



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

**Stasys Jusevičius**

**Biokurą naudojančio įrenginio darbo parametrų analizė**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Doc. Kęstutis Buinevičius

**KAUNAS, 2017**

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

**Biokurą naudojančio įrenginio darbo parametrų analizė**

Baigiamasis magistro projektas  
Termoinžinerija (kodas 621E30001)

**Vadovas**

(parašas) Doc. Kęstutis Buinevičius  
(data)

**Recenzentas**

(parašas) Prof. Gintautas Miliauskas  
(data)

**Projektą atliko**

(parašas) Stasys Jusevičius  
(data)

**KAUNAS, 2017**



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

(Fakultetas)

Stasys Jusevičius

(Studento vardas, pavardė)

Terminžinerija, 621E30001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Biokurą naudojančio įrenginio darbo parametrų analizė“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. gegužės 22 d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Stasio Jusevičiaus** baigiamasis projektas tema „Biokurą naudojančio įrenginio darbo parametrų analizė“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o 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)

# MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

**Tvirtinu:** \_\_\_\_\_  
Šilumos ir atomo energetikos (parašas, data)  
katedros vedėjas Doc.dr. 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 „Biokurą naudojančio įrenginio darbo parametrų analizė“ .....  
.....  
Patvirtinta 2017 ... m. balandžio ..... mėn. 21 .... d. dekanų įsakymu Nr.V25-11-8 .....  
2. Darbo tikslas: ištirti įvairių režiminių parametrų ir darbo sąlygų įtaką biokuro katilų efektyvumo rodikliams. Atlikti kuro drėgnumo įtaką šilumos mainams katilė įvertinančius šiluminius skaičiavimus. ....  
3. Darbo struktūra. Įvadas. Aplinkos taršos su katilų degimo produktais mažinimo galimybių tyrimas. Šilumos nuostolių nuo biokuro katilo paviršių tyrimas. Katilo šiluminio efektyvumo įvertinimas , nustatant naudingumo koeficientą. Katilo šiluminiai skaičiavimai kintant kuro drėgnumui. Katilo darbo parametrų tyrimai kintant kuro drėgnumui ir frakcinei sudėčiai. Išvados.....  
.....  
4. Reikalavimai ir sąlygos. Darbas atliekamas surenkant pasirinktos katilinės (-ių) eksploatacinius duomenis, atliekami reikalingi katilo (-ų) parametrų matavimai ir tyrimai. Atliekami katilo šiluminiai skaičiavimai.. Atliekami katilo (-ų) NOx , CO ir kietųjų dalelių emisijų ir kuro laboratoriniai tyrimai .. .....  
.....  
5. Užbaigto darbo pateikimo terminas: 2017 m. gegužės mėn. 25 d.

6. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo darbo dalis.

Išduota studentui Stasiui Jusevičiui.....

Užduotį gavau Stasys Jusevičius.....  
(studento vardas, pavardė) (parašas) (data)

Vadovas doc. Kęstutis Buinevičius .....  
(pareigos, vardas, pavardė) (parašas) (data)

Stasys Jusevičius. Biokurą naudojančio įrenginio darbo parametrų analizė. Magistro baigiamasis projektas / vadovas Doc. Kęstutis Buinevičius; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: Energijos inžinerija

Reikšminiai žodžiai: biokuras, katilinė, teršalai, ekonomizaizeris, multiciklonas.

Kaunas, 2017. 76 p.

