



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

**Šarūnas Šimelevičius**

**BIOKURO KATILINĖS VEIKIMO REŽIMŲ OPTIMIZAVIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Doc. dr. Rolandas Jonynas

**KAUNAS, 2017**

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

**BIOKURO KATILINĖS VEIKIMO REŽIMŲ OPTIMIZAVIMAS**

Baigiamasis magistro projektas  
Termoinžinerija (kodas 621E30001)

**Vadovas**

Doc. dr. Rolandas Jonynas

**Recenzentas**

Prof. habil. dr. Gintautas Miliauskas

**Projektą atliko**

Šarūnas Šimelevičius

**KAUNAS, 2017**



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

---

Šarūnas Šimelevičius

(Studento vardas, pavardė)

Terminžinerija, 621E30001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

---

„Biokuro katilinės veikimo režimų optimizavimas“  
**AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA**

20 17 m. gegužės 23 d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Šarūno Šimelevičiaus**, baigiamasis projektas tema „Biokuro katilinės veikimo režimų optimizavimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

---

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

---

(parašas)

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

**Tvirtinu:**

Šilumos ir atomo energetikos  
katedros vedėjas

*(parašas, data)*

doc. E. Puida

*(vardas, pavardė)*

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

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

1. Darbo tema: Biokuro katilinės veikimo režimų optimizavimas.....  
.....  
Patvirtinta 2017 m. balandžio mėn. 21 d. dekanu įsakymu Nr. V25-11-8.....
2. Darbo tikslas: Nustatyti optimalius biokuro katilinės veikimo režimų parametrus ir jų įtaką šilumos energijos generavimo efektyvumui, ekonominiams ir ekologiniams rodikliams .....  
.....
3. Darbo struktūra: Darbo tikslas ir uždaviniai. Literatūros apžvalga. Eksperimentiniai tyrimai. Eksperimentinių tyrimų rezultatai. Analitinis katilinės veikimo režimų modeliavimas. Išvados.....  
.....
4. Reikalavimai ir sąlygos: Darbas turi atitikti baigiamajam magistro projektui keliamus reikalavimus. ....  
.....  
.....
5. Užbaigto darbo pateikimo terminas: 2017 m. gegužės mėn. 23 d.

6. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamąjo darbo dalis.

Išduota studentui .....

Užduotį gavau                      Šarūnas Šimelevičius                      .....                      2017-02-02  
*(studento vardas, pavardė)*                      *(parašas)*                      *(data)*

Vadovas                      Doc. dr. Rolandas Jonynas                      .....                      2017-02-02  
*(pareigos, vardas, pavardė)*                      *(parašas)*                      *(data)*

Šimelevičius, Šarūnas. *The Optimization of Biofuel Boiler House Performance*: Master's thesis / supervisor assoc. prof. Rolandas Jonynas. The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Research area and field: Energy Engineering

Key words: biofuel, boiler house, efficiency, performance optimization

Kaunas, 2017. 58 p.

## SUMMARY

In recent years, favorable government investment environment has led to emergence of new private independent heat producers in Lithuania that were using biofuel as primary energy source. These projects allowed to decrease heat energy prices for consumers, fulfill environmental agreements and ensure higher level of energetics independency, but because of modern technologies and lack of experience not all boiler houses worked as they were planned to, their performance level was poor.

The aim of this project is to optimize biofuel boiler house performance, find and indicate areas for improvement. A literature review of boiler performance optimization in foreign countries is presented. A special methodology for research of selected biofuel boiler house is created. After performing experimental measurements analytical calculations are made. Conclusions are drawn. Optimal excess air ratio for investigative boiler house is 1,3. Smaller air excess ratio affects higher concentrations of restricted pollutants like CO. Higher air excess ration affects higher electricity consumption. Economic aspects of biofuel boiler house performance optimization are assumed. Boiler house with optimized performance can save up to 2 percent of annual income.

## TURINYS

1	DARBO TIKSLAS IR UŽDAVINIAI.....	12
1.1	Darbo tikslas .....	12
1.2	Uždaviniai.....	12
2	LITERATŪROS APŽVALGA .....	13
2.1.1	Skaitinis degimo proceso modeliavimas .....	14
2.1.2	Pirminio antrinio ir tretinio orų įtaka biokuro degimo procesui .....	17
2.1.3	Oro tiekimo optimizavimo įtaka biokuro deginimo efektyvumui.....	19
3	EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI .....	22
3.1	Tyrimų objektas .....	22
3.2	Eksperimentinių tyrimų metodika .....	24
4	EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ REZULTATAI .....	30
4.1	Rezultatų kokybinis ir kiekybinis aprašymas bei analizė.....	30
5	ANALITINIS KATILINĖS VEIKIMO REŽIMŲ MODELIAVIMAS .....	36
5.1	Katilo n.v.k skaičiavimai .....	36
5.2	Susidarančių toksogenų kiekiai .....	44
5.3	Katilo lyginamosios elektros sąnaudos.....	46
5.4	DKE lyginamosios elektros sąnaudos .....	47
5.5	Ekonominis optimizavimo priemonių vertinimas .....	48
6	IŠVADOS.....	55
7	LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	56
8	PRIEDAI .....	59
8.1	Priedas Nr.1. Eksperimentinių tyrimų rezultatai .....	59
8.2	Priedas Nr. 2. Akredituotos laboratorijos kietųjų dalelių monitoringo rezultatai .....	60
8.3	Priedas Nr.3. Bloko šiluminė technologinė schema .....	61

## PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

2.1 pav. Deflektoriaus principinė schema ir montavimo schema katile [25].....	15
2.2 pav. Dūmų temperatūra katile prieš optimizavimą (kairėje) ir po optimizavimo (dešinėje) [25] .....	16
2.3 pav. Anglies monoksido (kairėje) ir azoto oksidų emisijos (dešinėje) priklausomai nuo degimo režimo tipo [23] .....	17
2.4 pav. Deguonies kiekio (kairėje) ir nuostolių su išeinančiais dūmais priklausomybė (dešinėje) nuo degimo režimų [23] .....	18
2.5 pav. Įtaisas liepsnos koncentravimui [38] .....	19
2.6 pav. Įtaisas liepsnos išskaidymui [38] .....	20
2.7 pav. CO, išeinančių dūmų temperatūros, šilumos nuostolių su išeinančiais dūmais, šilumos nuostolių dėl nepilno cheminio nesudegimo ir bendro katilo efektyvumo priklausomybė nuo deguonies kiekio išeinančiuose dūmuose skirtingais degimo režimais .....	21
3.1 pav. UAB „Danpower Baltic Biruliškių“ biokuro katilinės bendrasis vaizdas.....	23
3.2 pav. Pakuros įrenginių atvaizdavimas SCADA sistemoje: 1 – maitintuvų hidrostotelės, 2 – ardynų hidrostotelės, 3 – pakuros kuro bunkerio skleistuvas, 4 – maitintuvų hidrocilindrai, 5 – pirminio oro ventiliatorius, 6 – ardynų hidrocilindrai, 7 – antrinio oro ventiliatorius, 8 – antrinio oro sklendė, 9 – pirminio oro sklendės, 10 – tretinio oro sklendė. ....	24
3.3 pav. Madur dūmų analizatoriaus išorinis vaizdas ir pagrindiniai komponentai.....	27
3.4 pav. ZKM deguonies analizatoriaus principinė signalų schema .....	28
3.5 pav. Optimaliausio oro pertekliaus koeficiento nustatymas dujiniam kurui [31] .....	29
3.6 pav. DKE purkštukų išpurškimo kampas .....	29
4.1 pav. Anglies monoksido priklausomybė nuo deguonies kiekio išeinančiuose dūmuose .....	31
4.2 pav. Azoto oksidų priklausomybė nuo deguonies kiekio išeinančiuose dūmuose.....	31
4.3 pav. Išeinančių dūmų priklausomybė nuo slėgio purkštukuose .....	34
4.4 pav. Kondensato siurblių elektros suvartojimo priklausomybė nuo slėgio purkštukuose .....	34
5.1 pav. Dūmsiurbio HDF LBP 5/44 M darbo kreivė.....	42
5.2 pav. Šilumos nuostolių su išeinančiais dūmais $q_2$ priklausomybė nuo oro pertekliaus koeficiento .....	43
5.3 pav. Dūmsiurbio elektros suvartojimo priklausomybė nuo oro pertekliaus koeficiento.....	44
5.4 pav. Vidutinė biokuro kaina Lietuvoje 2016 sausio – 2017 sausio mėn.....	49

## LENTELIŲ SĄRAŠAS

2.1 lentelė. Skaitinio modeliavimo ir eksperimentinių tyrimų rezultatų palyginimas .....	14
2.2 lentelė. Skaitinio modeliavimo ir eksperimentinių tyrimų rezultatų palyginimas .....	16
3.1 lentelė. Katilo pakuros (B1BP01) techniniai duomenys .....	23
3.2 lentelė. Kurą deginančių įrenginių išmetamų teršalų ribinės vertės .....	25
3.3 lentelė. DKE purkštukų specifikacija .....	25
3.4 lentelė. Tyrimo metu naudotų matavimo prietaisų specifikacija .....	26
4.1 lentelė. Apibendrinti pirmo tyrimo etapo duomenys .....	30
4.2 lentelė. Tyrimo metu sunaudoto kuro duomenys .....	32
4.3 lentelė. Iš DKE išeinančių dūmų temperatūros tyrimo apibendrinti rezultatai .....	33
4.4 lentelė. Katilinėje nuolat sekamų parametrų suvestinė .....	35
5.1 lentelė. Kuro elementinės sudėties skaičiavimų rezultatai .....	37
5.2 lentelė. Dujų specifinės šilumos skaičiavimų rezultatai .....	39
5.3 lentelė. Nuostolių kitimo ribos .....	40
5.4 lentelė. Slėgio nuostolių dūmų trakte kitimo ribos .....	42
5.5 lentelė. Suvestiniai katilo naudingumo koeficiento skaičiavimo rezultatai .....	43
5.6 lentelė. Toksogenų susidarymo teorinių ir eksperimentinių duomenų palyginimo lentelė.....	46
5.7 lentelė. Optimistinis scenarijus .....	51
5.8 lentelė. Bazinis scenarijus .....	52
5.9 lentelė. Pesimistinis scenarijus .....	53
5.10 lentelė. Šilumos gamybos savikaina esant skirtingiems scenarijams.....	54



## SANTRUMPOS IR ŽYMĖJIMAI

AEI – atsinaujinantys energijos ištekliai

CFD (angl. computational fluid design) – skaitinis fluidų sistemų modeliavimas

CŠT – centralizuotas šilumos tiekimas

CVP – centrinis valdymo pultas

DKE – dūmų kondensacinis ekonomizeris

DLK – didžiausia leistina koncentracija

ESP (angl. electrostatic precipitator) – elektrostatinis filtras

KE – AB „Kauno Energija“

NŠG – nepriklausomas šilumos gamintojas

PPM (angl. parts per million) – masinė viena milijonoji dalis

SCADA (angl. supervisory control and data acquisition) – integruota valdymo ir duomenų rinkimo programa

SP (angl. – set point) – regulatoriaus užduotis

Žymėjimai:

A, W – išorinis kuro balastas: mineralinės priemaišos, drėgmė, %

B – kuro sąnaudos, kg/s ; m<sup>3</sup>/s

C, H, S – degioji kuro dalis: anglis, vandenilis, siera, %

H – entalpija, J/kg

I – investicijos, Eur

O, N – vidinis kuro balastas: deguonis, azotas, %

P, L, H – matmenys: plotis, ilgis, aukštis, m

Q – kuro šilumingumas, J

T – termodinaminė temperatūra, K

U – lyginamosios elektros sąnaudos kWh/ MWh

$c_p$  – savitoji šiluma kJ/(kg·K)

n.s. – normalios sąlygos  $p = 101325$  Pa,  $t = 0^\circ\text{C}$  ( $T = 273,15$  K)

n.v.k. – naudingo veiksmo koeficientas

q – šilumos nuostoliai, %

t – laikas, s; temperatūra, °C

t.n.e – tona naftos ekvivalento, sutartinio kuro žymėjimas (1 t.n.e = 11,63 MWh)

$\alpha$  – oro pertekliaus koeficientas

$\eta$  – naudingumo koeficientas

$\rho$  – tankis, kg/m<sup>3</sup>

Viršutiniai indeksai:

mas – masinis parametras

n – naudojamosios kuro masės parametras

n.s – normalios sąlygos

neopt – neoptimizuotas parametras

opt – optimizuotas parametras

r.s – realios sąlygos

s – sausosios kuro masės parametras

t – teorinis dydis

tūr – tūrinis parametras

Apatiniai indeksai:

d – degimo produktų parametras

DKE – dūmų kondensacinio ekonomizerio parametras

H<sub>2</sub>O, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> – atitinkamai: vandens (jo garų), azoto oksidų, sieros oksidų, smalkių, anglies dioksido, dujinio azoto, deguonies parametras

kat – katilo parametras

o – oro parametras

pel – pelenų parametras

sd – sausų degimo produktų (dūmų) parametras

## IVADAS

2011 m. gegužės 12 dieną Lietuvos Respublikos Seimas priėmė Lietuvos Respublikos atsinaujinančių išteklių energetikos įstatymą. Šis teisės aktas sudarė palankias sąlygas pradėti vystyti atsinaujinančios energetikos projektus. Didelė dalis šių projektų yra susiję su biokuru ir centralizuotu šilumos tiekimu. Nauji nepriklausomi šilumos gamintojai savo arba skolintomis lėšomis pradėjo statyti biokuru kūrenamas vandens šildymo katilines ir kogeneracines elektrines. 2016 metų rugsėjo mėnesį buvo įsteigta Lietuvos nepriklausomų šilumos gamintojų asociacija, kuri vienija asmenis, tiesiogiai susijusius su šilumos gamyba iš atsinaujinančių energijos išteklių ir jos tiekimu į centralizuotus šilumos tinklus. Šiuo metu ši asociacija apima daugiau kaip pusę visų Lietuvos NŠG, o jos narių valdomų įrenginių šiluminė galia viršija 300 MW. Didelį progresą padarė ir šalies šilumos tiekimo įmonės, kuriuos investuodamos į savo biokurą naudojančius šilumos gamybos įrenginius tapo atsvara NŠG.

Aptarti veiksniai lėmė, kad 2016 metais Lietuvos CŠT sektoriuje iš biomasės buvo pagaminta daugiau kaip 64 proc. šilumos, o iš gamtinių dujų – 33,4 proc. tuo tarpu kai iki 2014 m. gamtinės dujos buvo pagrindinis kuras CŠT šilumos gamybos struktūroje. Perėjimas prie pigaus, daugiausia vietinės kilmės atsinaujinančio biokuro ne tik mažina šilumos kainas, bet ir sukuria didelę naudą šalies ekonomikai, didina energetinį saugumą, padeda spręsti klimato kaitos problemas.

Tačiau ženkliai pasikeitus kuro balansui CŠT sektoriuje, atsirado problemų, su kuriomis iki tol nebuvo susiduriama deginant dujas. Dėl netolygios ir nevienalytės biokuro sudėties yra sunkiau technologiškai valdyti šilumos gamybos procesą. Kuro apskaita tapo sudėtinga, biokurą deginantys įrenginiai dažnai nepasiekia deklaruoto efektyvumo, sunku išlaikyti režiminėje kortelėje nurodytus parametrus. Šias problemas iš dalies lemia naujų, neišbandytų technologijų diegimas, taip pat nepakankama eksploatuojančio personalo patirtis.

Labai svarbu yra nustatyti kokią neigiamą ekonominę ir ekologinę įtaką gali padaryti neoptimaliai veikianti biokuro katilinė, išsiaiškinti pagrindines problemas, kylančias eksploatuojant tokį objektą ir įvertinti bei išanalizuoti kaip galima optimizuoti biokuro katilinės veikimo režimus ir kokią įtaką bendram naudingumui jie gali daryti.

# **1 DARBO TIKSLAS IR UŽDAVINIAI**

## **1.1 Darbo tikslas**

Baigiamojo projekto tikslas – nustatyti optimalius biokuro katilinės veikimo režimų parametrus ir jų įtaką šilumos energijos generavimo efektyvumui, ekonominiams ir ekologiniams rodikliams.

## **1.2 Uždaviniai**

Baigiamojo projekto tikslui pasiekti yra suformuluoti šie uždaviniai:

1. Apžvelgti užsienio tyrėjų pasiekimus optimizuojant biokuro deginimo įrenginius;
2. Išanalizuoti pasirinktos biokuro katilinės veikimo režimus ir jų optimizavimo galimybes;
3. Parinkti metodiką ir atlikti eksperimentinį biokuro katilinės veikimo režimų tyrimą;
4. Pasitelkiant analitinio skaičiavimo metodus sumodeliuoti skirtingų šilumos generavimo įrenginių veikimo režimų įtaką bendram objekto efektyvumui ir palyginti juos su eksperimento duomenimis;
5. Nustatyti optimaliausią katilinės darbo režimą, įvertinti atskirų darbo parametrų įtaką bendram katilinės efektyvumui, pateikti pasiūlymus jo didinimui;
6. Įvertinti optimizuotų katilinės veikimo režimų ekonominę naudą.

## 2 LITERATŪROS APŽVALGA

Užsienio mokslinėje literatūroje yra pateikiama nemažai tyrimų, apimančių biokuro degimo proceso problematiką, mažų buitinių vandens šildymo katilų veikimo optimizavimą. Tokie katilai naudojami šildyti individualiems namams arba nedidelėms namų grupėms. Jie yra netobuli savo konstrukcija, prastai aprūpinti reikiamomis matavimo priemonėmis. Priešingai yra su dideliais pramoniniais katilais, kurie yra pritaikyti deginti įvairų biokurą nuo pjuvenų iki miško kirtimo atliekų. Tokiuose katiluose yra sumontuota daug matavimo prietaisų, kurie leidžia sklandžiai stebėti degimo procesą. Jų konstrukciniai sprendimai ir valdymo ypatybės suteikia daug daugiau galimybių reguliuoti šilumos gamybos režimus, kuriuos galima daug lengviau ir paprasčiau optimizuoti. Pramoniniuose katiluose įdiegtos SCADA sistemos leidžia išanalizuoti vykstantį procesą ir įvertinti išskylančias problemas.

Vis dėlto svarbu atkreipti dėmesį, kad tyrimo metodai, degimo kontrolė ir procesų optimizavimas mažuose ir dideliuose biokuro deginimo įrenginiuose remiasi tais pačiais fundamentaliais principais. Todėl nors maži buitiniai ir dideli pramoniniai vandens šildymo katilai ženkliai skiriasi, pagrindiniai principai, pagal kuriuos galima įvertinti, analizuoti ir optimizuoti šių įrenginių veikimą yra tie patys.

Toliau apžvelgiami skirtingi būdai, kaip galima organizuoti biokuro katilinių veikimo režimų tyrimus. Tai galima atlikti pasitelkti skaitinį modeliavimą, panaudojant specialius programinės įrangos paketus. Toks sprendimas leidžia modeliuoti skirtingus veikimo režimus ir įvertinti jų įtaką bendram procesui, tačiau reikėtų pažymėti, kad tokios analizės kokybė tiesiogiai priklauso nuo skaitinio modelio tikslumo. Galima vykdyti dirbančių įrenginių veikimo analizę, pasitelkiant papildomus matavimo prietaisus, leidžiančius praplėsti katilinėje sumontuotų matavimo prietaisų rodmenis, taip įvertinant skirtingų parametrų įtaką bendram katilinės darbo režimui. Tačiau reikia įvertinti galimas paklaidas dėl matavimo prietaisų ar pasirinktos matavimo metodikos netikslumų. Analizuojant katilinėje įdiegtos SCADA sistemos (jeigu tokia yra) duomenis, galima ieškoti bendrų tendencijų ir priklausomybių, tačiau reikia įvertinti paklaidas dėl netinkamo duomenų nuskaitymo ar neteisingo duomenų interpretavimo.

Kiekvienas aptartas metodas turi savo teigiamus ir neigiamus aspektus, kuriuos žinant, galima neutralizuoti jų poveikį arba taikyti kompleksinius sprendimus siekiant geriausių ir patikimiausių rezultatų.

### 2.1.1 Skaitinis degimo proceso modeliavimas

Viena iš galimybių įvertinti degimo procesą – jo skaitinis modeliavimas. Gautus rezultatus galima panaudoti proceso optimizavimui, didžiausių nuostolių mažinimui, degimo efektyvinimui. Tam pasitelkiamos įvairios CFD skaičiuojamosios fluidų programos. Šios programos gali būti naudojamos takiųjų medžiagų hidrodinamikos, šilumos mainų, fazinių virsmų bei degimo procesams, sudėtingose dvimatėse ar trimatėse sistemose, modeliuoti. Labiausiai pasaulyje paplitusi fluidų tekėjimo modeliavimo programa yra ANSYS Fluent. Panaudojus minėtą programą buvo modeliuojamas degimo procesas 32 kW vandens šildymo katile [25]. Paprastai tokiuose mažuose katiluose degimas vyksta trimis etapais: įkrovimo, stacionaraus degimo ir vėsimo. Pagrindinis autorių dėmesys aprašomame darbe buvo skirtas sukurti stacionaraus degimo skaitinį modelį, kuriuo vadovaujantis būtų galima prognozuoti katile vystančius parametrų pokyčius, darant prielaidą, kad kuro ir degimo produktų kiekiai yra pastovūs. Norint patikrinti skaičiuojamojo modelio tikslumą, buvo atliekami modeliuojamo režimo realūs bandymai ir pagrindinių parametrų tyrimai, naudojant mobilų dūmų analizatorių. Vienintelis aprašomo darbo tyrimo trūkumas buvo tai, kad nešiojamas dūmų analizatorius nebuvo prijungtas prie duomenų nuskaitymo, rinkimo ir saugojimo programos, todėl pagrindiniai katilo parametrai buvo fiksuojami kas 5 min.

