethylene, polyamide 6 and polybutylene terephthalate. *Polymer Degradation and Stability*. University of Messina, Italija, 1999, 435-439.
41. WANG, Dexin, Ainan BAO, Walter KUNC, William LISS. Coal power plant flue gas waste heat and water recovery. *Applied Energy*. Gas Technology Institute, JAV, 2011, 341-348.
42. LIETUVOS RESPUBLIKOS SUSISIEKIMO MINISTRAS. Įsakymas dėl maksimalių leidžiamų transporto priemonių matmenų, leidžiamų ašies (ašių) apkrovų, leidžiamos bendrosios masės patvirtinimo. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-28]. Prieiga per: <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.B3618189BEF5>
43. A.G. BHAVE, D.K. VYAS. A wet packed bed scrubber-based producer gas cooling–cleaning system. *Renewable Energy*. Sardar Patel Renewable Energy Research Institute, Indija, 2007, 1716-1720.
44. M.METIKOŠ-HUKOVIĆ. High corrosion resistance of austenitic stainless steel alloyed with nitrogen in an acid solution. *Corrosion Science*. University of Zagreb, Kroatija, 2011, 2177-2181.
45. MA, Xiaochen, Wenchao SHI, Hongxing YANG. Study on water spraying distribution to improve the energy recovery performance of indirect evaporative coolers with nozzle arrangement optimization. *Applied Energy*. The Hong Kong Polytechnic University, Kinija, 2022.

46. SOLIDWORKS FLOWSIMULATION PRESSURE DROP ANALYSIS. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-28]. Prieiga per: <https://www.solidworks.com/sw/flow-simulation-pressure-drop-analysis-confirmation.htm>
47. GAO, Jianmin, Zhihao SUN, Zhiqiang WANG, Xin WANG. Measurement method and influencing factors of temperature and humidity of condensed flue gas based on in situ flue gas heat tracing. *Applied Elsevier*. Harbin Institute of Technology, Kinija, 2018.