## **SANTRAUKA**

Baigiamajame darbe apžvelgta teršalų emisijų analizė, atlikti du tyrimai – masės dulkių koncentracijos ir teršalų koncentracijos dūmuose, taip pat atliktas multiciklono efektyvumo skaičiavimas. Antroje dalyje atliktas 8 MW vertikalių vandens šildymo katilų šilumos nuostolių nuo išorinių paviršių tyrimas. Trečioje dalyje apskaičiuota biokuro katilams naudingumo koeficientai prie tam tikrų parametrų. Katilinė suprojektuota ir sumontuota Kauno mieste. Katilinės paskirtis – šilumos gamyba ir tiekimas į Kauno miesto centralizuoto šilumos tiekimo tinklus ištisus metus – tiek šildymo, tiek ir nešildomo sezono metu. Visą darbo laikotarpį į tinklus atiduodama iki 20 MW šilumos – iki 16 MW pagamintų vandens šildymo katilų ir iki 4 MW kondensacinis ekonomizaizeris, kurio galia priklauso nuo grįžtančio iš tinklų termofikacinio vandens temperatūros kuro drėgnumo. Ketvirtajam ir penktajam tyrime atliktas katilo šiluminiai skaičiavimai kintant kuro drėgnumui. Šeštajam tyrime atliktas katilo darbo parametrų tyrimai kintant kuro drėgnumui ir frakcinei sudėčiai. Visi tyrimai atlikti pagerinti katilinės darbo parametrų darbą. Katilinės darbas būtų efektyvus ir naudingas, turi būti kontroliuojami biokurą naudojančio įrenginio darbo parametrai.

Stasys, Jusevičius. *Analysis of Operation Parameters for Plant Using Biofuel*. Master's thesis / supervisor Doc. Kęstutis Buinevičius. The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Research area and field: Energy Engineering

Key words: biofuel, boiler room, pollutants, economiser, multi-cyclone.

Kaunas, 2017. 76 p.

## SUMMARY

The final work overviews the analysis of polluting emissions and includes two studies – concentration of the mass dust and concentration of pollutants in smoke as well as calculation of multi-cyclone performance. Section 2 presents the research of heat losses from external surfaces of 8 MW vertical water heating boiler. Section 3 provides the calculation of the efficiency ratio of biofuel boilers in case of certain parameters. The boiler house was designed and installed in the city of Kaunas. The purpose of the boiler house is the production of heat and supply to the centralised heating networks of Kaunas city – both during heating and non-heating seasons. During the entire period of work, up to 20 MW of heat is provided to the network – up to 16 MW produced by water heating boilers and up to 4 MW produced by condensation economisers the capacity of which depends on the temperature of the return heating water and fuel moisture. The fourth and fifth researches present the performance of thermal calculation of boiler in case of variation of fuel moisture. The sixth research includes the study of operating parameters of the boiler in case of variation of fuel moisture and fractional composition. All researches were performed in order to improve the operating parameters of the boiler house. For the work of the boiler house to be effective and useful, it is necessary to control the operating parameters of the biofuel-consuming equipment.

# TURINYS

ĮVADAS.....	9
LENTELIŲ SĄRAŠAS.....	10
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....	11
1. TERŠALAI BIOKURO KATILINĖSE.....	12
1.1. Toksogenai.....	12
1.2. Teršalų koncentracijos dūmuose tyrimas .....	14
1.3. Dulkių masės koncentracijos tyrimas .....	16
1.4. Multiciklono veikimo principas ir paskirtis.....	20
1.5. Dulkių masės koncentracijos gauti tyrimo duomenys ir analizė .....	21
1.6. Multiciklono efektyvumo skaičiavimas.....	25
2. 8MW VERTIKALIŲ VANDENS ŠILDYMO KATILŲ ŠILUMOS NUOSTOLIŲ NUO IŠORINIŲ PAVIRŠIŲ TYRIMAS .....	27
2.1. Darbo metodika .....	27
2.2. Katilinės Nr.1 vertikalaus katilo VHB 8000 ir pakuros tyrimas .....	28
2.3. Katilinės Nr.2 vertikalaus katilo AK8000P ir pakuros tyrimas.....	31
3. BIOKURO KATILO NAUDINGUMO KOEFICIENTO APSKAIČIAVIMO METODIKA.. .....	36
3.1. Katilinės Nr. 1 aprašymas.....	38
3.2. Katilinės Nr.1 vandens šildymo katilų VHB 8000 techniniai duomenis.....	38
3.3. Dūmų kondensacinio ekonomizerio CEB 4000 aprašymas ir techniniai duomenys ....	39
3.4. Katilinės Nr.1 grafikų analizė.....	40
3.5. Katilinės Nr.1 vandens šildymo katilų VHB 8000 NK skaičiavimo rezultatai .....	44
4. KATILINĖS NR.1 KATILO VHB 8000 IR PAKUROS SKAIČIAVIMAS ESANT 50 PROC. KURO DRĖGMEI.....	47
4.1. Pakuros skaičiavimas.....	47
4.1.1. Kuro degimo skaičiavimas .....	47
4.1.2. Degimo produktų entalpija.....	49
4.1.3. Pakuros šiluminis balansas.....	51
4.1.4. Šilumos nuostoliai .....	52
4.2. Katilo šiluminis skaičiavimas .....	53
4.2.1. Katilo šiluminis balansas.....	53
4.2.2. Katilo pirmos eigos šilumos mainų kaitrovamzdyje skaičiavimas .....	54
4.2.3. Šilumos mainų antrame vamzdelių pluošte skaičiavimas .....	59
4.2.4. Šilumos mainų trečiame konvekciniame pluošte skaičiavimas .....	63