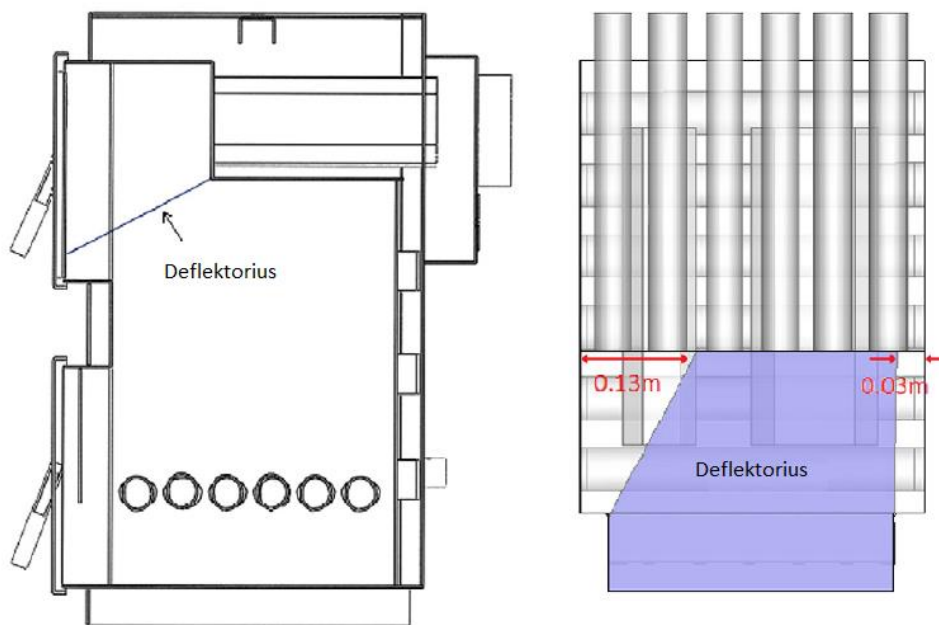
Skaitinio modeliavimo rezultatus lyginant su eksperimentiniais rezultatais, buvo gautos paklaidos iki 1% O<sub>2</sub> ir CO<sub>2</sub> koncentracijoms, 20% išeinančių dūmų temperatūrai, didesnis neatitikimas buvo CO koncentracijos – jos skaičiavimo duomenis galima laikyti nepatikimais. Visi tirti ir gauti duomenys pateikti 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Skaitinio modeliavimo ir eksperimentinių tyrimų rezultatų palyginimas

Išeinančių dūmų parametrai	Skaitinio modeliavimo rezultatai	Eksperimentinių tyrimų rezultatai
Temperatūra, °C	347	273
O <sub>2</sub> koncentracija, %	12,38	12,35
CO <sub>2</sub> koncentracija, %	8,11	8,33
CO koncentracija, ppm	755	2195

Gavus pakankamai tikslius modeliavimo rezultatus buvo imtasi antros uždavinio dalies – katilo optimizavimo. Kadangi apibendrinus tiek eksperimentinius, tiek skaitinius rezultatus buvo gauta didelė CO koncentracija išeinančiuose dūmuose, buvo ieškoma galimybių kaip ją sumažinti patiriant kuo mažesnes sąnaudas. Remiantis šaltinio [31] duomenimis yra žinoma, kad didelį CO kiekį išeinančiuose dūmuose gali sukelti per didelis arba per mažas  $O_2$  kiekis dūmuose (šiuo atveju atitinka normos ribas), per žema temperatūra kūrykloje (pagal 2.2 pav. matome, kad temperatūra siekia  $900\text{ }^\circ\text{C}$  t.y. optimalią temperatūrą degimui) bei per trumpos dujų buvimas intensyviausio degimo zonoje (tyrėjai nustatė, kad tai yra pagrindinė priežastis dėl kurios gali padidėjęs CO kiekis dūmuose (rekomenduojamas bent 0,5 s laiko tarpas, per kurį dūmai turi išbūti aukštos temperatūros zonoje).

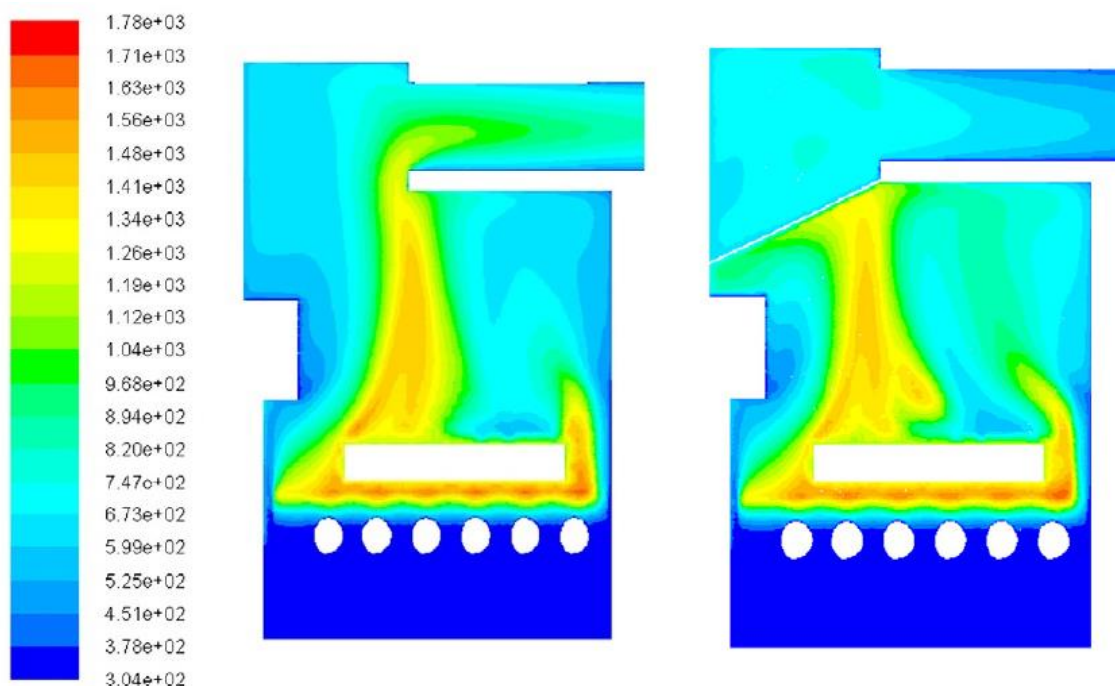
Norint pašalinti šią priežastį, buvo suprojektuotas dūmų deflektorius, kuris sulėtintų dūmų srautą ir jie ilgiau išbūtų kūrykloje. Projektuojant deflektorių, buvo stengiamasi pasiekti, kad investiciniai kaštai būtų nedideli, o tuo pat metu deflektorius nesukeltų kitų technologinių problemų, tokių kaip per maža trauka nesant dūmsiurbui ar per mažas dūmų pratekėjimas esant galimybei visiškai užsikšti dūmų pratekėjimo kanalui. Rezultatas – nerūdijančio plieno trapecijos formos plokštė, pritvirtinta prieš dūmų įtekėjimą į dūmų vamzdžius. Deflektoriaus principinė montavimo schema pateikta 2.1 pav. Ši schema yra paprastai įgyvendinama, nereikalauja didelių investicijų, tokį patobulinimą lengva atlikti jau veikiantiems katilams.



2.1 pav. Deflektoriaus principinė schema ir montavimo schema katile [25]

Pagal suprojektuotą deflektorių buvo pakeistas ir ANSYS tyrimo modelis. Skaitinio modelio tinklėlis ir visi kiti pradiniai įvesties parametrai buvo palikti tokie patys. Sumodeliavimus stacionarųjį degimo procesą pastebėti dideli pokyčiai. Gauti rezultatai pateikti 2.2 pav. ir 2.2 lentelėje. Optimizuotame katile su deflektoriumi, galime pastebėti labai ryškų degimo produktų

temperatūros sumažėjimą į kaminą ir tuo pat metu padidėjusią visos pakuros temperatūrą – šiuo atveju tai yra naudinga, kadangi didesnė pakuros temperatūra papildomai lemia sklandesnį degimo procesą ir mažesnę CO kiekį. Dūmų srautui ilgiau kontaktuojant su katilo šildymo paviršiumi pagerėja šilumos mainai, padidėja paties katilo n.v.k.



2.2 pav. Dūmų temperatūra katile prieš optimizavimą (kairėje) ir po optimizavimo (dešinėje) [25]

2.2 lentelė. Skaitinio modeliavimo ir eksperimentinių tyrimų rezultatų palyginimas

Išeinančių dūmų parametrai	Skaitinio modeliavimo rezultatai neoptimizavus katilo	Skaitinio modeliavimo rezultatai optimizavus katilą
Temperatūra, °C	347	283
O <sub>2</sub> koncentracija, %	12,38	12,46
CO <sub>2</sub> koncentracija, %	8,11	8,08
CO koncentracija, ppm	755	417

Duomenys pateikiami 2.2 lentelėje rodo išeinančių dūmų parametų pasikeitimą, kuris pasiekiamas naudojant dūmų deflektorių. Nors eksperimentinių tyrimų CO kiekis ženkliai skyrėsi nuo modeliavimo rezultatų, vis dėlto galime daryti prielaidą, kad bendros mažėjimo tendencijos turėtų būti pakankamai ryškios ir realiuose eksperimentuose su įmontuotu dūmų deflektoriumi.

Šaltinyje [25] aprašomi tyrimai apėmė mažos galios buitinių vandens šildymo katilą, tačiau šiuos tyrimo metodus galima pritaikyti ir labai dideliems ir galingiems pramoniniams garo ir vandens šildymo katilams. Galima teigti, kad skaitinio modeliavimo metodai yra tinkama priemonė energetinių įrenginių optimizavimui, ypač atsižvelgiant į tai, kad eksperimentiniai



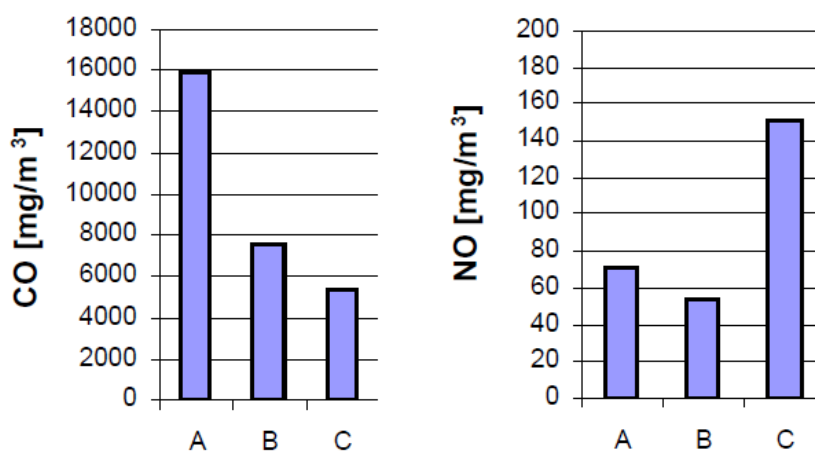
duomenys ir tyrimų rezultatai patenka į toleruojamų paklaidų ribas, o net ir esant didelėms paklaidoms, galima pastebėti mažėjimo arba didėjimo tendencijas.

Šiame tyrime kaip optimizavimo įrankis buvo parinktas dūmų deflektorius, tačiau didelėse ir galingose ardyninėse pakurose yra daug platesnė parametų reguliavimo galimybė. Tokiuose įrenginiuose optimizavimas gali vykti visiškai nepakeičiant pačios pakuros konstrukcijos, o tik keičiant įvairius parametrus ir oro/ kuro/ dūmų srautų santykį.

### 2.1.2 Pirminio antrinio ir tretinio orų įtaka biokuro degimo procesui

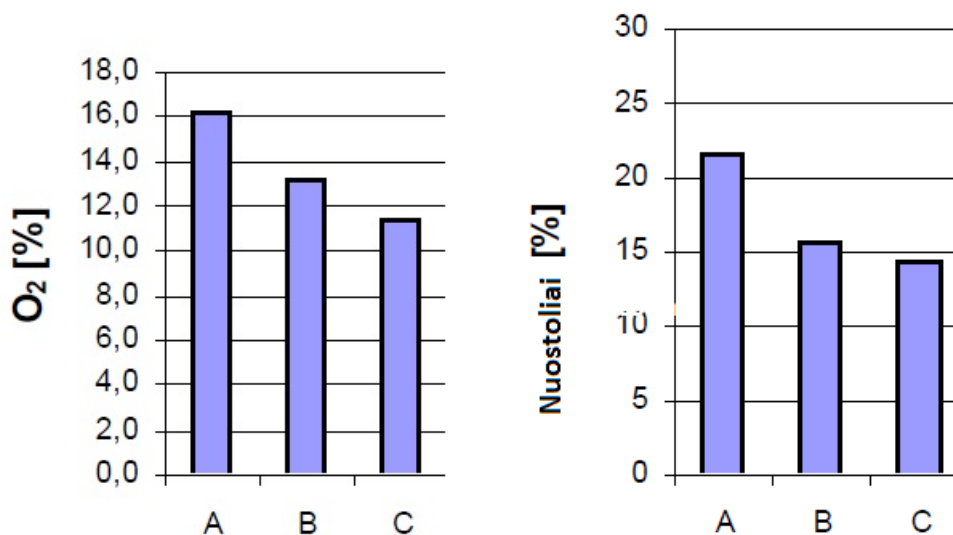
Ankstesniame skyriuje buvo aptartas skaitinių metodų panaudojimas korektiškam degimo procesų analizavimui ir problemų sprendimui. Šiame skyriuje aprašomas tyrimas, įvertinantis tiesioginį tam tikrų parametų poveikį degimo procesui. Tyrime [23] eksperimentiškai buvo išbandyti keli granules deginančio katilo VARIMATIK VM 45 degimo režimai, naudojant skirtingus oro padavimo variantus. Pirmiausia buvo naudojamas tik pirminis oras, pučiamas po ardynu, antruoju variantu buvo naudojamas pirminis oras ir antrinis oras virš kuro sluoksnio, trečiuoju variantu papildomai dar buvo tiekiamas tretinis oras – lakiųjų medžiagų sudeginimui. Šie skirtingi režimai apibūdinti atitinkamai A, B ir C raidėmis, kurių tyrimo rezultatai pateikti 2.3 ir 2.4 pav.

2.3 paveiksle matoma, kad antrinio oro panaudojimas kelis kartus sumažina anglies monoksido emisijas, o panaudojus tretinį orą – jos dar sumažėja. Papildomo oro tiekimas pagerina degimo proceso sąlygas, lieka mažiau nesudegusių dujų, sumažėja nuostoliai dėl cheminio nesudegimo. Taip pat galima teigti, kad panaudojus tretinį orą, padidėja azoto oksidų emisijos – tai paaiškinama išaugusia liepsnos temperatūra, dėl kurios vyksta intensyvesnė azoto oksidacija. Tai reiškia, kad tretinis oras sukelia žymų liepsnos temperatūros padidėjimą dėl netinkamai parinktos tiekimo vietos.



2.3 pav. Anglies monoksido (kairėje) ir azoto oksidų emisijos (dešinėje) priklausomai nuo degimo režimo tipo [23]

2.4 paveiksle matoma, kad panaudojant kelias oro tiekimo zonas, deguonies kiekis išeinančiuose dūmuose mažėja – tai galima paaiškinti tolygesniu oro pasiskirstymu ir geresniu jo susimaišymu su lakiisiais komponentais. Taip pat galima įžvelgti ir tolygų nuostolių su išeinančiais dūmais mažėjimą – papildomai naudojant antrinę ir tretinę orą nuostolius galima sumažinti daugiau nei ketvirtadaliu. Toks degimo proceso optimizavimas yra santykinai lengvai įgyvendinama įrenginio energetinio efektyvumo didinimo priemonė.



2.4. pav. Deguonies kiekio (kairėje) ir nuostolių su išeinančiais dūmais priklausomybė (dešinėje) nuo degimo režimų [23]

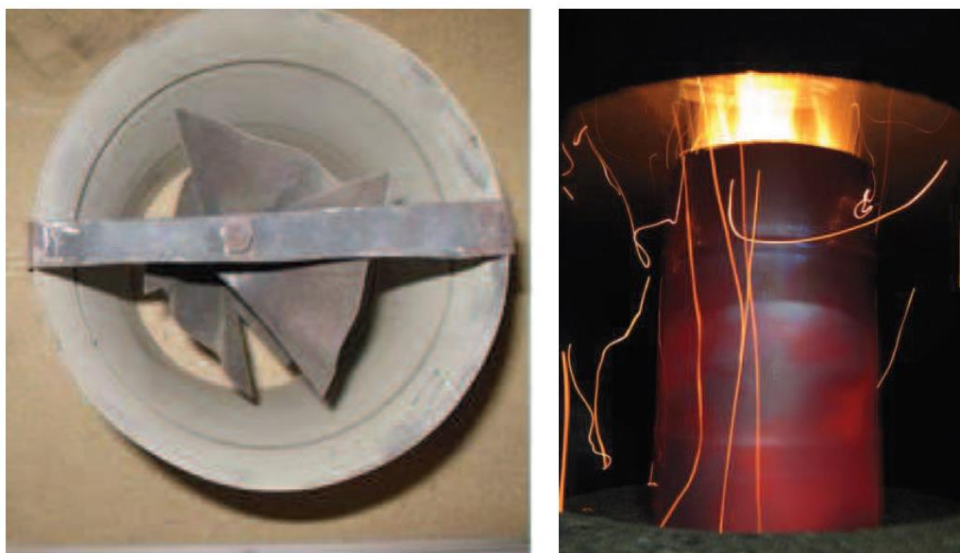
Iš rezultatų analizės akivaizdžiai matoma, kad papildomas oro tiekimas ženkliai pagerina esminius katilo darbo parametrus, kurie apima ne tik efektyvumą, bet ir aplinkos apsaugą. Verta paminėti, kad oras turi būti tiekiamas, atsižvelgiant į biokuro degimo etapus, būtent į tam tikras jo zonas. Paskirstymas turi atitikti reikiamą deguonies kiekį atitinkamai zonai.

Kadangi nedideli buitiniai kuro deginimo įrenginiai neturi pakopinio degimo, tokios sistemos įrengimas ženkliai pagerina visus pagrindinius katilo veikimą apibūdinančius parametrus. Tuo tarpu dideli pramoniniai katilai visuomet turi suskirstytas degimo zonas, todėl jų papildomai įrengti nereikia. Šis tyrimas vaizdžiai parodo, kokią įtaką gali padaryti netinkamas oro paskirstymas tarp skirtingų oro tiekimo zonų. Todėl vienas iš biokuro katilinės veikimo režimų optimizavimo uždavinių – tinkamas degimui skirtų oro zonų paskirstymas. Skirstant degimui skirtą orą į skirtingas tiekimo zonas, oro pertekliaus koeficientas kaip ir deguonies kiekis išeinančiuose dūmuose mažėjo. Tačiau šiuo parametru negalima pasikliauti kaip nusakančiu tinkamą oro pasiskirstymą. Tuo tarpu galima atsižvelgti į CO ir NO<sub>x</sub> mažėjimą, kadangi būtent šie parametrai mažėjo, optimizuojant oro tiekimą į katilą.

### 2.1.3 Oro tiekimo optimizavimo įtaka biokuro deginimo efektyvumui

Dar vienas būdas siekiant optimizuoti degimo procesus pakuroje – efektyvus kuro ir oro sumaišymas. Tyrime [38] buvo atliekami eksperimentai su nedidelės galios (25 kW) medžio granulių vandens šildymo katilu. Buvo matuojami visi pagrindiniai katilo parametrai 3 atvejais: standartiniu, sukongravus liepsną ir išsklaidžius liepsną. Paskutiniai du atvejai buvo naudojami pagerinti kuro ir oro maišymąsi (šiuo atveju oro ir lakiųjų medienos elementų). Siekiant sukurti suplanuotus procesus katile, buvo sukonstruoti specialūs įrenginiai – liepsnos koncentradorius ir liepsnos skleistuvai – jie pavaizduoti 2.5 ir 2.6 paveikslėliuose.

2.5 paveikslėlyje pavaizduotas liepsnos koncentradorius – plieninis cilindras su kreipiančiosiomis, didesniai srauto maišymui. Taip pat buvo galima naudoti tik srauto koncentratorių, tačiau tiriamasis katilas buvo su apatinio padavimo degikliu, todėl liepsna buvo neišsiplėtusi. Dėl šios priežasties, be kreipiančiųjų cilindras nebūtų daręs didelės įtakos.