5. KATILINĒS NR.1 KATILO VHB 8000 IR PAKUROS SKAIČIAVIMAS ESANT 30 PROC. KURO DRĒGMEI.....	68
6. KATILINĒS NR.1 TYRIMAS. ELEKTROS SUVARTOJIMAS DĒL KURO FRAKCIJOS. .....	71
IŠVADOS.....	74
LITERATŪROS SĀRAŠAS.....	75
PRIEDAI.....	76



## IVADAS

Šio darbo aktualumas grindžiamas atsižvelgiant į Lietuvoje vykdomą biokuro įsisavinimo ir panaudojimo strategijos tikslą – iki 2020 metų importuojamą brangų kurą (dujas), pakeisti vietiniu biokuru (medžio atliekas) tam, kad visa reikiama šiluma būtų pasigaminama naudojant biokurą. Pastaraisiais metais Lietuva įvykdė didelį proveržį šioje biomasės srityje, nes šiuo metu šilumos sektoriuje biokuras sudaro apie 65 proc. ir tai yra 6 kartus daugiau negu 2004 metais, kuomet ši dalis siekė apie 10 procentų, tad Lietuvoje panaikinta priklausomybė nuo dujų šilumos ūkio sektoriuje. [13]

Remiantis šiomis biokuro katilinių plėtros tendencijomis galima teigti, kad ši tema tampa itin aktuali, nes labai svarbu, kad visose statomose biokuro deginimo katilinėse būtų diegiamos ekonomiškiausios ir moderniausios biokuro deginimo technologijos, kurių dėka būtų pasiektas didžiausias naudingumo koeficientas bei užtikrinama maža oro tarša.

Vienas svarbiausių faktorių yra katilinės efektyvus darbas tiriant darbo parametrus ir katilų režimus, darant analizes, diegiant naujas technologijas, galima pasiekti didesnę katilo NK ir tinkamai išnaudoti katilinės darbą ir sąnaudas.

Suskaičiuota katilo NK prie tam tikrų parametrų. Nustatyta 8 MW galios vandens šildymo katilo šilumos mainų paviršiai prie 30 % ir 50 % kuro drėgmės. Atlikta termovizinis tyrimas nustatant katilo šilumos nuostolius į aplinką. Atlikta teršalų emisijų analizė ir tyrimas. Atliktas elektros sąnaudos nuo kuro frakcijos. Visi tyrimai atlikti, pagerinti katilinės darbo parametrų darbą. Katilinės darbas būtų efektyvus ir naudingas, turi būti kontroliuojami biokurą naudojančio įrenginio darbo parametrai.

## LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Iš kurą deginančių įrenginių, kurių nominali šiluminė galia lygi arba viršija 1 MW, bet nesiekia 50 MW, išmetamų teršalų ribinės vertės.....	13
1.2. lentelė. 2018 metais įsigaliojančios išmetamų teršalų ribinės vertės .....	14
1.3 lentelė. Gauti tyrimo duomenys su prietaisu Testo 350XL.....	15
1.4. lentelė. Gauti tyrimo rezultatai iš KD matuoklio Isokinetic G4 .....	21
1.5 lentelė. SCADA programos duomenys .....	22
1.6 lentelė. SCADA programos duomenys .....	22
1.7 lentelė. SCADA programos duomenys, apskaičiuoti su Flue gas programa. ....	22
1.8 lentelė. Multiciklono efektyvumo rezultatai .....	26
2.1 lentelė. Katilo VHB 8000 techniniai duomenys.....	28
2.2 lentelė. Pakuros techniniai duomenis .....	28
2.3 lentelė. Nuostoliai nuo išorinių paviršių, tyrimo rezultatai .....	31
2.4 lentelė. Katilo AK8000P techniniai duomenys .....	32
2.5 lentelė. Pakuros PKS10 techniniai duomenys.....	32
2.6 lentelė. Nuostoliai nuo išorinių paviršių, gauti tyrimo rezultatai .....	34
3.1 lentelė. Katilinės Nr.1 parametrų savaitiniai vidurkiai katilams BK-1 ir BK-2 VHB 8000 ...	44
3.2 lentelė. BK-1 katilo skaičiavimo rezultatai .....	44
3.3 lentelė. BK-2 katilo skaičiavimo rezultatai .....	45
4.1 lentelė. Sausos masės elementinė sudėtis.....	47
4.2 lentelė. Kuro elementinė sudėtis .....	47
4.3 lentelė. Specifinė šiluma .....	49
4.4 lentelė. Teorinė dūmų entalpija.....	49
4.5 lentelė. Tikrosios dūmų entalpijos .....	50
5.1 lentelė. Teorinė dūmų entalpija esant 30 proc. kuro drėgmei .....	68
5.2 lentelė. Tikrosios dūmų entalpijos esant 30 proc. kuro drėgmei.....	68
5.3 lentelė. Kuro degimo, pakuros balanso, katilo balanso skaičiavimo rezultatai esant 30 proc. kuro drėgmei .....	69
5.4 lentelė. Šilumos mainų kaitrovamzdyje skaičiavimo rezultatai esant 30 proc. kuro drėgmei	69
5.5 lentelė. Šilumos mainų antros eigos vamzdelių pluošte skaičiavimo rezultatai esant 30 proc. kuro drėgmei .....	70
5.6 lentelė. Šilumos mainų trečios eigos vamzdelių pluošte skaičiavimo rezultatai esant 30 proc. kuro drėgmei .....	70
6.1 lentelė. Duomenys iš SCADA programos.....	71
6.2 lentelė. Gauti matavimo rezultatai .....	71

## PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Matavimo paėmimo vieta .....	14
1.2 pav. Azoto oksidų ir anglies oksidų koncentracijos dūmuose priklausomybė nuo deguonies koncentracijos dūmuose .....	15
1.3 pav. Azoto oksidų koncentracijos dūmuose priklausomybė nuo deguonies koncentracijos dūmuose .....	16
1.4 pav. Automatinio izokinetinio ėminių ėmimo sistemos Tecora schema.....	17
1.5 pav. Dūmų matavimo vietos už katilo ir multiciklono .....	18
1.6 pav. Matavimo įranga ir biokuras .....	18
1.7 pav. Multiciklono reguliuojančių sklendžių pozicija .....	19
1.8 pav. Multiciklono schema .....	19
1.9 pav. Multiciklono užsikimšimo atvejai .....	21
1.10 pav. Dūmų slėgio perkritis priklausomai nuo ciklono sklendžių pozicijos.....	23
1.11 pav. Dūmsiurbio apkrovimas Hz priklausomai nuo ciklono sklendžių pozicijos .....	23
1.12 pav. Kietųjų dalelių koncentracija priklausomai nuo ciklono sklendžių pozicijos .....	24
1.13 pav. Srauto greitis priklausomai nuo ciklono sklendžių pozicijos .....	24
2.1 pav. Plokščių paviršių šilumos atidavimo koeficiento priklausomybė nuo temperatūros $W/(m \cdot K)$ .....	27
2.2 pav. Katilinės Nr. 1 pakuros ir katilo jungties nuotraukos ir termogramos .....	29
2.3 pav. Katilinės Nr. 1 pakuros šoninių sienelių nuotraukos ir termogramos .....	30
2.4 pav. Katilinės Nr. 1 katilo nuotraukos ir termogramos .....	31
2.5 pav. Katilinės Nr. 2 pakuros ir katilo jungties nuotraukos ir termogramos .....	33
2.6 pav. Katilinės Nr. 2 pakuros šoninių sienelių nuotraukos ir termogramos .....	33
2.7 pav. Katilinės Nr. 2 katilo nuotraukos ir termogramos .....	34
2.8 pav. Katilų palyginimas esant tam tikrai izoliacijai .....	35
3.1 pav. Vandens šildymo katilo konstrukcinė schema .....	39
3.2 pav. BK-1 katilo NK priklausomybė nuo katilo apkrovimo .....	40
3.3 pav. BK-2 katilo NK priklausomybė nuo katilo apkrovimo .....	41
3.4 pav. Kondensacinio ekonomizerio galios ir efektyvumo priklausomybė nuo katilinės NK vidurkio .....	42
3.5 pav. Kondensacinio ekonomizerio efektyvumo priklausomybė nuo kuro drėgmės lyginant su katilinės NK vidurkiu .....	42
3.6 pav. Kondensacinio ekonomizerio reikšmė katilinėje.....	43
3.7 pav. Dūmų kondensacinio ekonomizerio pelnas .....	43
6.1 pav. Bendri kuro frakcijos vaizdai .....	72
6.2 pav. Katilo BK-1 ir BK-2 elektros dienos vidurkio priklausomybė nuo kuro frakcijos ilgio .....	72
6.3 pav. Sausos ir drėgnos masės tankių priklausomybė nuo kuro frakcijos dyžio .....	73
6.4 pav. Kondensacinio ekonomizerio elektros ir šilumos vidurkių priklausomybė nuo kuro drėgmės .....	73