2.5 pav. Įtaisas liepsnos koncentravimui [38]

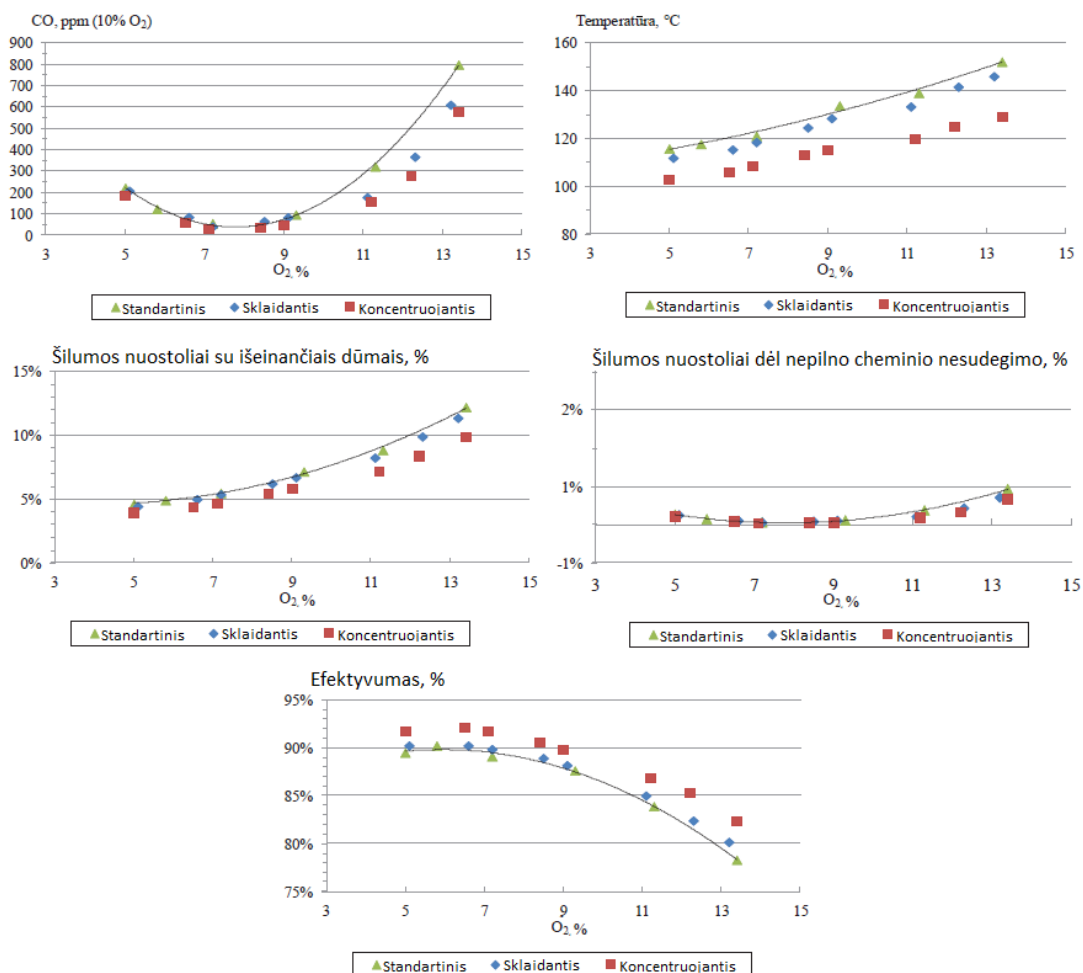
2.6 paveikslėlyje pavaizduotas liepsnos skleistuvai yra sudarytas iš daugelio tuščiaidurių vamzdelių, kuriais tekantis dūmų ir liepsnos srautas sklaidosi ir pasiskirsto po visą degimo tūrį. Taip pat galima keisti šio įrenginio atstumą nuo liepsnos centro vertikalia kryptimi.



2.6 pav. Įtaisas liepsnos išskaidymui [38]

Atlikus eksperimentus visais trimis degimo atvejais buvo pastebėta, kad padidinus deguonies koncentraciją išeinančiuose dūmuose nuo 5 % iki 13 %, išeinančių dūmų temperatūra padidėjo nuo 125 iki 170 °C. Šį reiškinį galima paaiškinti srauto greičio padidėjimu – jis pakito nuo 0,7 iki 1,4 m/s, todėl sumažėjo laiko tarpas per kurį dūmų srautas turėtų atiduoti savo šilumą katilo sienelėms t.y. suprastėjo šilumos atidavimas. Taip pat didėjant deguonies kiekiui dūmuose, staiga pradėjo didėti CO koncentracija. CO didėjimą lėmė nepilnas ir neviseiškas srautų susimaišymas – per greitas srauto ištekėjimas iš aukštos temperatūros zonos.

Palyginus standartinį degimo režimą su koncentruotos liepsnos ir išskleistos liepsnos degimo metodais, matome pastarųjų pranašumą – visais atvejais jie parodė geresnius rezultatus, esant tiems patiems parametrams. Tarpusavyje lyginant abu šiuos optimizavimo metodus – geresnius rezultatus parodė liepsnos koncentradorius. Jame įrengtos srauto kreipiančiosios turi didelę įtaką srauto susimaišymui ir tolygesniam jo sudeginimui. CO išmetimai buvo šiek tiek mažesni naudojant liepsnos koncentratorių, tačiau didžiausias skirtumas tarp šių dviejų tipų optimizavimo priemonių, išryškėjo išeinančių dūmų temperatūroje: koncentruojančiame įrenginyje ji vidutiniškai net 10 °C mažesnė, kas sumažina nuostolius su išeinančiais dūmais ir padidina katilo efektyvumą. Visos aprašytos priklausomybės pateikiamos 2.7 paveikslėlyje.



2.7 pav. CO, išeinančių dūmų temperatūros, šilumos nuostolių su išeinančiais dūmais, šilumos nuostolių dėl nepilno cheminio nesudegimo ir bendro katilo efektyvumo priklausomybė nuo deguonies kiekio išeinančiuose dūmuose skirtingais degimo režimais

Akivaizdu, kad tinkamas oro srautų paskirstymas ir efektyvus jų organizavimas turi didelę įtaką viso deginimo įrenginio darbui. Geriausi rezultatai pasiekti, naudojant liepsnos koncentravimą su papildomu srauto maišymu.

Reikia pažymėti, kad nagrinėjamame tyrime nebuvo fiksuojamos  $NO_x$  emisijos, todėl labai sunku įvertinti, kokią įtaką joms darė skirtingi oro tiekimo būdai. Remiantis [31] mažėjant CO koncentracijai,  $NO_x$  koncentracija turėtų didėti, tačiau neatlikus realių eksperimentų labai sunku nustatyti kiekybinį jų padidėjimą, todėl galima remtis tik tiksliai neapibrėžtomis prielaidomis.

### **3 EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI**

#### **3.1 Tyrimų objektas**

Biokuro katilinės veikimo režimų tyrimams pasirinkta nepriklausomo šilumos gamintojo UAB „Danpower Baltic Biruliškių“ biokuro katilinė esanti Kaune, Biruliškių gatvėje 18A. Katilinė sudaryta iš dviejų identiškų blokų, su atskirais šilumos apskaitos prietaisais, atskirais šilumos gamybos, kuro ir oro tiekimo, dūmų valymo ir šalinimo įrenginiais. Abu blokai yra vienas nuo kito nepriklausomi ir gali dirbti skirtingais režimais (taip pat ir stovėti rezerve). Tai leidžia šiam NŠG veikti kaip dviem nepriklausomoms katilinėms, esančioms vienoje teritorijoje. Šiame darbe tiriamasis objektas – vienas šilumos energijos gamybos blokas su jame vykstančiu degimo procesu.

Šilumos energijos gamybai yra naudojamas biokuru kūrenamas agregatas, kurį sudaro: biokuro pakura su kuro padavimo, pelenų šalinimo ir kitomis pagalbinėmis sistemomis bei 19,5 MW nominalios šiluminės galios, horizontalių dūmų vamzdžių vandens šildymo katilas. Pakura pritaikyta medienos atliekų deginimui pasvirusiu ardynu, kurį sudaro judinami ardeliai. Su pakura taip pat komplektuojami pirminio bei antrinio/tretinio oro padavimo ventiliatoriai, dūmų recirkuliacijos siurblys bei dūmų siurblys (dūmsiurbis). Iš katilo išeinantys dūmai filtruojami ESP. Šilumos tinklų vandeniui šildyti papildomai (išnaudojant aukštos temperatūros išmetamų degimo produktų šilumą) naudojamas 4,75 MW galios DKE.

Kiekviename bloke, nepriklausomai nuo kito, vandens cirkuliaciją per katilą užtikrina trys katilo cirkuliaciniai siurbliai. Katilas taip pat turi recirkuliacinį siurblį, skirtą padidinti į katilą tiekiamo termofikacinio vandens temperatūrą. Katile pagaminta šiluma per tris plokštelines šilumokaičius tinklo cirkuliaciniais siurbliais (jų iš viso yra keturi) yra tiekama į Kauno miesto šilumos tinklus. Vandens papildymui į katilų cirkuliacijos kontūrą – skirti katilų kontūro papildymo siurbliai. Yra numatyti du avariniai siurbliai (vienas iš vidinio katilo cirkuliacinio kontūro, kitas iš išorinio tinklų kontūro), kurie dingus elektros energijos tiekimui automatiškai įjungiami nuo rezervinio dyzelinio elektros generatoriaus. Vieno bloko šiluminė schema pateikiama 3 priede.

Visoje katilinėje skirtingose dūmtakių vietose yra įrengtos dūmų paėmimo angos, laikantis [19] reikalavimų. Šie reikalavimai apima minimalius atstumus, kurie turi skirti dūmų paėmimo angą ir vietines kliūtis bei dūmtakio alkūnes ir susiaurėjimus, siekiant išvengti dūmų srauto pulsacijų ir netolygumų, kurie galėtų lemti tyrimų rezultatų tikslumą. Taip pat šalia dūmų paėmimų angų yra sumontuoti stacionarūs dūmų analizatoriai, kurie nuolatos fiksuoja dūmuose esančių dujų koncentraciją, taip užtikrinant dvigubą parametrų kontrolę ir patikimumą.

Katilinės teritorijoje yra šie statiniai ir įrenginiai: automobilinės svarstyklės, skirtos pasverti atvežtą biokurą, svėrėjo pastatas, bendra lauko kuro aikštelė, kurios pilnai užpildytos kuru užtenka 7 dienoms, dirbant abiem blokams pilnu apkrovimu, ir bendras nuo atmosferos poveikių apsaugotas kuro sandėlis, kuriame yra sumontuoti kuro žertuvai, įrengti atskirai kiekvienam blokui ir kurio užtenka 1 paros laikotarpiui, katilinei dirbant pilnu apkrovimu. Visa katilinės teritorija yra aptverta ir stebima vaizdo kameromis, kurios yra atvaizduotos centriniame valdymo pulte. Bendras katilinės vaizdas pateiktas 3.1 paveiksle.



3.1 pav. UAB „Danpower Baltic Biruliškių“ biokuro katilinės bendrasis vaizdas

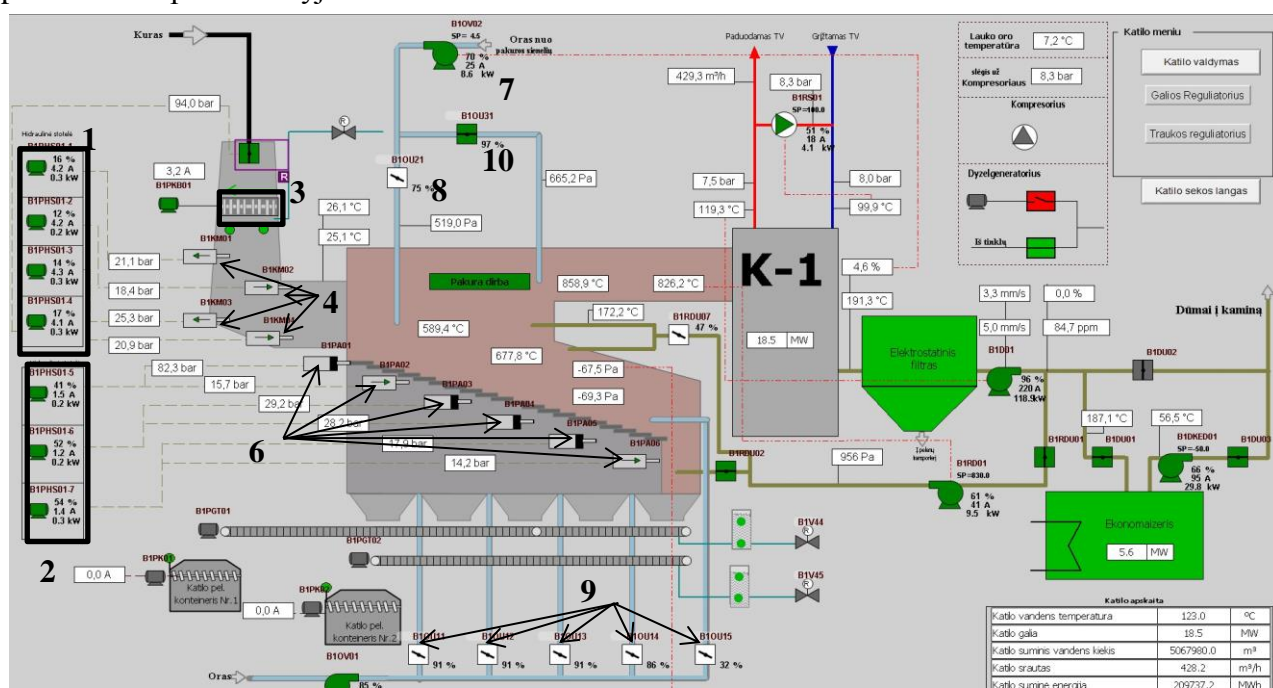
Pagrindinis šilumos energijos gamybos įrenginys – 24 MW šiluminės galios pakura. Ji yra pagaminta ir sumontuota AB „Axis Industries“ naudojantis Saxlund International Ltd patentu. Pakura yra skirta deginti įvairios kilmės biokuro atliekas, turi daug reguliavimo galimybių, todėl yra puiki priemonė, norint įvertinti kokio dydžio įtaką katilinėje vykstantiems procesams gali turėti netinkamai organizuojamas degimas. Pagrindiniai pakuros parametrai pateikiami 3.1 lentelėje:

3.1 lentelė. Katilo pakuros (B1BP01) techniniai duomenys [27]

Eil. Nr.	Pavadinimas	Reikšmė
1.	Pakuros tipas	Ardyninė
2.	Nominali šiluminė galia, MW	24
3.	Minimalus naudojamo kuro apatinis šilumingumas, kcal/kg	1960
4.	Degimo dujų temperatūra pakuroje, °C	800 – 900
5.	Degimo produktų, išėinančių, iš pakuros, temperatūra, °C	900 – 1100
6.	Dūmų išretėjimas pakuroje, Pa	60 – 100
7.	Gabaritiniai pakuros matm. (ilgis x plotis x aukštis)	13720 x 3320 x 5844
8.	Masė, kg (tuščio – pilno)	50 000 – 90 000

Pakura turi platų parametų reguliavimo diapazoną, todėl tinka deginti įvairaus drėgnumo ir šilumingumo kurą. Biokurą gali sudaryti smulkinta mediena, skiedra (kuro rūšis BK – 1) arba kuro kirtimo atliekos, kamienas, šakos, spygliai, lapai (kuro rūšis BK – 2). BK – 1 kuro rūšis gali sudaryti iki 100 % viso kuro, tuo tarpu BK – 2 iki 50 %. Bet kuriuo kuro variantu leidžiamos medžio priemaišos – žievė ir pjuvenos iki 30 %. Didžiausias leistinas kuro pelningumas iki 7 %.

Katilinėje yra įdiegta SCADA valdymo ir duomenų rinkimo sistema. Šios sistemos pagalba galima stebėti, kaupti ir reguliuoti įvairius katilinės parametrus realiu laiku. Visi pagrindiniai katilinės įrenginiai yra valdomi iš centrinio valdymo pulto. Galima stebėti jų būseną (atidaryta / uždaryta, veikia / stovi rezerve), aliarmų pranešimus. Visi analoginiai signalai yra kaupiami kompiuterio atmintyje ir gali būti parodyti grafikų pavidalu. Ši sistema suteikia plačias reguliavimo ir duomenų analizavimo galimybes. Pagrindinis SCADA pakuros valdymo langas pateiktas 3.2 paveikslėlyje.



3.2 pav. Pakuros įrenginių atvaizdavimas SCADA sistemoje: 1 – maitintuvų hidrostotelės, 2 – ardynų hidrostotelės, 3 – pakuros kuro bunkerio skleistuvai, 4 – maitintuvų hidrocilindrai, 5 – pirminio oro ventiliatorius, 6 – ardynų hidrocilindrai, 7 – antrinio oro ventiliatorius, 8 – antrinio oro sklendė, 9 – pirminio oro sklendės, 10 – tretinio oro sklendė.

### 3.2 Eksperimentinių tyrimų metodika

Įvertinus, kad efektyvų katilinės veikimą užtikrina daug skirtingų veiksnių, optimizuojant katilinės veikimo režimus vadovaujamosi adityvumo principu. Todėl tyrimas vykdomas keliais etapais, priimant, kad kiekvienas analizuojamas parametras lemia bendrą katilinės efektyvumą.

Pirmuoju etapu vykdomas eksperimentinis tyrimas, kurio metu nešiojamo dūmų analizatoriaus pagalba matuojamos azoto oksidų ir anglies monoksido koncentracijos išeinančiuose dūmuose. Keičiant antrinio oro ventiliatoriaus palaikomo deguonies kiekio



išeinančiuose dūmuose užduotį, ieškomas azoto ir anglies monoksido koncentracijos priklausomybės nuo oro pertekliaus koeficiento. Atlikus matavimus, įvertinama oro pertekliaus koeficiento įtaka azoto oksidų ir anglies monoksido susidarymui. Gautos matavimo vertės palyginamos su [17] nustatytais normomis 3.2 lentelėje. Palyginus gautas vertes su [17] nustatytais normomis, parenkamas optimaliausias oro pertekliaus koeficientas tiriamoje katilinėje ir palyginamas su režiminėje kortelėje nurodytais dydžiais.

3.2 lentelė. Kurą deginančių įrenginių išmetamų teršalų ribinės vertės

Kuro rūšis	Šiluminis našumas (MW)	Išmetamo teršalo ribinė vertė iš kurą deginančių įrenginių, mg/Nm <sup>3</sup>				Standartinė O <sub>2</sub> koncentracija tūrio proc.
		SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	Kietosios dalelės	
		Esamas įrenginys	Esamas įrenginys	Esamas įrenginys	Esamas įrenginys	
Kietas kuras	1≥MW 20	2 000	750	2 000	700	6%
	20≥MW 50	2 000	750	1500	500	6%

Antruoju etapu yra vykdomas eksperimentinis tyrimas, kurio metu ieškoma išeinančių dūmų temperatūros priklausomybės nuo kondensato slėgio dūmų kondensacinio ekonomizerio purkštukuose. Keičiant dūmų kondensacinio ekonomizerio kondensato siurblių slėgio užduotį, matuojama išeinančių dūmų temperatūra po DKE ir kondensato siurblių apkrovimas. Remiantis purkštukų gamintojo specifikacijomis 3.3 lentelėje įvertinamas kondensato debito sumažėjimas per DKE ir DKE kondensato siurblių apkrovimo įtaka bendram katilinės elektros energijos suvartojimui.

3.3 lentelė. DKE purkštukų specifikacija.

Purkštuko tipas	Išpurškiamo skysčio debitas l/min, esant slėgiui bar										Išpurškimo kampas °, esant slėgiui, bar		
	0,2	0,4	0,5	0,7	1,5	2	3	4	6	7	0,7	1,5	6
B9360 PP40-60	12,2	17,3	19,3	23	33	39	47	55	67	72	80	86	90

Trečiuoju etapu yra atliekami analitiniai skaičiavimai, norint įvertinti atliktų eksperimentų įtaką bendram katilinės efektyvumui. Modeliuojama šilumos nuostolių su išeinančiais dūmais q<sub>2</sub> priklausomybė nuo oro pertekliaus koeficiento. Oro pertekliaus koeficiento įtaka oro pūtimo ir dūmų šalinimo ventiliatorių apsukrovimui, elektros suvartojimui. Dūmų kondensacinio ekonomizerio slėgio purkštukuose įtaka kondensato siurblių apsukrovimui ir išeinančių dūmų temperatūrai, šių parametrų įtaka palyginamųjų elektros sąnaudų vienam šilumos energijos vienetui (1 MWh) pagaminti. Įvertinus visus parametrus, randamos optimaliausios jų vertės ir

palyginamos su režiminėje kortelėje nurodytomis vertėmis. Pateikiamos išvados katilinės darbo proceso optimizavimui, atliekami ekonominiai skaičiavimai kiek galima sutaupyti katilinei dirbant optimaliu režimu.

Pirmuoju eksperimentinių tyrimų etapu naudojamas portatyvinis dūmų analizatorius Multilyzer NG ir stacionarūs katilinėje sumontuoti deguonies ir anglies monoksido matavimo prietaisai Fuji Electric ZKM ir Madur maMos. 3.4 lentelėje pateikiami apibendrinti kiekvieno matavimo prietaiso techniniai duomenys.

3.4 lentelė. Tyrimo metu naudotų matavimo prietaisų specifikacija

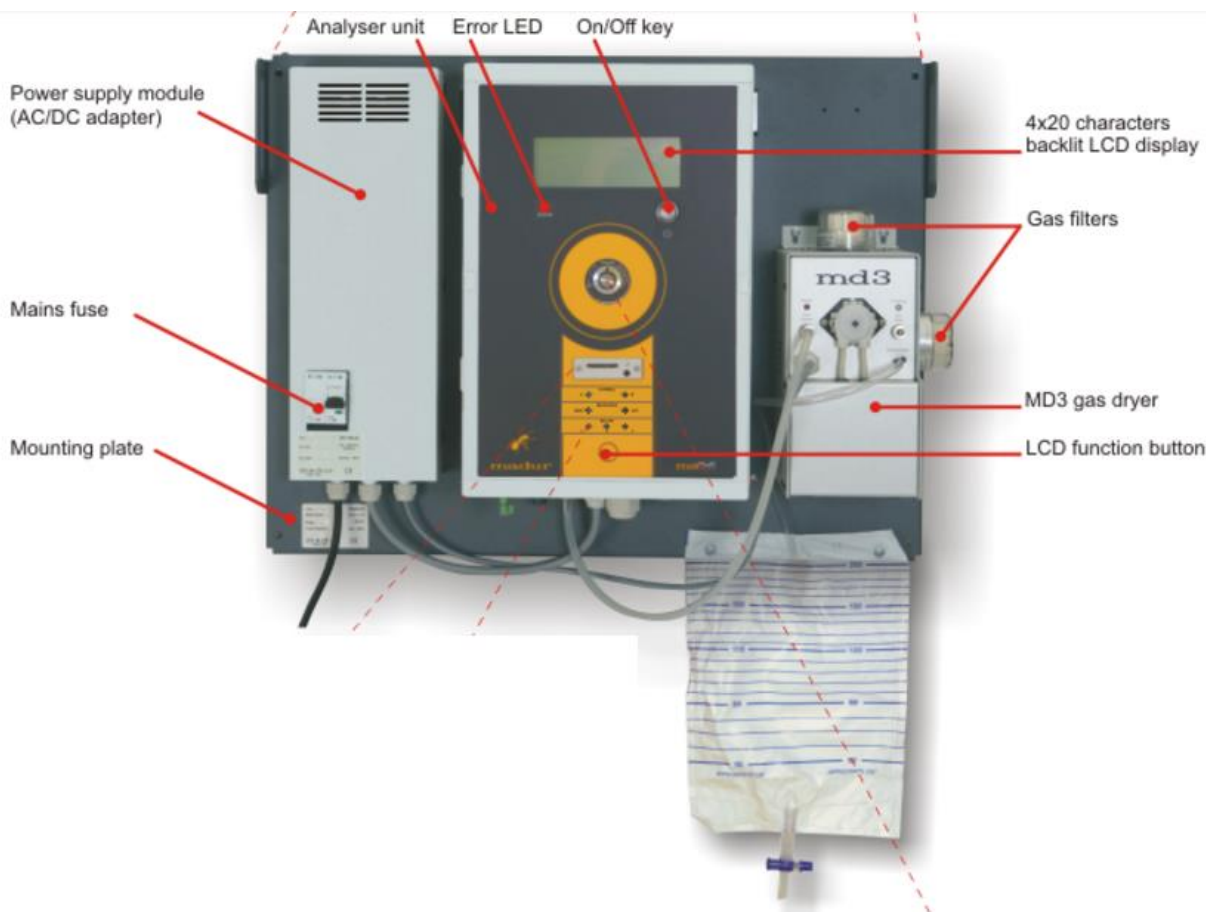
Eil. Nr.	Parametras	Matavimo prietaisas		
		Multilyzer NG	Madur maMos	Fuji Electric ZKM
1.	Tipas	Portatyvinis, su dūmų paruošimo sistema	Stacionarus, su dūmų paruošimo sistema	Stacionarus, be dūmų paruošimo sistemos
2.	O <sub>2</sub> matavimo diapazonas	0 – 25 %	0 – 21 %	0 – 50 %
3.	O <sub>2</sub> matavimo reakcijos laikas	40 s	45 s	4 – 7 s
4.	CO matavimo diapazonas	0 – 10 000 ppm	0 – 20 000 ppm	–
5.	CO matavimo reakcijos laikas	40 s	45 s	–
6.	NO <sub>x</sub> matavimo diapazonas	0 – 500 ppm	–	–
7.	NO <sub>x</sub> matavimo reakcijos laikas	40 s	–	–
8.	SO <sub>2</sub> matavimo diapazonas	0 – 10 000 ppm	–	–
9.	SO <sub>2</sub> matavimo reakcijos laikas	40 s	–	–

Kiekvienas naudotas matavimo prietaisas skiriasi savo tipu, specifikacija, parametrais ir yra skirtas skirtingiems matavimams.

Multilyzer NG yra nešiojamas dūmų analizatorius tvirtu korpusu ir apsauginiu apvalkalu su magnetu. LCD ekrane pateikiama iki 10 matuojamų parametrų verčių su keturiais skirtingais matavimo vienetais. Prietaisas gali būti komplektuojamas su šešiomis skirtingomis celėmis: O<sub>2</sub>, CO, COH<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>. Veikimo principas yra paremtas dūmų paruošimu. Specialus dūmų siurblys siurbia analizuojamus dūmus į prietaisą, tuomet jie yra išvalomi nuo kietųjų dalelių, ataušinami ir analizuojami. Eksperimentų metu naudotas prietaisas turėjo O<sub>2</sub>, CO, NO ir SO<sub>2</sub> celes.

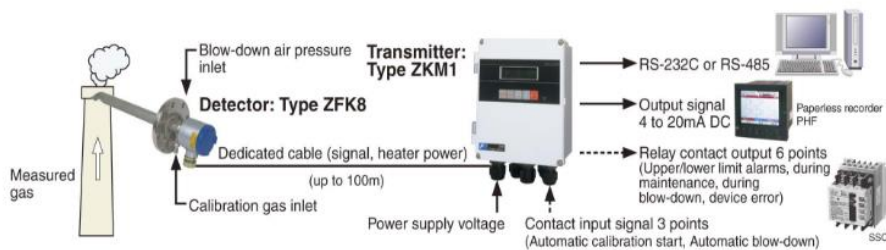
Madur maMos taip pat turi integruotą dūmų paruošimo įrangą – analizuojamų dūmų sausintuvą, kurio pagalba yra pašalinami vandens garai iš dūmų. Kadangi dūmų sausinimas užima laiko, šio prietaiso reakcijos laikas siekia 45 – 60 s, todėl šis prietaisas nėra tinkamas technologinių procesų valdymui ir gali būti naudojamas tik kaip kontrolinė priemonė išmetimų monitoringui. Reakcijos laikas yra svarbus norint automatizuoti procesus katilinėje, kadangi reikia kuo greičiau įvertinti visus degimo pasikeitimus pakuroje. Kitu atveju parametrų reguliatoriai gali nesugebėti užtikrinti sklandaus ir patikimo proceso valdymo. Būtent dėl šios priežasties Madur prietaisas yra

naudojamas kaip papildomas kontrolinis prietaisas. Be to, jis papildomai turi CO ceļę, leidžiančią nustatyti ar yra ir kiek yra smalkių tiriamuose dūmuose. Šis stebimas parametras yra kokybinis, todėl jam nebūtinai labai trumpas reakcijos laikas. Svarbiausia yra žinoti, ar CO kiekiai neviršija [17] nustatytų verčių. Tai pat labai svarbu sekti CO kiekį, jeigu katilinėje yra sumontuotas dūmų kondensacinis ekonomizeris, kadangi dideli CO kiekiai gali sukelti technologinio proceso sutrikimą DKE. Dideli CO kiekiai gali sudaryti kenksmingas putas kondensato sistemoje, todėl esant tokiai situacijai reikia nedelsiant stabdyti DKE darbą.



3.3 pav. Madur dūmų analizatoriaus išorinis vaizdas ir pagrindiniai komponentai

Fuji Electric ZKM turi tiesioginio naudojimo cirkonio sensorių, kuriam nereikia dūmų paruošimo sistemos t.y. per sensorių tiesiogiai teka analizuojamų dūmų srautas, todėl jo reakcijos laikas yra labai trumpas – siekia iki 7 s. Toks deguonies matavimo prietaisas tinka technologiniam procesui valdyti, kadangi užtikrina greitą reakciją į dūmų sraute įvykusius pasikeitimus. Tačiau šis prietaisas gali įvertinti tik deguonies kiekį išeinančiuose dūmuose, o jo zondas yra patalpintas ne dūmų srauto centre, o jo krašte, todėl galimi didesni matavimo netikslumai. Prietaisas sudarytas iš ZFK8 tipo jutiklio ir ZKM1 tipo keitiklio. Keitiklis katilinės valdikliui išduota 4 – 20 mA srovės stiprio analoginį signalą, gali būti jungiamas prie kompiuterio per RS – 232C arba RS – 485 protokolus, papildomai gali būti išduodami 6 diskretiniai išėjimo signalai ir priimami 3 diskretiniai įėjimo signalai. Bendra deguonies matavimo prietaiso schema pateikta 3.4 paveikslėlyje.



3.4 pav. ZKM deguonies analizatoriaus principinė signalų schema

Sudeginto kuro drėgmės ir šilumingumo analizės yra atliekamos „Axis Industries“ biokuro tyrimų laboratorijoje atitinkančioje LST EN ISO/IEC 17025:2006 reikalavimus. Vilniuje veikianti laboratorija akredituota atlikti kietojo biokuro visuminės drėgmės pagal LST EN ISO 18134-1:2016 ir LST EN ISO 18134-2:2016, ėminio bendrosios analizės drėgmės pagal LST EN ISO 18134-3:2016, pelenų kiekio pagal LST EN ISO 18122:2016 ir šilumingumo pagal LST EN 14918:2010 nustatymo bandymus.

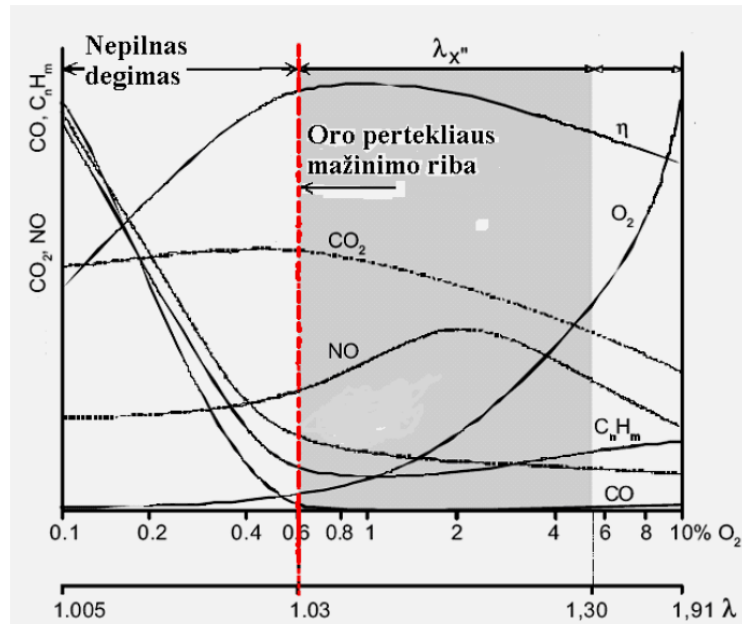
Slėgis DKE purkštukų kolektoriuje matuojamas stacionariu Epsilens PCE 28 slėgio keitikliu, kaip kontrolinis matavimo prietaisas naudojamas vietinis manometras Manoterm 0 – 8. Išeinančių dūmų temperatūra po dūmų kondensacinio ekonomizerio matuojama Kimo Pt100 varžiniu termometru. Kontrolinio matavimo prietaiso šioje vietoje nenumatyta.

Visi stacionarių katilinės prietaisų parodymai yra atvaizduojami ir kaupiami SCADA sistemoje. Išeinančių dūmų matavimas su dūmų analizatoriumi vykdomas katilinės išorėje įrengtoje dūmų mėginių paėmimo vietoje Nr. 3, ji sutampa su ZKM dūmų analizatoriaus zondo sumontavimo vieta. Visi matavimai vyksta katilinės blokui dirbant pilnu apkrovimu esant nusistovėjusiam režimui t.y. šiluminė galia yra lygi 24 MW. Eksperimentų vykdymo data: 2017 metų kovo 13 diena.

Pirmame etape atliekamas deguonies koncentracijos užduoties pakeitimas, laukiama 10 min. ir atliekamas kontrolinis matavimas. Atliekant tyrimus fiksuojama tiksli data ir laikas. Atliekant degimo produktų parametrų matavimus, reikia užtikrinti kuo tolygesnio ir vienodesnio homogeniško kuro tiekimą. Tam kuras papildomai permaišomas traktoriais. Tuo pat metu katilinės operatyvinis personalas ima atvežto kuro mėginius. Kadangi į katilinę kuras yra pristatomas automobiliniu transportu, iš kiekvieno automobilio paimamas kuro mėginys – jo drėgnumo nustatymui. Iš visos dienos automobilių kuro mėginių suformuojamas vienas jungtinis mėginys, kurio pagalba akredituotoje laboratorijoje nustatomas kuro šilumingumas ir peleningumas. Atsižvelgiant į tai jog biokuro tyrimų laboratorija mėginius ištiria per 5 darbo dienas, kuro tyrimų rezultatus galima gauti tik praėjus savaitei nuo, vykdytų dūmų tyrimų.

Atlikus planuotus išmetamų dūmų tyrimus ir gavus sudeginto kuro parametrus, galima brėžti grafikus ir ieškoti priklausomybių. Optimaliausias oro pertekliaus koeficientas nustatomas

remiantis 3.5 paveikslėlyje nurodyta schema. Šiuo atveju ji skirta dujiniam kurui, tačiau visos tendencijos yra proporcingos ir kietajam kurui.



3.5 pav. Optimaliausio oro pertekliaus koeficiento nustatymas dujiniam kurui [31]

Pasinaudojant 3.5 paveikslėlyje pateikta schema įvertinami, dėl per mažo į pakurą paduodamo oro kiekio susidarę nepilno sudegimo produktai (CO), jų skaitinė vertė, atitinkamas [17] normoms, įvertinamas jų poveikis nuostoliams dėl cheminio nesudegimo  $q_3$ . Analizuojama per didelio oro pertekliaus koeficiento įtaka nuostoliams su išeinančiais dūmais  $q_2$ . Vertinamas azoto oksidų padidėjimas tiekiant daugiau oro į tretinę degimo zoną.

Antrame etape tolygiai mažinama DKE kondensato siurblių slėgio užduotis tuo pat metu stebint ir fiksuojant išeinančių dūmų temperatūrą į kaminą. Vertinamas kondensato siurblių apsikrovimas, elektros energijos suvartojimas. 3.3 lentelėje pateikti duomenys lyginami su eksperimentiškai gautais rezultatais. Analizuojamas kondensato išpurškimo kampas pateiktas 3.6 paveikslėlyje ir jo priklausomybė nuo slėgio purkštukuose.



3.6 pav. DKE purkštukų išpurškimo kampas

Visi eksperimentų rezultatai sulyginami su SCADA sistemoje sukauptais duomenimis, esant netikslumams ieškoma neatitikimo priežasčių.

## 4 EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ REZULTATAI

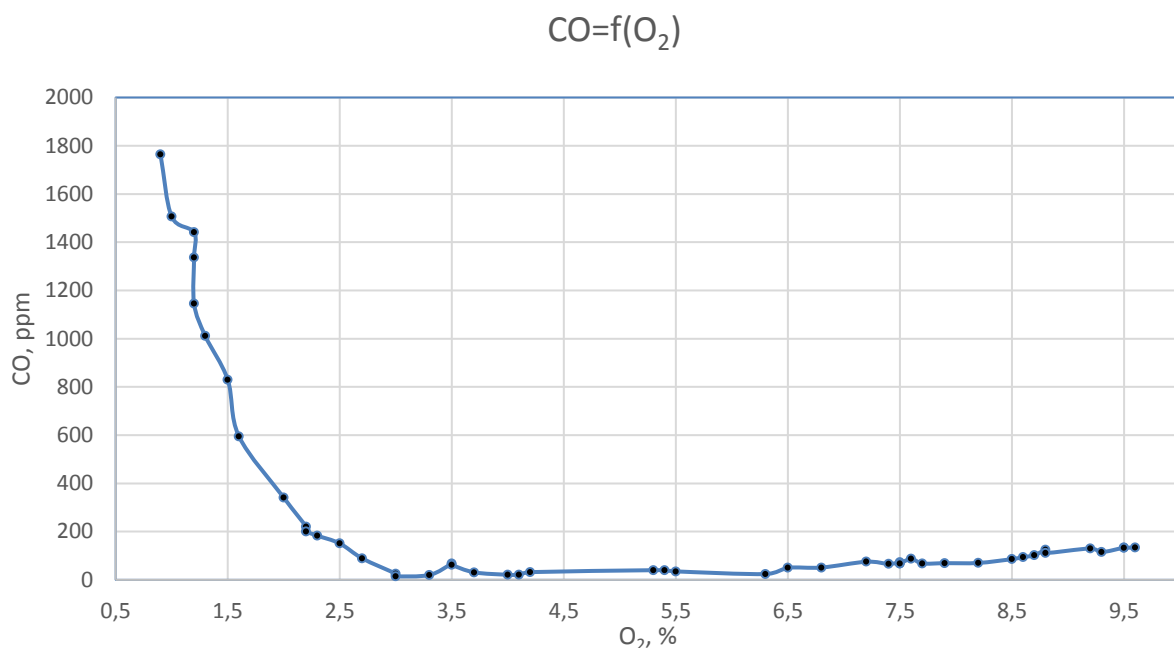
### 4.1 Rezultatų kokybinis ir kiekybinis aprašymas bei analizė

Oro pertekliaus koeficiento įtakos dūmuose susidarantiems junginiams tyrimas vyko 2017.03.13 nuo 16 iki 21 valandos. Tyrimų rezultatai pateikti priede Nr. 1. Apibendrinti gauti rezultatai pateikiami 4.1 lentelėje:

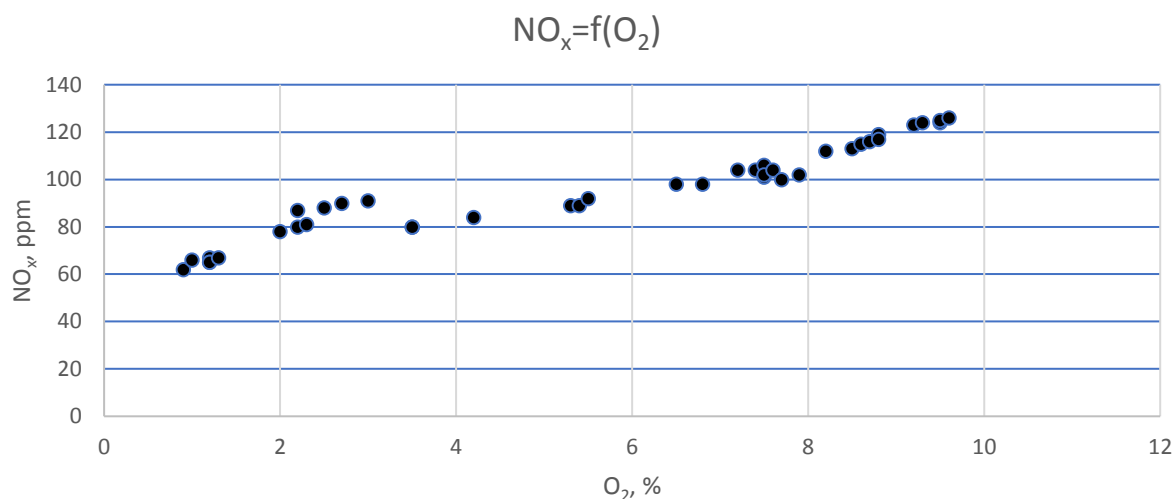
4.1 lentelė. Apibendrinti pirmo tyrimo etapo duomenys

Eil. Nr.	O <sub>2</sub> , %	CO, ppm	NO <sub>x</sub> , ppm	SO <sub>x</sub> , ppm	T <sub>dūmų</sub> , °C
1	0,9	1764	62	0	185
2	1	1506	66	0	186
3	1,2	1441	67	0	186
6	1,3	1011	67	0	185
7	1,5	830	68	0	185
8	1,6	595	70	0	185
9	2	341	78	0	185
11	2,2	201	87	0	186
12	2,3	183	81	0	185
13	2,5	151	88	0	185
14	2,7	89	90	0	185
15	3	25	90	0	189
17	3,3	20	81	0	188
18	3,5	67	80	0	181
20	3,7	31	82	0	187
21	4	21	83	0	187
22	4,1	21	82	0	187
23	4,2	32	84	0	180
24	5,3	40	89	0	179
25	5,4	40	89	0	180
26	5,5	35	92	0	180
27	6,3	24	95	0	182
28	6,5	50	98	0	178
29	6,8	51	98	0	177
30	7,2	75	104	0	176
31	7,4	66	104	0	176
34	7,5	67	102	0	176
35	7,6	87	104	0	176
36	7,7	68	100	0	176
37	7,9	69	102	0	176
38	8,2	70	112	0	178
39	8,5	86	113	0	178
40	8,6	94	115	0	178
41	8,7	102	116	0	178
43	8,8	111	117	0	178
44	9,2	130	123	0	177
45	9,3	115	124	0	177
47	9,5	133	125	0	176
48	9,6	134	126	0	177

Pirmame tyrimų etape gautų rezultatų priklausomybės pateiktos 4.1 ir 4.2 paveiksluose.



4.1 pav. Anglies monoksido priklausomybė nuo deguonies kiekio išeinančiuose dūmuose



4.2 pav. Azoto oksidų priklausomybė nuo deguonies kiekio išeinančiuose dūmuose

Akivaizdu, kad mažėjant oro pertekliaus koeficientui anglies monoksido koncentracija išeinančiuose dūmuose didėja. Nuo 2,5 % deguonies kiekio CO koncentracija dūmuose didėja eksponentiškai ir 1,6 % jau yra per didelė, kad galėtų normaliai funkcionuoti DKE. Taip pat nuo 6,5 % O<sub>2</sub> dūmuose CO koncentracija nežymiai didėja. Tai galima paaiškinti per dideliu oro kiekiu pakuroje, dėl ko kuras yra prasčiau sudeginamas.