# 1. TERŠALAI BIODUKURO KATILINĖSE

## 1.1. Toksogenai

Deginant biokurą (medienos skiedras) degimo metu išsiskiria teršalai (toksogenai), kurie yra išmetami į aplinką. Išsiskiriantys teršalai [16]:

**Sieros oksidai (SO<sub>2</sub>).** Šis toksogenas turi poveikį žmogaus sveikatai, priklausomai nuo jo koncentracijos atmosferos ore ir poveikio laiko. Esant atmosferos ore vidutinei metinei 0,08 mg/m<sup>3</sup> koncentracijai, atsiranda mažesnis matomumas ir prasideda kvėpavimo takų, akių bei gleivinės erzinimas. Esant vidutinei metinei 0,1 mg/m<sup>3</sup> koncentracijai, sutrinka kvėpavimo organų funkcijos. Esant vidutinei paros 0,25-0,5 mg/m<sup>3</sup> koncentracijai, pablogėja sergančių kvėpavimo takų ligomis būseną. Esant vidutinei paros 0,5 mg/m<sup>3</sup> koncentracijai, padažnėja hospitalizacija ir padidėja mirtingumas. Tačiau deginant medienos skiedras šis toksogenas atsiranda tik deginant siringą medieną arba sieros turinčias medienos kuro priemaišas.

SO<sub>2</sub> gerokai žalingesnis augmenijai. Jis suardo lapuose ir spygliuose esantį chlorofilą, o dėl to pažeidžiamas lapų ir spyglių paviršius. SO<sub>2</sub> mažiau kenkia lapuočiams medžiams, kasmet numetantiems lapus. Spygliuočiams medžiams SO<sub>2</sub> sutrikdo fotosintezę ir medžiai per 2 – 3 metus nudžiūna.

**Azoto oksidai (NO<sub>x</sub>).** Degimo procese daugiausia susidaro azoto monoksido (NO) - apie 70 – 90 proc., jis iš dalies oksiduoja į NO<sub>2</sub> katilo dūmtakiuose ir išmetamas per kaminą. Dėl saulės radiacijos ir ozono įtakos atmosferoje jis virsta į pastovesnį junginį NO<sub>2</sub>, kuris ir sudaro atmosferos užteršimą. NO yra toksogenas, tačiau žymiai silpnesnis. Kadangi atmosferoje vyrauja NO<sub>2</sub>, tai kartu sąlyginai suskaičiuojamas ir dūmuose esantis NO, o jų suma žymima NO<sub>x</sub>.

Su oro drėgme NO<sub>2</sub> sudaro azoto rūgštį, kuri yra pavojingas toksogenas žmogaus sveikatai, nes jis veikia kvėpavimo takus, plaučių alveoles, sukelia plaučių pabrinkimą. Tačiau labiausiai azoto oksidas veikia kraujyje, jungdamasis su hemoglobinu sutrikdo organizmo aprūpinimą deguonimi.