Azoto oksidų koncentracija, didėjant deguonies kiekiui išeinančiuose dūmuose, tolygiai didėja. Tai galima paaiškinti aukštesne liepsnos temperatūra tretinio oro zonoje ir CO redukcine įtaka NO<sub>x</sub> susidarymui didelio CO kiekio zonoje.

Tyrimo metu sudeginto kuro duomenys pateikti 4.2 lentelėje:

4.2 lentelė. Tyrimo metu sunaudoto kuro duomenys

Tyrimo tipas	Registracijos data	Visuminė drėgmė, %	Sauso kuro apat. izochor. šilumingumas, MJ/kg	Sauso kuro virš. izochor. šilumingumas. MJ/kg	Pelenų kiekis sausajai būsenai %
Įprastas	17-03-13 08:46	50,1			
Įprastas	17-03-13 08:57	50,6			
Įprastas	17-03-13 09:03	49,8			
Įprastas	17-03-13 09:15	48,5			
Įprastas	17-03-13 10:14	45,4			
Įprastas	17-03-13 10:27	50,9			
Įprastas	17-03-13 10:39	50,8			
Įprastas	17-03-13 10:44	48,7			
Įprastas	17-03-13 11:18	49,9			
Įprastas	17-03-13 11:41	49,8			
Įprastas	17-03-13 11:56	52,3			
Įprastas	17-03-13 12:05	48,3			
Įprastas	17-03-13 12:10	45,3			
Įprastas	17-03-13 13:00	42,6			
Įprastas	17-03-13 13:36	51,4			
Įprastas	17-03-13 14:32	42,2			
Įprastas	17-03-13 15:18	48,1			
Įprastas	17-03-13 15:33	65,8			
JUNGTINIS	17-03-13 15:58	49,5	19,097	20,340	1,1
Įprastas	17-03-13 16:34	43,8			
Įprastas	17-03-13 16:51	48,4			
Įprastas	17-03-13 17:04	44,6			
Įprastas	17-03-13 18:23	50,5			
JUNGTINIS	17-03-13 18:23	46,8	19,355	20,588	1,9

Tyrimo metu kurą į katilinę tiekė du kuro tiekėjai, todėl buvo suformuoti du jungtiniai kuro mėginiai skirti nustatyti kuro šilumingumą ir peleningumą. Iš gautų rezultatų matoma, kad kuro visuminė drėgmė gana ženkliai svyruoja priklausomai nuo kuro partijos, tačiau nei vienas mėginys neperžengia leistinų ribų.

Patiekto kuro peleningumas yra žemas, nesiekia 2 %, o šilumingumas yra aukštesnis nei sutartinis, numatytas teisės aktuose [3] 18,6 MJ/kg, ir siekia 19,2 MJ/kg. Galima teigti, kad kuras kokybiškas, o didelis jo drėgnumas lems didesnę DKE pagaminamos energijos kiekį.

Analitiniams skaičiavimams priimama, kad kuro drėgnumas 48,1 %, apatinis šilumingumas 20,5 MJ/kg, peleningumas 1,5 %.



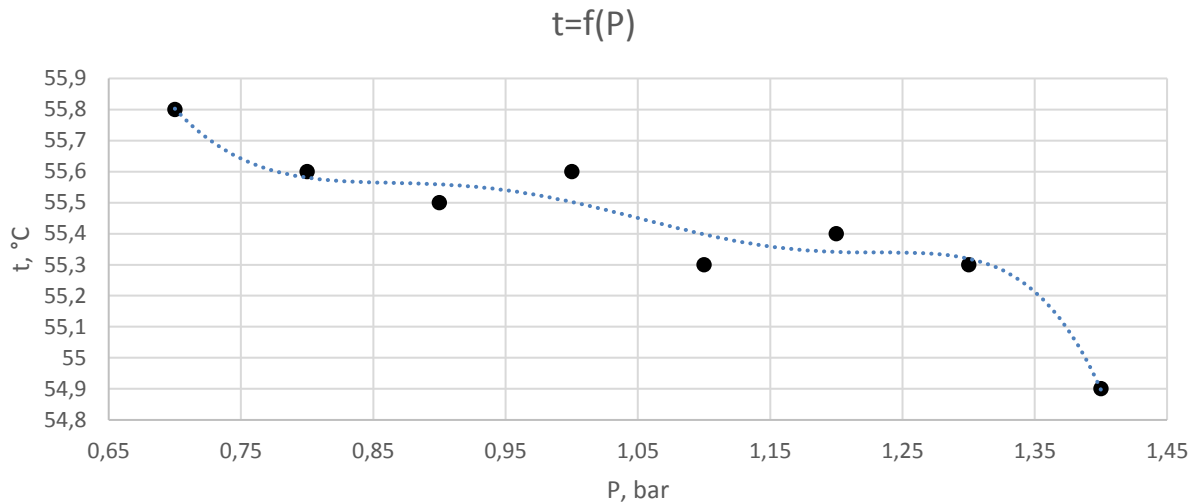
Išeinančių dūmų iš DKE temperatūros priklausomybės nuo slėgio purkštukuose tyrimų rezultatai pateikti 4.3 lentelėje.

4.3 lentelė. Iš DKE išeinančių dūmų temperatūros tyrimo apibendrinti rezultatai

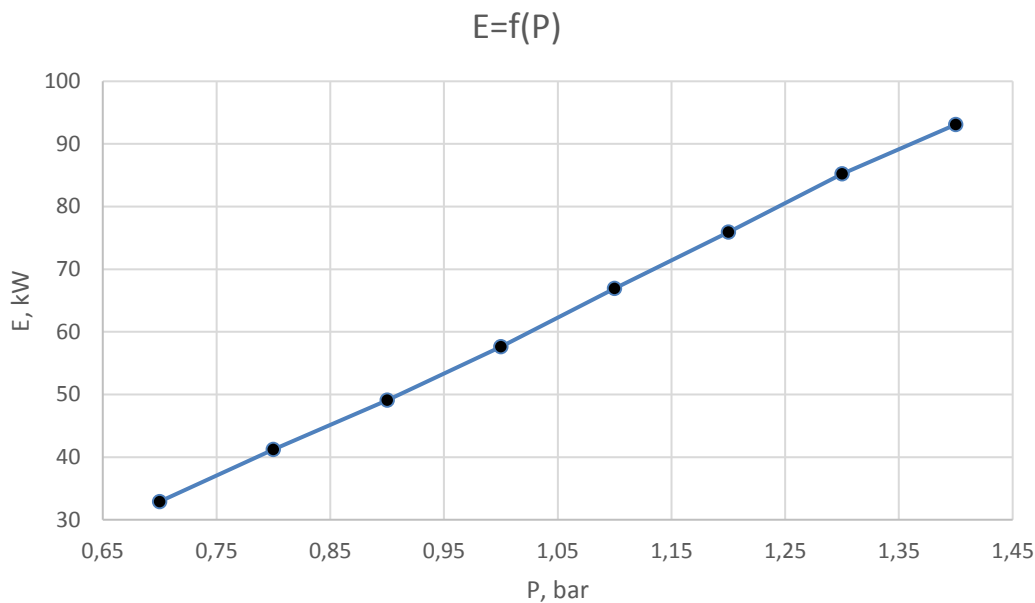
Eil. Nr.	Laikas	Kondensato slėgis, bar	B1EKS01 apkrovimas, kW	B1EKS02 apkrovimas, kW	Išeinančių dūmų temperatūra, °C
1.	10:40	1,4	45,5	47,6	54,9
2.	10:50	1,3	37,7	47,5	55,3
3.	11:00	1,2	35,3	40,8	55,9
4.	11:10	1,2	35	40,9	55,4
5.	11:20	1,1	30,3	36,6	55,8
6.	11:30	1,1	30,1	36,8	55,3
7.	11:40	1	26,2	31,4	55,6
8.	11:50	1	26,4	31,5	55
9.	12:00	0,9	22,3	26,8	55,5
10.	12:10	0,9	22,1	26,9	54,2
11.	12:20	0,8	18,5	22,7	54,3
12.	12:30	0,8	18,6	22,3	54,8
13.	12:40	0,7	14,9	18	55,8
14.	12:50	0,7	14,8	18,1	56,1

Pagal 4.3 lentelėje pateiktus duomenis galima pastebėti, kad slėgis DKE purkštukuose buvo padidintas 2 kartus – nuo 0,7 bar iki 1,4 bar. Kondensato siurblių bendras elektros energijos suvartojimas išaugo 3 kartus – nuo 30 iki 90 kW. Tuo tarpu išeinančių dūmų temperatūra pakito tik 1 °C. Taip pat galima pastebėti, kad kondensato siurblys Nr. 2 (B1EKS02) visais bandymų atvejais suvartojo daugiau elektros energijos nei siurblys Nr. 1 (B1EKS01). Šį reiškinį galima paaiškinti skirtingomis DKE atskiriamojo šilumokaičio sekcijų dalimis. Kiekvienas kondensato siurblys turi atskirą atskiriamojo šilumokaičio sekciją taip užtikrinant, kad kondensatas neišmaišytų tarp šaltosios ir karštosios dalių. Šaltosios pusės kondensatas su termofikaciniu vandeniu sudaro mažesnę temperatūrų skirtumą, todėl norint užtikrinti pakankamus šilumos mainus reikalingas didesnis šilumokaičio tūris, dėl kurio dydžio labiau apsikrauna kondensato siurblys taip suvartodamas daugiau elektros energijos.

Atitinkamai 4.3 ir 4.4 paveikslėliuose pavaizduota išeinančių dūmų temperatūros priklausomybė nuo slėgio purkštukuose ir DKE kondensato siurblių bendrasis elektros suvartojimas priklausomai nuo kondensato slėgio purkštukuose.



4.3 pav. Išeinančių dūmų priklausomybė nuo slėgio purkštukuose



4.4 pav. Kondensato siurblių elektros suvartojimo priklausomybė nuo slėgio purkštukuose

4.3 paveikslėlyje pavaizduota išeinančių dūmų priklausomybė nuo kondensato slėgio purkštukuose. Galima pastebėti, kad didėjant kondensato slėgiui purkštukuose mažėja išeinančių dūmų temperatūra. Tačiau didesnis temperatūrų skirtumas pastebimas tik tarp 0,7 bar ir 1,4 bar slėgio. Visais kitais atvejais temperatūros skirtumas yra nežymus ir gali būti priskiriamas matavimo prietaisų paklaidoms.

4.4 pav. pavaizduota kondensato siurblių elektros energijos suvartojimo priklausomybė nuo slėgio purkštukuose. Ši priklausomybė beveik tiesinė. Didėjant slėgiui purkštukuose tiesiškai auga ir elektros suvartojimas. 4.4 pav. pavaizduotas bendras abiejų kondensato siurblių suvartojimas. Atskirai kiekvieno siurblio elektros energijos suvartojimas neanalizuojamas.

Tyrimo dieną katilinėje stebimi bendrieji parametrai pateikti 4.4 lentelėje:

4.4 lentelė. Katilinėje nuolat sekamų parametrų suvestinė

Laikas	Term. v. temperatūra prieš katilą už pamašymo, °C	Term. v. temperatūra už katilo, °C	Katilo gaminama šiluma, MWh	Katilo el. įrenginių elektros energija, kWh	Katilo lyginamosios el. energijos sąnaudos, kWh/MWh	Dūmų temp. iš pakuros į katilą, °C	Dūmų temp. už katilo, °C	CO kiekis dūmuose už katilų, ppm	Deguonies kiekis dūmuose, %
00 - 01	100,1	123,3	15,6	92,8	5,9	800,4	183,4	52	4,5
01 - 02	99,9	122,4	15,6	92,7	5,9	797,9	182,4	48,1	4,5
02 - 03	100	122,1	17,3	112,5	6,5	819,2	186	55	4,5
03 - 04	100,2	123,3	17,6	117,1	6,7	821,5	187,7	56	4,7
04 - 05	99,8	122,9	18,4	130,4	7,1	826	189,1	59,1	4,5
05 - 06	100,4	123,2	19,1	142,8	7,5	824,5	191	65,7	4,5
06 - 07	100,1	123,4	19,1	141	7,4	823,5	190,9	64,5	4,5
07 - 08	100,2	123,4	19,1	141,1	7,4	824,7	191,1	66,3	4,5
08 - 09	100,3	123,5	19,1	141	7,4	823,1	191	65,2	4,5
09 - 10	99,9	123,4	19,3	139,6	7,2	824,6	190,9	62,9	4,6
10 - 11	99,7	122,8	18,6	146,6	7,7	821,2	191	78,5	5
11 - 12	99,8	122,8	18,6	147	7,4	820,7	191	79,4	4,8
12 - 13	100	123,3	18,9	141,8	7,3	824,2	190,9	63,2	4,6
13 - 14	100	123,4	19	142	7,5	826,1	191	62,1	4,5
14 - 15	100,1	123,5	19,1	140,8	7,4	826,5	191,3	57,6	4,5
15 - 16	100,1	123,5	19,1	142,7	7,5	827,9	191,6	54,7	4,5
16 - 17	100	123,4	19,1	144,6	7,5	824,9	191,6	53,9	4,7
17 - 18	100,3	124,6	17,8	121,2	6,8	829,6	189,9	37,9	4,6
18 - 19	100	120,7	18,3	142,2	7,7	823,9	188,9	50,1	4,7
19 - 20	100,5	123,4	19,2	143,8	7,5	841,3	192,1	73,1	4
20 - 21	100	122,7	18,9	160,2	8,5	816,4	192,2	58,2	4,8
21 - 22	99,8	123,3	19	154,2	8,1	824,4	192,8	47,1	4,5
22 - 23	100	123,5	19,1	154,3	8	825,5	193	44,6	4,7
23 - 24	100,4	124,6	17,5	126,1	7,3	819,8	190,3	36,6	4,6
Viso:	100,1	123,2	18,4	135,8	7,4	822,4	190	58	4,6

4.4 lentelėje yra pateikti nuolat katilinėje sekami duomenys. Tai yra pagrindiniai parametrai, kurie nusako, ar katilinė veikė efektyviai ir be sutrikimų. Temperatūros prieš ir už katilo svarbios užtikrinant tinkamą temperatūrinį režimą. Likusieji parametrai padeda įvertinti katilinės veikimo efektyvumą. Esant bet kokiam nukrypimui nuo nustatytų verčių, centriniame valdymo pulte pasigirsta garsinis perspėjimo signalas.

## 5 ANALITINIS KATILINĖS VEIKIMO REŽIMŲ MODELIAVIMAS

### 5.1 Katilo n.v.k skaičiavimai

Sprendžiant katilinės veikimo režimų optimizavimo užduotį, svarbu rasti optimaliausią oro pertekliaus koeficiento vertę. Vertinant šį parametą, reikia atsižvelgti į išmetamuose dūmuose esančių kenksmingų junginių kiekį ir įvertinti šilumos nuostolius su išeinančiais dūmais  $q_2$  bei balastinio oro kiekio įtaką oro tiekiantiems ir dūmus šalinantiems ventiliatoriams.

Norint rasti oro kiekį, reikiamą patiekti į pakurą, susidarančių degimo produktų tūrį ir toksogenus atliekami skaičiavimai, kuriems reikia žinoti tikslią deginamo kuro elementinę sudėtį. Remiantis [8] literatūros duomenimis, kurioje yra pateikiama įvairios medienos (kadangi didžiąją naudojamo kuro dalį sudarys smulkinta mediena) sausosios masės elementinė sudėtis 5.1 lentelėje yra pateiktos jos kitimo ribos ir skaičiavimuose parinktos vertės. Lentelėje taip pat nurodoma perskaičiuota naudojamosios masės elementinė sudėtis. Kuro elementinės sudėties iš sausosios į naudojamąją masę perskaičiavimas atliekamas naudojant formulę 5.3:

Remiantis 4.2 lentelės duomenimis atliekant skaičiavimus priimama, kad kuro drėgnumas 48,1 %, sausosios masės apatinis šilumingumas 20,5 MJ/kg, peleningumas 1,5 %.

Žinant kuro drėgnumą ir sausosios masės šilumingumą randamas naudojamosios masės šilumingumas:

$$Q_z^n = Q^s \cdot \left(1 - \frac{W}{100}\right) = Q^s \cdot \left(20800 - \frac{48,1}{100}\right) = 10795 \text{ kJ} / \text{kg} \quad (5.1)$$

Naudojant [8] pateiktą empirinę Mendelejevo formulę apskaičiuojama žemutinė kuro degimo šiluma. Skaičiavimams naudojami 5.1 lentelėje pateikti naudojamosios kuro sudėties rodikliai:

$$Q_z^n = 339 \cdot C^n + 1035 \cdot H^n - 109 \cdot (O^n - S^n) - 25 \cdot W^n \quad (5.2)$$

Žinant tikrą kuro šilumingumą ir vidutines cheminių elementų reikšmes sausojoje masėje, pasinaudojant elementų perskaičiavimą į naudojamąją masę, iteracijų būdu randama apytikslė kuro elementinė sudėtis:

$$C^n = \frac{W}{100} \cdot C^s = \frac{48,1}{100} \cdot 59,3 = 28,5 \% \quad (5.3)$$

Skaičiavimų rezultatai pateikti 5.1 lentelėje.

5.1 lentelė. Kuro elementinės sudėties skaičiavimų rezultatai

Elementas	Sausoji masė (kitimo ribos)	Sausoji masė (priimta skaičiavimams)	Naudojamoji masė (perskaičiuota naudojant 5.3 formulę)
C	46–60	59,3	28,5
H	6–9	8,3	4
S	0,5–2	0,0	0
O	30–42	35,8	17,2
N	0–1,5	1,5	0,7
A	1–5	3,1	1,5
W	–	–	48,1

Turint visus naudojamąsias masės elementus, randamas teorinis šilumingumas:

$$Q_z^t = 339 \cdot C^n + 1035 \cdot H^n - 109 \cdot (O^n - S^n) - 25 \cdot W^n =$$

$$339 \cdot 28,5 + 1035 \cdot 4 - 109 \cdot (17,2 - 0) - 25 \cdot 48,1 = 10724 \text{ kJ / kg} \quad (5.4)$$

Gautas teorinis naudojamąsias masės kuro šilumingumas ir teorinis naudojamąsias masės šilumingumas skiriasi:

$$x = \left(1 - \frac{Q_z^n}{Q_z^t}\right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{10724}{10795}\right) \cdot 100 = 0,66\% \quad (5.5)$$

Kadangi skirtumas nesiekia 1 %, priimama, kad skaičiavimai atlikti teisingai.

Nustačius naudojamąsias masės elementinę sudėtį remiantis [5] literatūros formulėmis apskaičiuojami pagrindiniai parametrai, reikalingi atlikti atvirkštinį katilo balansą.

Teorinis oro kiekis yra teoriškai reikalingas oro kiekis, jeigu pakuroje degimas vyktų pagal stoichiometrines proporcijas. Tačiau dėl pakuros netobulumo ir nepakankamo kuro susimaišymo su oru, kokybiškam kuro sudegimui teorinio oro kiekio nepakanka. Todėl į pakurą tiekiamo oro tūris  $V_o$  visuomet yra didesnis už teoriškai reikalingą oro tūrį  $V_o^t$ .  $V_o$  randamas įvertinus oro pertekliaus koeficientą, kuris priklausomai nuo kuro ir katilo rūšies kinta. Biokuro katilams dirbant nominaliu režimu jis svyruoja nuo 1,3 iki 1,5.

Dažnai katilinėse nuolat stebimas ir kontroliuojamas ne oro pertekliaus koeficientas  $\alpha$ , o deguonies kiekis išėinančiuose dūmuose. Šie du dydžiai yra vienas su kitu betarpiškai susiję. Tolimesniuose skaičiavimuose priimama, kad oro pertekliaus koeficientas  $\alpha$  yra lygus 1,3. Randamas numatomas deguonies kiekis išėinančiuose dūmuose:

$$O_2^d = 21 - \frac{21}{\alpha} = 21 - \frac{21}{1,3} = 4,8\% \quad (5.6)$$

Teorinis oro tūris reikalingas sudeginti 1 kg kuro:

$$\begin{aligned}
 V_o^t &= 0,0889 \cdot (C^n + 0,375 \cdot S^n) + 0,265 \cdot H^n - 0,0333 \cdot O^n = \\
 &= 0,0889 \cdot (28,5 + 0,375 \cdot 0) + 0,265 \cdot 4 - 0,0333 \cdot 17,2 = 3,02 \frac{m^3}{kg}
 \end{aligned} \tag{5.7}$$

Reikalingas i pakurą pateikti oro kiekis:

$$V_o = \alpha \cdot V_o^t = 1,3 \cdot 3,02 = 3,93 \frac{m^3}{kg} \tag{5.8}$$

Idealiu atveju visiškai sudegus kurui su teoriniu oro kiekiu, degimo produktuose būna tik visiško sudegimo produktų CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O ir oro bei kuro azoto. Deginant su oro pertekliumi, degimo produktuose (dūmuose) dar būna ir oro deguonies. Esant nepilnam sudegimui dūmuose būna anglies monoksido, tačiau atliekant skaičiavimus priimama, kad degieji komponentai sudega visiškai. Taip pat priimta sąlyga, jog kure visiškai nėra sieros, todėl SO<sub>2</sub> išeinančiuose dūmuose irgi nebus. Degimo produktų tūris paprastai dalijamas į dvi dalis: sausų dūmų tūrį  $V_{sd}$  ir vandens garo tūrį  $V_{H_2O}$ :

$$V_d = V_{sd} + V_{H_2O} \tag{5.9}$$

Kurui visiškai sudegus, sausų dūmų tūrį sudaro:

$$V_{sd} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} \tag{5.10}$$

Atliekant skaičiavimus naudojami panašių komponentų grupavimai. Deguonies ir azoto tūrius lengviau rasti, įvertinant oro pertekliaus koeficientą ir teorinį oro kiekį, reikalingą pateikti į kūryklą. Anglies ir sieros dioksidai sujungiami į vieną bendrą tūrį ir vadinami triatomėmis dujomis RO<sub>2</sub>. Išeinančių dujų tūriai apskaičiuojami remiantis žemiau pateiktomis formulėmis.