Dėl azoto oksidų atsiranda ypač pavojingas atmosferos užterštumas – smogas.

Azoto oksidai žalingai veikia ne tik žmogų, bet ir augalus. Gali sukelti chlorozę (gelsta lapai), taip pat dėl NO<sub>x</sub> susidaro rūgštūs lietūs ir taip teršiamas žemės paviršius ir vanduo bei sumažėja derlingumas.

**Anglies monoksidas (CO).** Tai yra ne visiško degimo produktas. Žmogaus organizmą jis veikia per kraują taip pat kaip ir azoto oksidai. CO poveikiui ypač jautrūs žmonės, sergantys širdies nepakankamumu, taip pat vaikų organizmas. Net nedidelės CO koncentracijos gali sukelti psichikos sutrikimus, galvos skausmus, padidinti jautrumą, širdies plakimą, o gaunamos didesnės koncentracijos ilgesnį laiką – mirtį.

**Kietosios dalelės (KD).** Šio toksogeno poveikis žmogui daugiausia pasireiškia tuo, kad sustiprina toksogenų žalingą poveikį. Dulkės erzina ir suardo odą, kvėpavimo takus bei akis, taip palengvina patogeninių mikrobu patekimą į organizmą. Smulkios dalelės, ilgai veikdamos organizmą, gali užkimšti odos poras ir sutrikdyti prakaitavimą. Nuo 10 iki 30 proc. dulkių, patekusių kvėpavimo metu per nosį, nusėda plaučiuose, kaupiasi alveolėse, taip pažeidžia jų funkciją.

Atmosferoje esančios dulkės veikia žemės klimatą, nes atspindi dalį saulės radiacijos, taigi, žemė gauna mažiau šilumos, pažeminio oro temperatūra mažėja.

Visi šie degimo metu išsiskiriantys toksogenai yra pavojingi žmogaus sveikatai, atmosferai bei gamtai. Norint užtikrinti, kad kuras būtų deginamas efektyviai, yra naudojami moderniausi dūmų valymo įrenginiai. Šie toksogenai yra normuojami pagal LAND 43-2013 „Išmetamų teršalų iš kurų deginančių įrenginių normos“. 1.1 lentelėje pateikti šiuo metu galiojančių išmetamų teršalų normų duomenys [14].

1.1 lentelė. Iš kurų deginančių įrenginių, kurių nominali šiluminė galia lygi arba viršija 1 MW, bet nesiekia 50 MW, išmetamų teršalų ribinės vertės.

Kuro rūšis	Kurų deginančio įrenginio nominali šiluminė galia, MW	Išmetamų teršalų ribinė vertė, mg/Nm <sup>3</sup>								Standartinė O <sub>2</sub> koncentracija, tūrio proc.
		SO <sub>2</sub>		NO <sub>x</sub>		CO		KD		
		Esamas įrenginys	naujas įrenginys	Esamas įrenginys	Naujas įrenginys	esamas įrenginys	Naujas įrenginys	esamas įrenginys	naujas įrenginys	
Dujinis kuras	1 ≥ MW < 50	-	35 <sup>1</sup>	350	350	400	400	-	20 <sup>5</sup>	3%
Skystas kuras	1 ≥ MW < 20	1700 <sup>2</sup>	1700	650	450 <sup>2</sup>	500	500	250	200	3%
	20 ≥ MW < 50	1700 <sup>2</sup>	1700	650	450 <sup>2</sup>	400	400	250	100	
Kietas kuras	1 ≥ MW < 20	2000	2000	650 <sup>3</sup>	650 <sup>3</sup>	2000 <sup>4</sup>	1000 <sup>4</sup>	700	400	6%
	20 ≥ MW < 50	2000	2000	650 <sup>3</sup>	650 <sup>3</sup>	1500	1000	500	300	

Sutartinių ženklų paaiškinimai

<sup>1</sup> Deginant mažo kaloringumo dujas, gazifikacijos būdu gautas iš atliekų perdirbimo, kokso krosnių dujas, aukštakrosnių dujas – 800 mg/Nm<sup>3</sup>.