Randamas susidariusių triatomių dujų tūris, kuris nepriklauso nuo oro pertekliaus koeficiento ir esant pilnam kuro sudegimui yra pastovus dydis:

$$V_{RO_2} = 0,01866 \cdot (C^n + 0,375 \cdot S^n) = 0,01866 \cdot (28,5 + 0,375 \cdot 0) = 0,53 \frac{m^3}{kg} \tag{5.11}$$

Teorinis azoto tūris:

$$V_{N_2}^t = 0,79 \cdot V_o^t + 0,008 \cdot N^n = 0,79 \cdot 3,02 + 0,008 \cdot 0,7 = 2,39 \frac{m^3}{kg} \tag{5.12}$$

Azoto tūris įvertinus oro pertekliaus koeficientą:

$$V_{N_2} = 0,79 \cdot \alpha \cdot V_o^t + 0,008 \cdot N^n = 0,79 \cdot 1,3 \cdot 3,02 + 0,008 \cdot 0,7 = 3,11 \frac{m^3}{kg} \tag{5.13}$$

Deginant biokurą vandens garai dūmuose atsiranda sudegus kuro esančiam vandeniliui, išgaravus drėgmei ir patekus su atmosferos oru:

$$\begin{aligned}
 V_{H_2O} &= 0,111 \cdot H^n + 0,0124 \cdot W^n + 0,0161 \cdot \alpha \cdot V_o^t = \\
 &= 0,111 \cdot 4 + 0,0124 \cdot 48,1 + 0,0161 \cdot 1,3 \cdot 3,02 = 1,1 \frac{m^3}{kg}
 \end{aligned} \quad (5.14)$$

Teorinis vandens garų kiekis dūmuose randamas nevertinant oro pertekliaus koeficiento, kurio įtaka nėra didelė:

$$\begin{aligned}
 V_{H_2O}^t &= 0,111 \cdot H^n + 0,0124 \cdot W^n + 0,0161 \cdot V_o^t = \\
 &= 0,111 \cdot 4 + 0,0124 \cdot 48,1 + 0,0161 \cdot 3,02 = 1,09 \frac{m^3}{kg}
 \end{aligned} \quad (5.15)$$

Apskaičiavus visas dedamąsias galima rasti bendrą dūmų kiekį sudeginus 1 kg nustatytų parametrų biokuro:

$$V_d = V_{RO_2} + V_{N_2}^t + (\alpha - 1) \cdot V_o^t + V_{H_2O} = 0,53 + 2,39 + (1,3 - 1) \cdot 3,02 + 1,1 = 4,93 \frac{m^3}{kg} \quad (5.16)$$

Išeinančių dūmų entalpija gali būti apskaičiuota tik tuomet, kai bus žinomos dūmų komponentų specifinės šilumos prie skaičiuojamosios temperatūros. Jos randamos pagal [8] literatūroje pateiktas formules. Specifinės šilumos kinta pagal tiesinę priklausomybę nuo 0 iki 1500 °C. Rezultatai pateikiami 5.2 lentelėje.

5.2 lentelė. Dujų specifinės šilumos skaičiavimų rezultatai

Dujos	Tūrinės specifinės šilumos priklausomybė, kJ/(m <sup>3</sup> ·K)	Skaičiuotina temperatūra, °C	Rezultatai, kJ/(m <sup>3</sup> ·K)
CO <sub>2</sub>	1,7132+0,0004723·t	181	1,80
H <sub>2</sub> O	1,473+0,0002498·t	181	1,33
N <sub>2</sub>	1,306+0,0001107·t	181	1,52
Oro	1,287+0,0001201·t	30	1,29

Teorinė išeinančių dūmų entalpija:

$$\begin{aligned}
 H_d^t &= (V_{RO_2} \cdot c_{CO_2} + V_{N_2}^t \cdot c_{N_2} + V_{H_2O}^t \cdot c_{H_2O}) \cdot t = \\
 &= (0,53 \cdot 1,8 + 2,39 \cdot 1,52 + 1,09 \cdot 1,33) \cdot 181 = 1046,5 \frac{kJ}{kg}
 \end{aligned} \quad (5.17)$$

Esant oro pertekliui (skaičiuojamasis variantas), dūmų entalpija padidėja oro pertekliaus entalpijos dydžiu. Norint rasti šią oro pertekliaus entalpiją pirmiausia reikia apskaičiuoti teorinio oro kiekio entalpiją. Priimta, kad į pakurą bus tiekiamas oras iš katilų patalpos o jo temperatūra lygi 30°C. Tada teorinė oro entalpija:

$$H'_o = V'_o \cdot c_o \cdot t = 3,02 \cdot 1,29 \cdot 30 = 117 \frac{kJ}{kg} \quad (5.18)$$

Realaus oro kiekio entalpija:

$$H_o = \alpha \cdot V'_o \cdot c_o \cdot t = 1,3 \cdot 3,02 \cdot 1,29 \cdot 30 = 152 \frac{kJ}{kg} \quad (5.19)$$

Realaus dūmų tūrio entalpija įvertinus oro pertekliaus koeficiento įtaką:

$$H_d = H'_d + (\alpha - 1) \cdot H'_o = 1046,5 + (1,3 - 1) \cdot 117 = 1081,6 \frac{kJ}{kg} \quad (5.20)$$

Tuomet randama iš katilo išeinančių dūmų išnešama šiluma. Kadangi iš katilo išeinantys dūmai yra aukštesnės temperatūros negu oro, todėl su dūmais yra išnešamas tam tikras šilumos kiekis, kuris išsisklaido atmosferoje. Šį kiekį galima apskaičiuoti, įvertinant iš pakuros išeinančių dūmų ir į pakurą tiekiamo oro kiekio entalpijų skirtumą:

$$Q_2 = (H_d - H_o) \cdot \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) = (1081,6 - 152) \cdot \left(1 - \frac{2}{100}\right) = 950,2 \frac{kJ}{kg} \quad (5.21)$$

Nustatoma kiek procentų sudaro šilumos nuostoliai su išeinančiais dūmais q<sub>2</sub>:

$$q_2 = \frac{Q_2}{Q_d} \cdot 100 = \frac{950,2}{10724} \cdot 100 = 10,7 \% \quad (5.22)$$

Norint apskaičiuoti bendrą katilo naudingumo koeficientą atvirkštinio balanso būdu reikia žinoti atskirų nuostolių dedamųjų reikšmes. Jų kitimo ribos ir pasirinktos vertės pateiktos 5.3 lentelėje.

5.3 lentelė. Nuostolių kitimo ribos

Eil. Nr.	Nuostoliai	Žymėjimas	Kitimo ribos, %	Parinkta reikšmė, %
1	Su išeinančias dūmais	q <sub>2</sub>	8 – 15	Apskaičiuojama
2	Dėl nevisiško cheminio sudegimo	q <sub>3</sub>	0,2 – 0,5	0,3
3	Dėl nevisiško mechaninio sudegimo	q <sub>4</sub>	1 – 5	1
4	Į aplinką nuo karštų paviršių	q <sub>5</sub>	0,5 – 2	1,5

Žinant visus katilo šilumos nuostolius, galima apskaičiuojamas jo naudingumo koeficientas:

$$\eta_k = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5) = 100 - 10,7 - 0,3 - 1 - 1,5 = 86,4 \% \quad (5.23)$$



Norint korektiškai įvertinti tiekiamo oro ir reikiamų pašalinti dūmų kiekį, apskaičiuojamas valandinis (t/h) ir sekundinis (m<sup>3</sup>/s) katilo kuro suvartojimas. Kadangi kondensaciniame ekonomiaizeryje šiluminė energija yra atgaunama skaičiavimams naudojama tik katilo šiluminė galia.

$$B = \frac{Q_{kat}}{Q_z^n \cdot \eta} = \frac{19500}{10795 \cdot 0,854} = 2,1 \frac{kg}{s} = 7,7 \frac{t}{h} \quad (5.24)$$

Remiantis [8] literatūra priimama, kad medienos skiedrų tankis yra  $\rho = 240 \frac{kg}{m^3}$

Tuomet tūrinis kuro suvartojimas:

$$B_t = \frac{1000}{\rho} \cdot B = \frac{1000}{240} \cdot 7,7 = 31,9 \frac{m^3}{h} \quad (5.25)$$

Reikiamas patiekti oro kiekis:

$$V_{opat} = V_o \cdot B = 3,93 \cdot 2,1 = 8,4 \frac{m^3}{s} = 30086 \frac{m^3}{h} \quad (5.26)$$

Reikiamas pašalinti dūmų kiekis normaliomis sąlygomis:

$$V_{dp}^{ns} = B \cdot V_d = 2,1 \cdot 4,93 = 10,5 \frac{m^3}{s} = 37798 \frac{m^3}{h} \quad (5.27)$$

Apskaičiuojamas reikiamas pašalinti dūmų kiekis realiomis sąlygomis, kai dūmų temperatūra lygi 181°C:

$$V_{dp}^{rs} = V_{dp}^{ns} \cdot \left( \frac{273 + t_d}{273} \right) = 11,1 \cdot \left( \frac{273 + 181}{273} \right) = 18,4 \frac{m^3}{s} = 62719 \frac{m^3}{h} \quad (5.28)$$

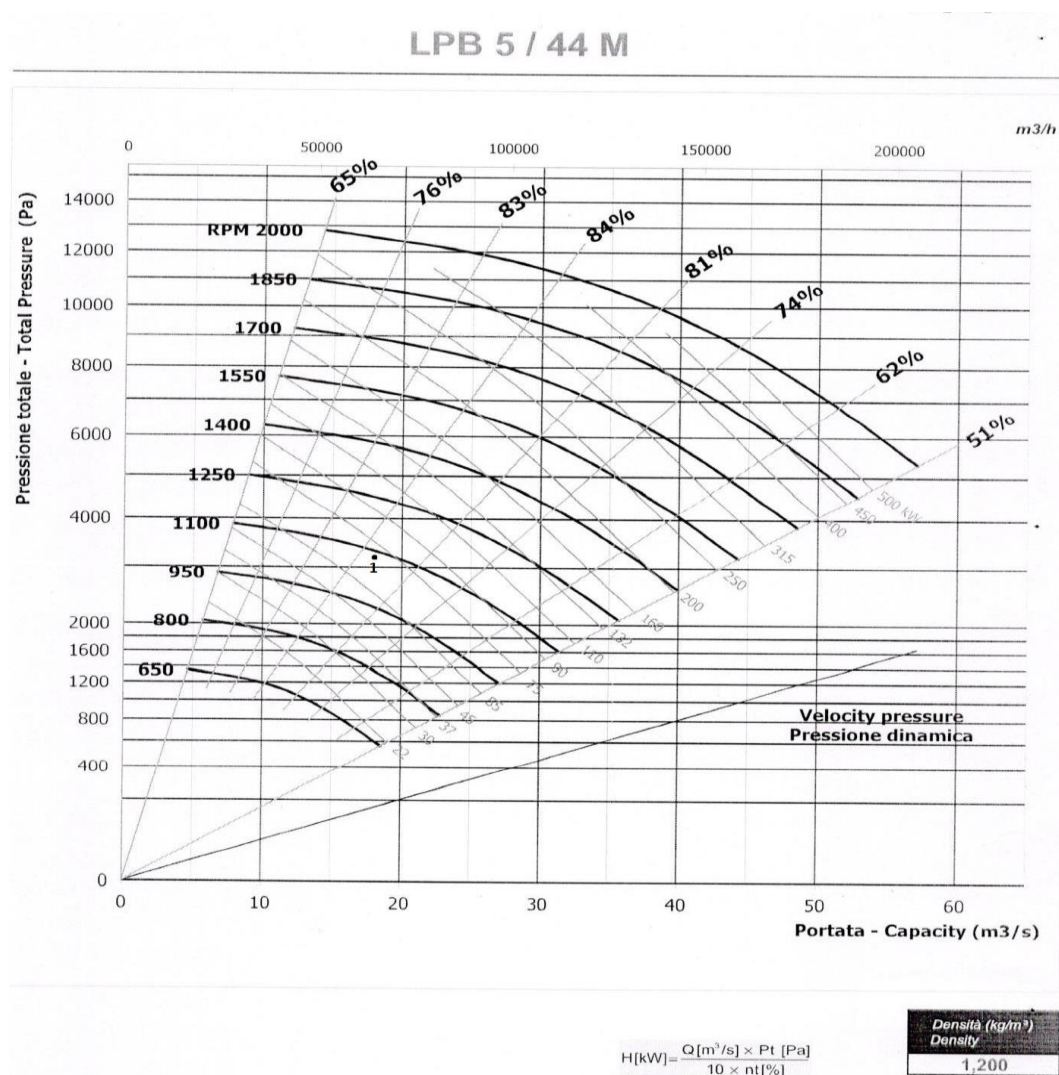
Pagal reikiamą patiekti oro kiekį ir pašalinti dūmų kiekį ir oro pūtimo ventiliatorių bei dūmsiurblių darbo kreives randamas jų apkrovimas ir naudojama elektros galia.

Norint sužinoti dūmsiurbio naudojamą elektrinę galią, reikia žinoti transportuojamų dūmų tūrį, jų tankį ir ventiliatoriaus sukuriamą slėgį. Reikalingas perpumpuoti dūmų kiekis randamas pagal 5.28 formulę. Pagal [8] dūmų tankis priimamas  $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$ . Katilo dūmsiurbis turi nugalėti slėgio nuostolius atsirandančius dūmams tekant per katilą, dūmų valymo įrenginius ir dūmtakius bei palaikyti  $-60 / -80 \text{ Pa}$  trauką pakuroje. Todėl pagal katilo ir dūmų valymo įrenginio – elektrostatinio filtro techninius duomenis randamas reikiamas išvystyti slėgis. Rezultatai pateikiami 5.4 lentelėje.

5.4 lentelė. Slėgio nuostolių dūmų trakte kitimo ribos

Eil. Nr.	Slėgio nuostolių sritis	Nuostolių kitimo ribos, Pa	Priimta reikšmė, Pa
1	Katilas	1000 – 2500	2000
2	Elektrostatinis filtras	500 – 1000	750
3	Dūmtakiai	5 – 15 % nuo visų nuostolių	10 % nuo visų nuostolių
4	Trauka pakuroje	-60 / -80	-70
Reikiamas išvystyti slėgis, Pa			3200

Žinant dūmsiurbui reikiamą išvystyti slėgį, pratekančių dūmų tūrį ir turint dūmsiurbio darbo kreivę joje atidedamas darbo taškas ir randamas suvartojamas elektros energijos kiekis. Dūmsiurbio darbo kreivė su nurodytu darbo tašku pateikiama 5.1 paveiksle.



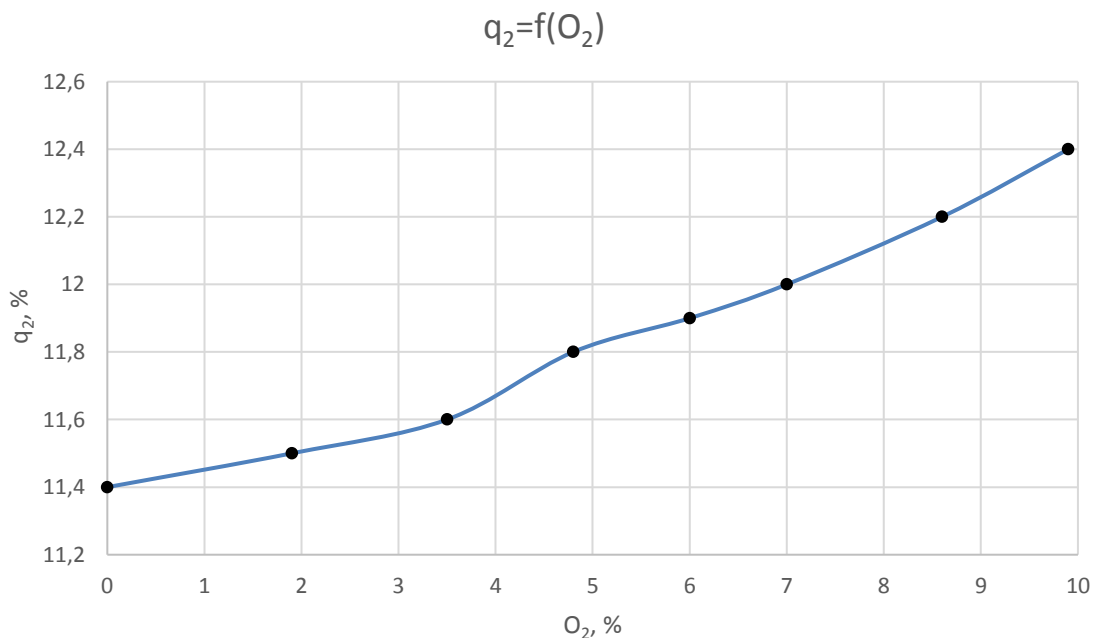
5.1 pav. Dūmsiurbio HDF LBP 5/44 M darbo kreivė

Panaudojant aukščiau nurodytą algoritmą, randamas katilinės naudingo veiksmo koeficientas, reikiami patiekti oro ir pašalinti dūmų tūriai ir ventiliatorių bei dūmsiurbių elektros suvartojimai esant skirtingiems oro pertekliaus koeficientams. Duomenys pateikti 5.5 lentelėje

5.5 lentelė. Suvestiniai katilo naudingumo koeficiento skaičiavimo rezultatai

Eil. Nr.	Oro pertekliaus koeficientas	Deguonies kiekis išeinančiuose dūmuose	N.V.K	Reikiamas patiekti oro kiekis	Reikiamas pašalinti dūmų kiekis	Ventiliatorių / dūmsiurbių elektros vartojimas, kW
1.	1	0	86,8	23050	50807	75
2.	1,1	1,9	86,7	25389	54767	82
3.	1,2	3,5	86,6	27734	58738	91
4.	1,3	4,8	86,4	30086	62719	98
5.	1,4	6	86,3	32444	66711	105
6.	1,5	7	86,2	34808	70714	112
7.	1,7	8,6	86	39556	78752	121
8.	1,9	9,9	85,8	44330	86833	129

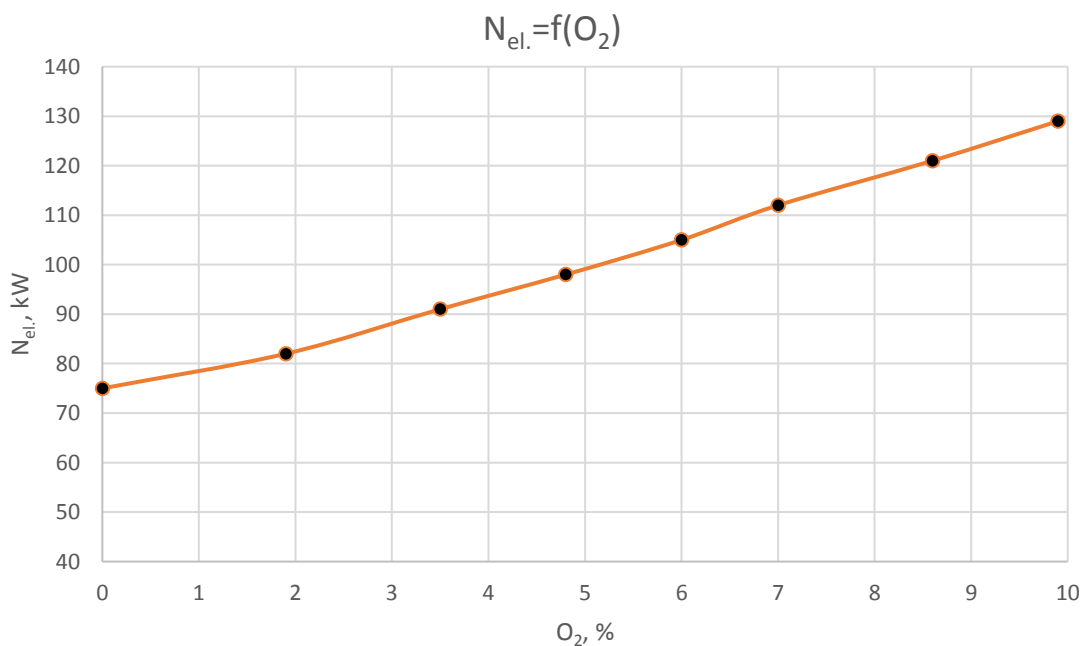
Grafiškai duomenys atvaizduoti 5.2 paveikslėlyje.