<sup>2</sup> Dūmavamzdžių katilams – 750 mg/Nm<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> Deginant biokurą – 750 mg/Nm<sup>3</sup>.

<sup>4</sup> Deginant biokurą – 4 000 mg/Nm<sup>3</sup>.

<sup>5</sup> Ribinės vertės laikymosi kontrolė privaloma, kai nustatoma viršyta CO ribinė vertė.

Nuo 2018 metų sausio mėnesį įsigalios nauja direktyva 2015/2193 - vidutinės galios kurų deginantiems įrenginiams (VKDI) nuo 1 iki 50 MW galios. Pagal Europos Sąjungos normas tam

tikrų išmetamų teršalų normos bus griežtinamos dar labiau. Direktyvos projekte reikalavimai teršalų koncentracijoms numatomi griežtesni už šiuo metu galiojančias normas LAND 43-2013: SO<sub>2</sub> – griežtėja nuo 1,5 iki 5 kartų, NO<sub>x</sub> – biokurui nesikeičia, dujoms griežtėja 3,5 karto, KD – griežtėja iki 10 kartų, CO – nelieka normavimo. Naujų normų duomenys pateikti 1.2 lentelėje [15].

1.2. lentelė. 2018 metais įsigaliojančios išmetamų teršalų ribinės vertės

Kuro rūšis	Kurą deginančio įrenginio nominali šiluminė galia, MW	Išmetamų teršalų ribinė vertė, mg/Nm <sup>3</sup>			
		SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	KD
Kietas kuras	1 ≥ MW < 50	200	650	-	30

## 1.2. Teršalų koncentracijos dūmuose tyrimas

Šiame darbe buvo atlikti teršalų koncentracijų dūmuose matavimai. Darbo tikslas - nustatyti katilinės esamų įrenginių (dviejų katilų po 8MW ir kondensacinio ekonomaizerio 4MW) išmestuose dūmuose esančių teršalų koncentracijas. Matavimai buvo atlikti dūmų pavyzdžių paėmimo vietoje. 2.1 pav. naudojantis „TESTO 350 XL“ dūmų analizatoriumi.

Darbe buvo atlikti matavimai, kaip kinta CO, NO<sub>x</sub> (NO + NO<sub>2</sub>) koncentracijos dūmuose priklausomai nuo deguonies koncentracijos dūmuose. Buvo atlikti 8 matavimai.