5.2 pav. Šilumos nuostolių su išeinančiais dūmais  $q_2$  priklausomybė nuo oro pertekliaus koeficiento

Akivaizdu, kad katilo naudingo veiksmo koeficientas mažėja didėjant deguonies koncentracijai išeinančiuose dūmuose, kadangi didėja nuostoliai su išeinančiais dūmais  $q_2$ . Šilumos nuostolių su išeinančiais dūmais didėjimą veikia papildomo balastinio oro, kuris nudalyvauja degime, tačiau kūrykloje sušyla iki dūmų temperatūros kiekis. Minimalią deguonies kiekio išeinančiuose dūmuose koncentraciją riboja susidarantys nepilno degimo produktai atvaizduoti 4.1 paveikslėlyje. Remiantis 4.1 paveikslėlyje pateiktu grafiku ir 3.2 lentelėje pateiktomis ribinėmis išmetamų teršalų reikšmėmis minimali deguonies kiekio koncentracija išeinančiuose dūmuose gali būti 1,5 %. Tačiau atsižvelgiant, kad degimo procesas pakuroje nuolat kinta ir yra galimas staigus deguonies kiekio sumažėjimas, kuris gali sukelti neleistiną kenksmingų teršalų padidėjimą, optimalus deguonies kiekis išeinančiuose dūmuose svyruoja tarp 3,5 ir 4,5 % ( $\alpha = 1,2$  ir  $\alpha = 1,27$ ).

Per didelis oro pertekliaus koeficientas sudaro sąlygas balastinio oro atsiradimui, kuris nedalyvauja degime procese. Dėl jo apsikrauna oro tiekimo ir dūmų šalinimo ventiliatoriai, yra eikvojama elektros energija. Pagrindinio katilo dūmsiurbio elektros suvartojimo kreivė priklausomai nuo oro pertekliaus koeficiento pateikiama 5.3 paveiksle.



5.3 pav. Dūmsiurbio elektros suvartojimo priklausomybė nuo oro pertekliaus koeficiento

## 5.2 Susidarančių toksogenų kiekiai

Žinant optimalų deguonies kiekį išeinančiuose dūmuose, remiantis teorinėmis formulėmis [30] apskaičiuojamos katilinėje susidarančių toksogenų koncentracijos ir palyginamos su eksperimentinėmis reikšmėmis.

Lakiųjų pelenų kiekis dūmuose:

$$M_{pel} = 10 \cdot B \cdot \left( \alpha_{i\check{s}} \cdot A^n + q_4 \cdot \frac{Q_z^n}{32680} \right) \cdot (1 - \eta) =$$

$$= 10 \cdot 2,1 \cdot \left( 0,6 \cdot 1,5 + 1 \cdot \frac{10724}{32680} \right) \cdot (1 - 0,95) = 1,29 \frac{g}{s} \quad (5.29)$$

Čia:  $\alpha_{i\check{s}}$  – pelenų išmetamų su dūmais dalis, ardyninei pakurai priimama 0,6;

$\eta$  – lakiųjų pelenų gaudytuvo gaudymo laipsnis, kadangi katilinėje įrengtas elektrostatinis filtras gaudymo laipsnis priimamas 0,95.

Žinant per sekundę šalinamų dūmų kiekį randamas lakiųjų pelenų kiekis dūmuose:

$$M_{pel}^{tūr} = \frac{M_{pel}}{V_{dp}^{rs}} = \frac{1,29}{18,4} \cdot 1000 = 70,1 \frac{mg}{m^3} \quad (5.30)$$

Priimama, kad sieros medienoje nėra, todėl sieros oksidų kiekiai dūmuose neskaičiuojami.

Jie neužfiksuoti ir atliekant eksperimentinius matavimus.

Azoto oksidų kiekis:

$$M_{NOX} = 0,34 \cdot 10^{-4} \cdot K \cdot B \cdot Q_z^n \cdot \left( 1 - \frac{q_4}{100} \right) \cdot (1 - \varepsilon_1 \cdot r) =$$

$$= 0,34 \cdot 10^{-4} \cdot 1,07 \cdot 2,1 \cdot 10724 \cdot \left( 1 - \frac{1}{100} \right) \cdot 1 \cdot (1 - 0,03 \cdot 0,2) = 0,8 \frac{g}{s} \quad (5.31)$$

čia  $K$  – koeficientas įvertinantis azoto kiekį kure, tenkantį 1t sutartinio kuro kg/t, randamas pagal formulę:

$$K = \frac{12 \cdot Q_{kat}}{200 + Q_{kat}} = \frac{12 \cdot 19,5}{200 + 19,5} = 1,07 \quad (5.32)$$

Čia:

$\varepsilon_1$  – recirkuliuojamų dūmų tiekimo vietos koeficientas;

$r$  – recirkuliuojamų dūmų tūrio dalis.

Randama azoto oksidų koncentracija dūmuose:

$$M_{NOx}^{tūr} = \frac{M_{NOx}}{V_{dp}^{rs}} = \frac{0,8}{18,4} \cdot 1000 = 43,5 \frac{mg}{m^3} \quad (5.33)$$

Žinant azoto oksidų (pagrindė juos sudaro  $NO_2$ ) molekulinę masę tūrinė koncentracija perskaičiuojama į masinę:

$$M_{NOx}^{mas} = \frac{M_{NOx}^{tūr} \cdot m_{NOx}}{22,41} = \frac{43,5 \cdot 46}{22,41} = 89,2 ppm \quad (5.34)$$

Anglies monoksidas:

$$M_{CO} = \frac{q_3 \cdot Q_z^n \cdot R}{1013} \cdot B \cdot \left( 1 - \frac{q_4}{100} \right) = \frac{0,3 \cdot 10724 \cdot 0,35}{1013} \cdot 2,1 \cdot \left( 1 - \frac{1}{100} \right) = 2,3 \frac{g}{s} \quad (5.35)$$

čia R – koeficientas įvertinantis šilumos nuostolius dėl CO buvimo dūmuose

Randoma anglies monoksido koncentracija dūmuose:

$$M_{CO}^{tūr} = \frac{M_{CO}}{V_{dp}^{rs}} = \frac{2,3}{18,4} \cdot 1000 = 134,1 \frac{mg}{m^3} \quad (5.36)$$

Žinant anglies monoksido molekulinę masę tūrinė koncentracija perskaičiuojama į masinę:

$$M_{CO}^{mas} = \frac{M_{CO}^{tūr} \cdot m_{CO}}{22,41} = \frac{134,1 \cdot 28}{22,41} = 156,2 ppm \quad (5.37)$$

5.6 lentelėje pateikiami teoriniai ir eksperimentiniai toksogenų susidarymo kiekiai. Kadangi skirtumas tarp eksperimentiškai gautų ir teoriškai apskaičiuotų toksogenų nėra didelis galima daryti prielaidą, kad skaitinis modeliavimas yra pakankamai tikslus būdas, norint prognozuoti į atmosferą išmetamus teršalus. Didesnis skirtumas atsiradęs skaičiuojant CO yra dėl neteisingai parinktų nuostolių dėl cheminio nesudegimo.

5.6 lentelė. Toksogenų susidarymo teorinių ir eksperimentinių duomenų palyginimo lentelė

Eil. Nr.	Tiriamas teršalas	Teorinio skaičiavimo rezultatai	Eksperimentinio tyrimo rezultatai	Matavimo vienetai
1.	CO	156,2	33	ppm
2.	NO	89,2	85	ppm
3.	KD <sup>1</sup>	70,1	3,41	mg/m <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Kietųjų dalelių teorinio skaičiavimo rezultatai lyginami su specializuotos tyrimų laboratorijos duomenimis. Jie pateikti priede Nr. 2.

### 5.3 Katilo lyginamosios elektros sąnaudos

Atlikus skaičiavimus nustatyta, jog parinkus optimalų oro pertekliaus koeficientą, katilo naudingo veikimo koeficientas padidėja vienu procentiniu punktu, kadangi nereikia šildyti papildomo balastinio oro. Taip pat balastinis oras apkrauna visus oro pūtimo ir dūmų šalinimo ventiliatorius, kadangi jie turi patiekti daugiau oro nei jo yra reikalinga degimo procesui palaikyti. Koeficientas, įvertinantis elektros sąnaudas šilumos gamybai yra vadinamas lyginamosios elektros sąnaudomis. Šis parametras įvertina kiek kWh elektros energijos reikia suvartoti norint pagaminti 1 MWh šiluminės energijos.

Biokuro pakuros darbo metu veikia ne tik oro pūtimo ir dūmų šalinimo ventiliatoriai, bet ir kiti papildomi įrenginiai – hidraulinės stotelės, transporteriai, siurbliai, oro kompresoriai. Vidutiniškai šių įrenginių vartojama elektros galia tiriamoje katilinėje siekia 100 kW. Oro pūtimo ventiliatorių ir dūmsiurbio elektros galios poreikis esant skirtingiems oro pertekliaus koeficientams imamas iš 5.5 lentelės.

Lyginamosios elektros sąnaudos esant oro pertekliaus koeficientui 1,3:

$$U_{kat} = \frac{E_{el}}{Q_{kat}} = \frac{100 + 91 + 18,2}{19,5} = 10,7 \frac{kW}{MW} \quad (5.38)$$

Lyginamosios elektros sąnaudos esant oro pertekliaus koeficientui 1,7:

$$U_{kat} = \frac{E_{el}}{Q_{kat}} = \frac{100 + 121 + 24,2}{19,5} = 12,6 \frac{kW}{MW} \quad (5.39)$$

Lyginamųjų elektros sąnaudų skirtumai esant skirtingiems oro pertekliaus koeficientams siekia 15 %. Tai reiškia, kad tinkamai optimizavus katilo degimo procesus galima sutaupyti iki 15 % suvartojamos elektros energijos.

#### 5.4 DKE lyginamosios elektros sąnaudos

Parinkus optimalų oro pertekliaus koeficientą, galima padidinti bendrą katilinės efektyvumą beveik vienu procentiniu punktu, o taip pat ir sumažinti elektros sąnaudas tenkančias 1 MWh šilumos pagaminimui. Tačiau deginant biokurą, kartu su katilu naudojamas dar vienas šilumos gamybos (šiuo atveju šilumos atgavimo) įrenginys – dūmų kondensacinis ekonomizeris.

Dūmų kondensacinio ekonomizerio darbo principas yra paremtas dūmų ataušimu žemiau rasos taško, todėl į dūmus DKE darbo metu yra purškiamas kondensatas. Kondensatoriaus šilumos mainų paviršiaus plotą tarp dūmų ir kondensato sudaro vandens lašelių, sukurtų purkštukų pagalba, plotas. Bendras vandens lašelių plotas yra be galo didelis, tuo metu kai lašeliai dideliu greičiu patenka į dūmus. Vandens lašelius sugeriantis paviršius atlieka mechaninio šilumos nešėjo vaidmenį. Dūmų šiluma kondensato vandeniui perduodama į kondensato surinkimo talpą, o toliau kondensato siurblių pagalba į šilumokaitį, kur pašildo grįžtamą termofikacinį vandenį, taip perduodant šilumos energiją iš dūmų į termofikacinį vandenį.

Dėl intensyvaus dūmų apipurškimo, kondensatas taip pat veikia kaip valantis filtras. Stambios dulkių dalelės yra pašalinamos iš dūmų kondensato pagalba. Šilumos mainų efektyvumą nusako šilumokaitos paviršiaus plotas (šiuo atveju išpurškiamų vandens lašelių plotas), todėl reikia įvertinti kokiomis sąlygomis jo didinimas neatneša apčiuopiamų rezultatų. Nagrinėjamame dūmų kondensaciniame ekonomizeryje yra sumontuoti iš polipropileno pagaminti purkštukai Whirl Jet B9360-3/8LBP-PP40-60. Jų specifikacijai pateikta 3.3 lentelėje, o išpurškimo forma pateikta 3.6 paveikslėlyje. Išpurškimo kampas ir išpurškiamo skysčio kiekis sumažėjus išpurškimo slėgiui 0,2 Bar pakinta nežymiai, todėl atliktas eksperimentas norint nustatyti išeinančių dūmų priklausomybę nuo kondensato slėgio purkštukuose.

Remiantis 4.3 lentelėje pateiktais DKE eksperimentinio tyrimo duomenimis išeinančių dūmų temperatūra purkštukuose esant 0,8 bar slėgiui ir 1,3 bar slėgiui yra beveik identiška, tačiau kondensato siurblių naudojama elektrinė galia skiriasi nuo 40,9 kW iki 85,2 kW. Įvertinus, jog be kondensato siurblių DKE yra tik dar vienas didelis elektros vartotojas – dūmsiurbis (jo elektrinė

galia (110 kW), apskaičiuojamos lyginamosios elektros sąnaudos, jeigu DKE dirba pilnu našumu t.y. 4,75 MW šiluminės energijos.

Priimta prielaida, kad DKE dūmsiurbis dirbs 80% apkrovimu ir vartos 88 kW elektros energijos:

$$U_{DKE} = \frac{E_{el}}{Q_{DKE}} = \frac{40,9 + 88}{4,75} = 27,1 \frac{kW}{MW} \quad (5.40)$$

Palaikant 1,3 bar slėgį purkštukuose lyginamosios elektros sąnaudos bus lygios:

$$U_{DKE} = \frac{E_{el}}{Q_{DKE}} = \frac{85,2 + 88}{4,75} = 36,5 \frac{kW}{MW} \quad (5.41)$$

Sumažinus slėgį į DKE kondensato purkštukus 0,5 bar, lyginamosios elektros sąnaudos sumažėja beveik 25 % neprarandant nei trupučio atgaunamos šilumos energijos. Akivaizdu, kad toks DKE veikimo optimizavimas sąlygotų didelius teigiamus ekonominius pokyčius.

## 5.5 Ekonominis optimizavimo priemonių vertinimas

Tiriama biokuro katilinė yra sudaryta iš dviejų identiškų blokų, todėl ekonominių skaičiavimų metu vertinami abu blokai prieš ir abu blokai po veikimo režimų optimizavimo, darant prielaidą, kad efektyvumo rodiklių pokytis abiejuose blokuose yra vienodas.

Remiantis šaltinyje [27] pateikiamais duomenimis bendros investicijos 48,5 MW (2x19,5 MW katilai + 2x4,75 MW DKE) katilinei siektų apie I = 14 065 000 Eur, žinant, kad santykinės investicijos sudaro apie 290 tūkst. Eur/MW instaliuotos šiluminės galios. Remiantis šaltinio [27] pateikiama informacija šilumos energijos supirkimo kaina žiemos mėnesiais vidutiniškai yra 25 €/MWh, o ne šildymo sezono metu apie 12 Eur /MWh.

Atsižvelgiant į šilumos supirkimo kainą skirtingais sezonais būtų galima vertinti tris šilumos gamybos ir pardavimo scenarijus:

1. Optimistinis. Katilinė nominalia galia veikia 8000 val./metus ir pagamina 388000 MWh/metus. Katiluose pagaminama 310 400 MWh, DKE pagaminama 77 600 MWh. Šiluma parduodama 50 % šildymo sezono metu ir 50 % ne šildymo sezono metu. Šilumos supirkimo kainos svertinis vidurkis 20,5 Eur /MWh.

2. Bazinis. Katilinė nominalia galia veikia 4500 val./metus ir pagamina 218 250 MWh/metus. Katiluose pagaminama 174 600 MWh, DKE pagaminama 43 650 MWh. Šiluma parduodama 100 % šildymo sezono metu. Šilumos supirkimo kaina 25 Eur/MWh.

3. Pesimistinis. Katilinė nominalia galia veikia 2500 val./metus ir pagamina 121 250 MWh/metus. Katiluose pagaminama 97 000 MWh, DKE pagaminama 24 250 MWh. Šiluma parduodama 100 % šildymo sezono metu. Šilumos supirkimo kaina 25 Eur/MWh.

Biokuro katilinės šilumos gamybos savikainos skaičiavimui pagrindinės dedamosios šilumos energijos gamybai:



Kintamos sąnaudos:

Kuras (biokuras) – 150 Eur/t.n.e šildymo sezono metu ir 115 Eur/t.n.e ne šildymo sezono metu (5.4 pav.).

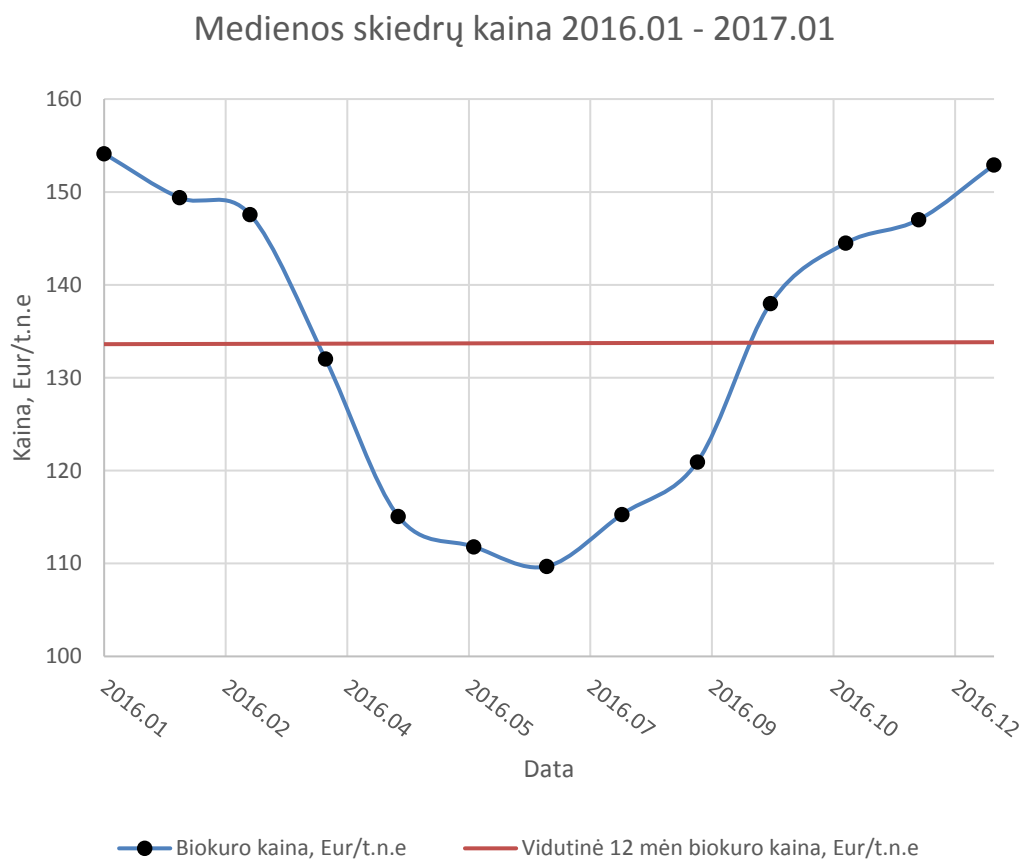
Elektros palyginamosios sąnaudos ir katilinės n.v.k vertinamos dviem atvejais – prieš katilinės veikimo optimizaciją ir po jos.

Pastovios sąnaudos:

Materialinės ir joms prilygintos sąnaudos (medžiagos, transporto paslaugos, aptarnavimo sąnaudos, nuoma, kuro tvarkymo sąnaudos ir kita) – 2,9 Eur/kW (vertinant pagal panašių katilinių materialines išlaidas);

Turto amortizacija – 20 metų (priimta);

Sąnaudos atlyginimams bei įmokos sveikatos ir socialiniam draudimui – 1500 Eur/mėn. kiekvienam darbuotojui [26];



5.4 pav. Vidutinė biokuro kaina Lietuvoje 2016 sausio – 2017 sausio mėn.

Atliekant skaičiavimus priimama, kad katilė pagaminama 75% visos į tinklą patiekiamos šilumos, o DKE pagaminama 25%.

Šilumos pardavimo pajamos:

$$I_{\text{pard}} = \text{kaina} \cdot Q = 20,5 \cdot 388000 = 7954000 \text{Eur} \quad (5.42)$$

Kuro įsigijimo kaina priklauso nuo katilo n.v.k. Esant didesniai katilo n.v.k pagaminti tam pačiam šilumos kiekiui reikia mažiau kuro:

$$I_{kuro}^{neopt} = \frac{Q_{kat}}{\eta} \cdot kaina = \frac{314000}{85,8} \cdot 160 = 4121645Eur \quad (5.43)$$

Katilo ir DKE įrenginių elektros suvartojimas gaunamas sudauginant lyginamąsias jų sąnaudas su pagamintu šilumos kiekiu:

$$I_{kat.elek}^{neopt} = Q_{kat} \cdot U_{kat} = 310400 \cdot 12,6 = 469324Eur \quad (5.44)$$

Materialinės ir joms prilygintos sąnaudos t.y. medžiagos, transporto paslaugos, aptarnavimo sąnaudos, nuoma, kuro tvarkymo sąnaudos ir kitos sudaro 2,9 Eur/kW instaliuotos galios, todėl šis pastovus dydis randamas:

$$I_{mat} = Q_{ins} \cdot k = 48500 \cdot 2,9 = 112520Eur \quad (5.45)$$

Turto amortizacija skaičiuojama 20 metų. Pradinės investicijos dalinamos į nustatytą amortizacijos laikotarpį:

$$I_{amor} = \frac{I}{n} = \frac{1406500}{20} = 703250Eur \quad (5.46)$$

Sąnaudos darbui apmokėti bei įmokos sveikatos ir socialiniam draudimui, apskaičiuojamos 15 darbuotojų komandai, kuomet vieno darbuotojo atlyginimo ir mokesčių sąnaudos siekia 1500 Eur/ mėn. Vidutiniškai toks darbuotojas gautų apie 1000 Eur „į rankas“.

$$I_{darb} = atlyginimas \cdot n \cdot 12 = 1500 \cdot 15 \cdot 12 = 270000Eur \quad (5.47)$$

Pelnas randamas kaip pajamų gautų parduodant šilumą ir visų išlaidų skirtumas:

$$P = I_{pard} - I_{kuro} - I_{kat.elek} - I_{DKE.elek} - I_{mat} - I_{amor} - I_{darb} = 7954000 - 4121645 - 469324 - 33988 - 112520 - 703250 - 270000 = 1937372Eur \quad (5.48)$$

Paprastasis atsipirkimo laikas randamas kaip pradinių investicijų ir kasmetinio pelno santykis:

$$PAL = \frac{I}{P} = \frac{14065000}{1937372} = 7,3metai \quad (5.49)$$

Sutaupymai optimizavus biokuro katilinę randami kaip skirtumas tarp nupirkto kuro, sunaudotos katilo ir DKE elektros esant abiem kraštiniais atvejams:

$$\begin{aligned} Sutaupymai &= (I_{kuro}^{neopt} - I_{kuro}^{opt}) + (I_{kat.elek}^{neopt} - I_{kat.elek}^{opt}) + (I_{DKE.elek}^{neopt} - I_{DKE.elek}^{opt}) = \\ &= (4121645 - 4093023) + (469324 - 398553) + (339888 - 252355) = 186927Eur \end{aligned} \quad (5.50)$$

Visu gautų skaičiavimų rezultatai optimistiniu, baziniu ir pesimistiniu variantais pateikiami atitinkamai 5.7, 5.8 ir 5.9 lentelėse.

5.7 lentelė. Optimistinis scenarijus

Eil. Nr.	Rodiklis	Neoptimizavus katilinės darbo	Optimizavus katilinės darbą
1.	Katilinės gamyba, MWh	388 000	
2.	Katilų gamyba, MWh	310 400	
3.	DKE gamyba, MWh	77 600	
4.	Šilumos pardavimo pajamos, Eur	7 954 000	
5.	Kuro įsigijimo išlaidos, Eur	4 121 645	4 093 023
6.	Katilo įrenginių elektros sąnaudos, Eur	469 324	398 553
7.	DKE įrenginių elektros sąnaudos, Eur	339 888	252 355
8.	Materialinės ir joms prilygintos sąnaudos (medžiagos, transporto paslaugos, aptarnavimo sąnaudos, nuoma, kuro tvarkymo sąnaudos ir kitos), Eur	112 520	
9.	Turto amortizaciniai atskaitymai (20 metų), Eur	703 250	
10.	Sąnaudos darbui apmokėti bei įmokos sveikatos ir socialiniam draudimui, Eur	270 000	
11.	Pelnas	1 937 372	2 124 299
12.	Paprastasis atsipirkimo laikas	7,3	6,6
13.	Sutaupymai optimizavus biokuro katilinės veikimo režimus	186 927	

Optimistinio scenarijaus metu katilinė be veikimo režimų optimizavimo atsipirktų per 7,3 metus, su optimizavimu per 6,6 metus. Optimizavus režimus kasmet būtų sutaupoma po 186 927 Eur t.y. pajamos padidėtų 2 procentiniais punktais. Toks atsipirkimo laikas gali būti laikomas tinkamu investiciniam projektui vykdyti.

5.8 lentelė. Bazinis scenarijus

Eil. Nr.	Rodiklis	Neoptimizavus katilinės darbo	Optimizavus katilinės darbą
1.	Katilinės gamyba, MWh	218 250	
2.	Katilų gamyba, MWh	174 600	
3.	DKE gamyba, MWh	43 650	
4.	Šilumos pardavimo pajamos, Eur	5 456 250	
5.	Kuro įsigijimo išlaidos, Eur	2 318 425	2 302 325
6.	Katilo įrenginių elektros sąnaudos, Eur	263 995	224 186
7.	DKE įrenginių elektros sąnaudos, Eur	191 187	141 949
8.	Materialinės ir joms prilygintos sąnaudos (medžiagos, transporto paslaugos, aptarnavimo sąnaudos, nuoma, kuro tvarkymo sąnaudos ir kitos), Eur	112 520	
9.	Turto amortizaciniai atskaitymai (20 metų), Eur	703 250	
10.	Sąnaudos darbui apmokėti bei įmokos sveikatos ir socialiniam draudimui, Eur	270 000	
11.	Pelnas	1 596 872	1 702 019
12.	Paprastasis atsipirkimo laikas	8,8	8,2
13.	Sutaupymai optimizavus biokuro katilinės veikimo režimus	105 146	

Bazinio scenarijaus metu katilinė be veikimo režimų optimizavimo atsipirktų per 8,8 metus, su optimizavimu per 8,2 metus. Optimizavus režimus kasmet būtų sutaupoma po 105 146 Eur t.y. pajamos padidėtų beveik 2 procentiniais punktais. Toks atsipirkimo laikas gali būti laikomas pakankamu investiciniam projektui vykdyti.

5.9 lentelė. Pesimistinis scenarijus

Eil. Nr.	Rodiklis	Neoptimizavus katilinės darbo	Optimizavus katilinės darbą
1.	Katilinės gamyba, MWh	121 250	
2.	Katilų gamyba, MWh	97 000	
3.	DKE gamyba, MWh	24 250	
4.	Šilumos pardavimo pajamos, Eur	3 031 250	
5.	Kuro įsigijimo išlaidos, Eur	1 288 014	1 279 070
6.	Katilo įrenginių elektros sąnaudos, Eur	146 664	124 548
7.	DKE įrenginių elektros sąnaudos, Eur	106 215	78 861
8.	Materialinės ir joms prilygintos sąnaudos (medžiagos, transporto paslaugos, aptarnavimo sąnaudos, nuoma, kuro tvarkymo sąnaudos ir kitos), Eur	112 520	
9.	Turto amortizaciniai atskaitymai (20 metų), Eur	703 250	
10.	Sąnaudos darbui apmokėti bei įmokos sveikatos ir socialiniam draudimui, Eur	270 000	
11.	Pelnas	404 587	463 001
12.	Paprastasis atsipirkimo laikas	34,7	30,3
13.	Sutaupymai optimizavus biokuro katilinės veikimo režimus	58 415	

Pesimistinio scenarijaus metu katilinė be veikimo režimų optimizavimo atsipirktų per 34,7 metus, su optimizavimu per 30,3 metus. Optimizavus režimus kasmet būtų sutaupoma po 58 415 Eur t.y. pajamos padidėtų beveik 2 procentiniais punktais. Toks atsipirkimo laikas negali būti laikomas pakankamu investiciniam projektui vykdyti. Toks projektas yra nerentabilus.

Atliekant išsamesnę analizę randama šilumos energijos gamybos savikaina, įvertinus katilinės veikimo režimų optimizavimo įtaką pesimistiniu, baziniu ir optimistiniu scenarijais. Katilinės šilumos energijos gamybos savikaina parodo, kiek eurų kainuoja pagaminti 1 MWh šilumos energijos įvertinant pastoviąsias ir kintamąsias sąnaudas bei katilinės įrenginių amortizaciją.

Katilinės suminė šilumos gamyba dalinama iš visų sąnaudų:

$$S = \frac{I_{sum}}{Q} = \frac{4121645 + 469324 + 339888 + 112520 + 703250 + 270000}{388000} = 15,5 \frac{Eur}{MWh} \quad (5.51)$$

Skaičiavimų rezultatai pateikiami 5.10 lentelėje

5.10 lentelė. Šilumos gamybos savikaina esant skirtingiems scenarijams

Eil. Nr.	Katilinės šilumos gamybos savikaina, Eur /MWh	
	Neoptimizavus veikimo režimų	Optimizavus veikimo režimus
Optimistinis	15,51	15,03
Bazinis	17,68	17,20
Pesimistinis	21,66	21,18

Skaičiavimai rodo, kad katilinės šilumos gamybos savikaina optimizavus veikimo režimus sumažėja atitinkamai 3,1; 2,7 ir 2,2 procentinio punkto optimistiniu, baziniu ir pesimistiniu scenarijais. Optimistinio ir pesimistinio scenarijų šilumos gamybos savikaina skiriasi beveik 30 procentinių punktų.

## 6 IŠVADOS

1. Atlikta literatūros apžvalga. Aptarti moksliniai straipsniai parodė, kad biokuro katilų veikimo režimus galima ženkliai optimizuoti tiek pasitelkiant konstrukcinius sprendimus, tiek degimo proceso valdymą, keičiant numatytus parametrus.

2. Pasirinkus tyrimo objektą pagal iš anksto suformuotą metodiką eksperimentiškai nustatyta anglies monoksido ir azoto oksidų priklausomybė nuo deguonies kiekio išeinančiuose dūmuose, išeinančių dūmų priklausomybė nuo slėgio DKE purkštukuose, DKE kondensato siurblių elektros suvartojimo priklausomybė nuo slėgio purkštukuose.

3. Analitiškai sumodeliuota katilo naudingo veikimo koeficiento priklausomybė nuo oro pertekliaus koeficiento. Nustatyta, kad optimalus deguonies kiekis išeinančiuose dūmuose svyruoja tarp 3,5 ir 4,5 % ( $\alpha = 1,2$  ir  $\alpha = 1,27$ ). Lyginamosios elektros sąnaudos esant oro pertekliaus koeficientui 1,3, gaunamos 15 % mažesnės nei katilinei veikiant įprastu režimu.

4. Panaudojus gautus eksperimentinių tyrimų rezultatus apskaičiuota lyginamųjų DKE elektros sąnaudų priklausomybė nuo kondensato slėgio purkštukuose. Nustatyta, kad sumažinus slėgį į purkštukus 0,5 bar, lyginamosios elektros sąnaudos esant slėgiui į purkštukus 0,8 bar gaunamos 25 % mažesnės nei DKE veikiant įprastu režimu tuo pat metu atgaunant identišką kiekį šilumos.

5. Atlikti analitiniai katilinėje susidarančių toksogenų skaičiavimai ir gauti rezultatai palyginti su eksperimentiniais duomenimis. Skirtumai tarp duomenų yra paklaidos ribose.

6. Įvertinta katilinės veikimo režimų ekonominė nauda, esant trims skirtingiems scenarijams: optimistiniam, baziniam ir pesimistiniam. Nustatyta, kad vidutiniškai esant bet kokiam scenarijui optimizavus veikimo režimus šilumos energijos gamybos savikaina sumažėja 2 procentiniais punktais.

7. Nustatyta, kad optimizavus biokuro katilinės veikimo režimus, visais scenarijais šilumos gamybos savikainą galima sumažinti 2 procentiniais punktais. Esant pesimistiniam scenarijui katilinės projektas yra nerentabilus.

## 7 LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Adomavičius Arvydas, Balčius Algimantas, Gudzinskas Juozas, Šinkūnas Stasys „Energijos inžinerijos studijų krypties pirmosios ir antrosios studijų pakopos baigiamųjų darbų rengimo metodiniai nurodymai“, mokomoji knyga, Kaunas: Technologija, 2012 m.
2. Anjum Munir, Jahan Zeb Alvi, Sidrah Ashfaq Abdul Ghafoor „Performance evaluation of a biomass boiler on the basis of heat loss method and total heat values of steam“, Faisalabad, Pakistan, 2014 m.
3. BaltPool energijos išteklių birža „Atmintinė biokuro biržos dalyviui“, 2017 m.
4. Dagnija Blumberga, Edgars Vigants, Ivars Veidenbergs, Ģirts Vigants, Valdis Vitoliņš „Eco-intensity analysis for a chip-fuelled boiler house“, Riga, Latvia, 2012 m.
5. Danish Energy Management „Energijos vartojimo audito pramonės įmonėse vadovas“, Vilnius, Efektyvios Energetikos Centras, 2004 m.
6. Denafas Gintaras „Atmosferos apsauga. II dalis. Atmosferos taršos mažinimas“, mokomoji knyga, Kaunas: Technologija, 2001 m.
7. Francescato Valter, Antonini Eliseo „Wood fuels handbook“, AIEL, 2008 m.
8. Gimbutis G., Kajutis K., Krukonis V., Pranckūnas A., Švenčianas P. „Šiluminė technika“, Vilnius: Mokslas, 1993 m.
9. Ģirts Vigantsa, Ivars Veidenbergsa, Edgars Vigantsa, Dagnija Blumberga „Cost analysis of a wood chip boiler house with a gas condenser“, Riga, Latvia, 2015 m.
10. Gyls Jonas, Miliauskas Gintautas, Montvilas Romualdas „Šilumos generatorių ir tinklo parinkimas bei skaičiavimas“, mokomoji knyga, Kaunas: Technologija, 2003 m.
11. Goran Stupara, Dragan Tucakovica, Titoslav Zivanovica, Srdjan Belosevicb „Assessing the impact of primary measures for NOx reduction on the thermal power plant steam boiler“, Belgrade, Serbia, 2015 m.
12. Gudzinskas Juozas, Lukoševičius Valdas, Martinaitis Vytautas, Tuomas Edvardas „Šilumos vartotojo vadovas“, Vilnius, 2011 m.
13. „Hillring. Incentives for co-firing in bio-fuelled industrial steam, heat and power production—Swedish experiences“, Uppsala, Sweden, 2003 m.
14. J. Good, Th. Nussbaumer, J. Delcarte, Y. Schenkel „Determination of the efficiencies of automatic biomass combustion plants“, Zurich, Switzerland, 2006 m.
15. Jakubčionis M. „Biosferos apsauga namų darbo metodiniai nurodymai“, Kaunas, 2008 m.
16. KE puslapis dėl šilumos supirkimo iš NŠG. Prieiga internete: <http://www.kaunoenergija.lt/verslui/nepriklausomiems-silumos-gamintojams/silumos-supirkimas/> (žiūrėta 2017–05–20)



17. Lietuvos Respublikos aplinkos apsaugos ministerija „Išmetamų teršalų iš kurą deginančių įrenginių norma LAND 43 2013“, patvirtinta 2013 m. balandžio 10 d. Lietuvos Respublikos aplinkos ministro įsakymu Nr. D1–244.

18. Lietuvos Respublikos energetikos ministerija „Elektrinių ir elektros tinklų eksploatavimo taisyklės“, patvirtintos Lietuvos Respublikos energetikos ministro 2012 m. spalio 29 d. įsakymu Nr. 1–211.

19. Lietuvos Respublikos energetikos ministerija „Katilinių įrenginių įrengimo taisyklės“, patvirtintos Lietuvos Respublikos energetikos ministro 2016 m. rugsėjo 19 d. įsakymu Nr. 1–249.

20. Lietuvos Respublikos energetikos ministerija „Saugos taisyklės eksploatuojant šilumos įrenginius“, patvirtintos Lietuvos Respublikos energetikos ministro 2016 m. rugsėjo 13 d. įsakymu Nr. 1–246.

21. Lietuvos standartas LST EN 14774-3 „Kietasis biokuras. Drėgmės kiekio nustatymas. Metodas naudojant džiovinimo spintą. 3 dalis. Bendrosios analizės ėminio drėgmė“, Vilnius, 2011 m.

22. Lins Cristine, Williamson E. Laura, Leitner Sarah „10 Years of renewable energy progres“, REN21, Paris, 2014 m.

23. Martin Polák, Pavel Neuberger „The optimisation of biomass combustion in small boilers“, Krakowie, Poland, 2008 m.

24. Miškinis V. „Kietojo biokuro apskaitos energijos gamybos šaltiniuose taisyklės“, galutinė ataskaita, LEI, 2011 m.

25. Nesiadis Athanasios, Nikolopoulos Nikolaos, Margaritis Nikolaos, Grammelis Panagiotis, Emmanuel Kakaras „Optimization of a log wood boiler through CFD simulation methods“, Kozani, Greece, 2015 m.

26. Pagrindiniai socialiniai rodikliai 2015 m. Lietuvos Respublikos socialinės apsaugos ir darbo ministerija. Prieiga internete: [http://www.socmin.lt/lt/socialine-statistika\\_1541/pagrindiniai\\_socialiniai\\_rodikliai.html](http://www.socmin.lt/lt/socialine-statistika_1541/pagrindiniai_socialiniai_rodikliai.html) (žiūrėta 2017–05–20)

27. Saxlund International GmbH interneto svetainė. Prieiga internete: [www.saxlund.co.uk](http://www.saxlund.co.uk) (žiūrėta 2017–05–20)

28. Srdjan Belosevica, Ivan Tomanovica, Vladimir Beljanskia, Dragan Tucakovicb, Titoslav Zivanovi „Numerical prediction of processes for clean and efficient combustion of pulverized coal in power plants“, Belgrade, Serbia, 2013 m.

29. Strehler. „Technologies of wood combustion“, Freising, Germany, 1999 m.

30. Švenčianas Petras „Biosferos apsauga šiluminėje energetikoje“, Kaunas, 1994 m.

31. Švenčianas Petras „Kuro degimo teorijos pagrindai“, vadovėlis, Kaunas: Technologija, 2003 m.

32. Tuomas E., LŠTA darbo grupė „Šilumos perdavimo tinklų šiluminės izoliacijos projektavimo, įrengimo, saugaus eksploatavimo reikalavimų analizė ir rekomendacijų dėl izoliacijos projektavimo, įrengimo, saugaus eksploatavimo teisinio reglamentavimo parengimas“, studijos galutinė ataskaita, 2006 m.
33. UAB „Danpower Baltic Biruliškių“ biokatilinės „DANSTOKER“ katilo operatoriaus vadovas. Įrengimas, eksploatacija, techninė priežiūra, Kaunas 2017 m.
34. UAB „Danpower Baltic Biruliškių“ biokuro katilinės bendroji eksploatacijos instrukcija, Kaunas, 2017m.
35. UAB „Danpower Baltic Biruliškių“ biokuro katilinės dūmų kondensacinio ekonomaizerio (DKE) eksploatacijos instrukcija, Kaunas, 2017 m.
36. UAB „Danpower Baltic Biruliškių“ biokuro katilinės elektrostatinio filtro (ESP) eksploatacijos ir techninės priežiūros instrukcija, Kaunas 2017 m.
37. Uros Stritih, Vincenc Butala „Optimization of a thermal storage unit combined with a biomass boiler for heating buildings“, Ljubljana, Slovenia, 2004 m.
38. V. Kirsanovs, A. Žandeckis, I. Veidenbergs, I. Blumbergs, M. Gedrovičs D. Blumberga „Experimental study on optimisation of the burning process in a small scale pellet boiler due to air supply improvement“, Riga, Latvia, 2014 m.
39. Valstybinės kainų ir energetikos kontrolės komisija „Kogeneracinių jėgainių šilumos ir elektros energijos sąnaudų atskyrimo metodika“, patvirtinta Valstybinės kainų ir energetikos kontrolės komisijos 2009 m. liepos 22 d. nutarimu Nr. O3–107.
40. Vares Villu, Kask Ülo, Muiste Peeter, Pihu Tõnu, Soosaar Sulev „Biokuro naudotojo žinynas“, Talino technologijos universitetas, 2007 m.
41. Vidutinė šalies kuro (žaliavos) kaina. Valstybinė kainų ir energetikos kontrolės komisija. Prieiga internete: <http://www.regula.lt/siluma/Puslapiai/kuro-ir-perkamos-silumos-kainos/vidutine-salies-kuro-zaliavos-kaina.aspx> (žiūrėta 2017–05–20).

## 8 PRIEDAI

### 8.1 Priedas Nr.1. Eksperimentinių tyrimų rezultatai



## 8.2 Priedas Nr. 2. Akredituotos laboratorijos kietųjų dalelių monitoringo rezultatai



UAB "Ekopaslauga" įm. kodas 300137906  
 Taikos pr. 4, 50187 Kaunas  
 Tel. (8~37) 311558, 8 618 24959, 8 623 44455  
 El. paštas: uabekopaslauga@gmail.com

### STACIONARIŲ APLINKOS ORO TARŠOS ŠALTINIŲ IŠMETAMŲ TERŠALŲ TYRIMŲ REZULTATŲ PROTOKOLAS NR. 22

Mėginių paėmimo ir matavimų data: 2017-02-14

Tyrimo atlikimo data: 2017-02-15

UAB "Danpower Baltic Biruliškių", Biruliškių g. 18A, LT-52174 Kaunas

2 lapas iš 4

Mėginių registracijos laboratorijoje Nr.	Matavimo laikas (pradžia, pabaiga)	Taršos šaltinio Nr.	Katilo tipas, galingumas, MW	Kuro rūšis	Teršalo pavadinimas	Nustatymo metodas	Koncentracija, mg/Nm <sup>3</sup>	O <sub>2</sub> koncentracija, tūrio %	Koncentracija, perskaičiuota prie standartinių sąlygų, (6% O <sub>2</sub> ), mg/Nm <sup>3</sup>	Vidutinė koncentracija, perskaičiuota prie standartinių sąlygų, (6% O <sub>2</sub> ), mg/Nm <sup>3</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
422	9.50-10.20	001 po ekonomizerio	Katilas Nr.1 "Danstoker" TVBH-F, 19,5 MW, apkrova matavimo metu ~19,5MW	Smulkinta mediena	Kietosios dalelės (A)	LAND 28-98/M-08. Svorio	3,26	6,7	3,41	3,41

Matavimo vieta	Vidutinis srauto greitis, m/s	tortakyje, °C	Δpstatinis, hPa	Ortakio matmenys, m	Drėgmės kiekis, tūrio %	Sausų dujų tūrio debitas normaliomis sąlygomis, Nm <sup>3</sup> /s
po katilo Nr.1 ekonomizerio	10,72	51	0,527	Ø1,30	10,18	10,958