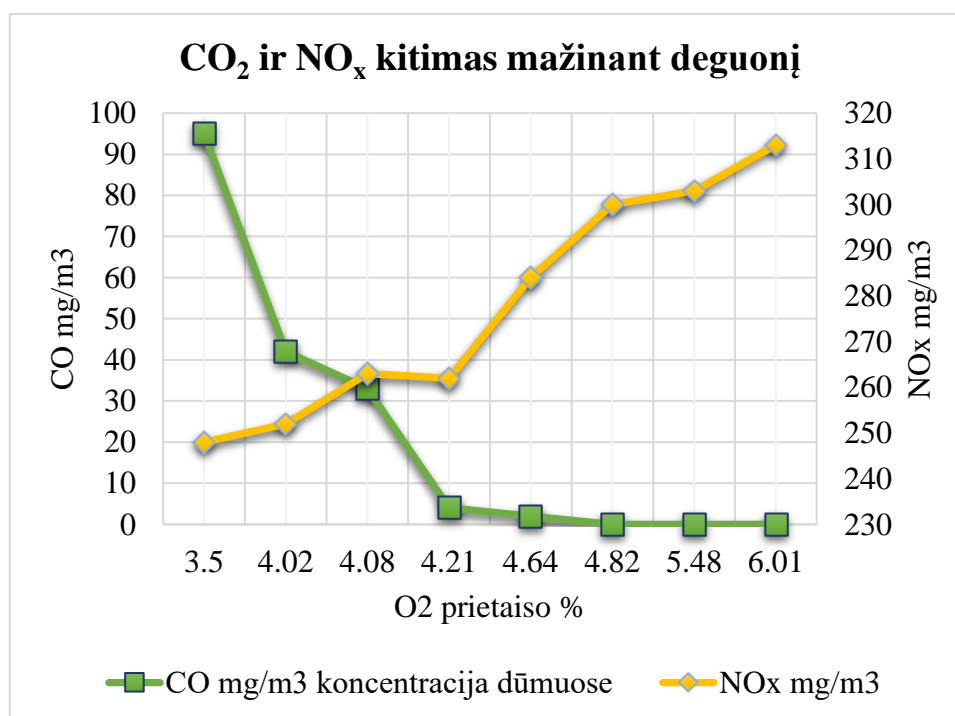


1.1 pav. Matavimo paėmimo vieta

1.3 lentelė. Gauti tyrimo duomenys su prietaisu Testo 350XL

El. Nr.	O <sub>2</sub> prietaiso %	CO mg/m <sup>3</sup>	NO koncentracija dūmuose mg/m <sup>3</sup>	NO <sub>2</sub> koncentracija dūmuose mg/m <sup>3</sup>	NO <sub>x</sub> mg/m <sup>3</sup>
1	6,01	0	308	4,5	313
2	5,48	0	298	4,3	303
3	4,82	0	295	4,1	300
4	4,64	2	281	2,9	284
5	4,21	4	259	3,4	262
6	4,08	33	254	3	263
7	4,02	42	249	2,8	252
8	3,5	95	245	2,6	248

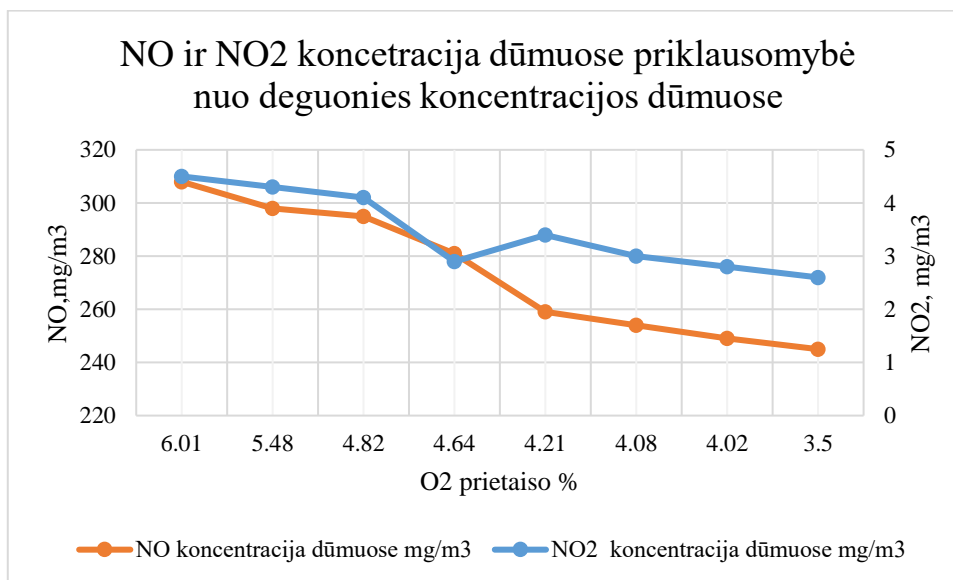
Atlikus matavimus nustatyta, kad aplinkosauginiu požiūriu optimaliausia dirbti, kai deguonies yra apie 4,82 proc., nes normatyvuose NO<sub>x</sub> riba - 650 mg/m<sup>3</sup>, o darytame tyrime gauname 295 mg/m<sup>3</sup>. Matoma, kiek kartų neviršijama riba, o dėl CO<sub>2</sub> kuras visiškai sudega.



1.2 pav. Azoto oksidų ir anglies oksidų koncentracijos dūmuose priklausomybė nuo deguonies koncentracijos dūmuose

Atlikus matavimus matyti, kad mažėjant deguonies koncentracijai dūmuose CO koncentracija dūmuose didėja. Didžiausia CO koncentracija (95 mg/m<sup>3</sup>) buvo esant 3,5 proc. deguonies koncentracijai. Kaip matome iš grafiko ir tyrimo, kuo daugiau mažinsime deguonį, tuo daugiau atsiras CO, tai daro didelę įtaką išmetimams dūmuose, tačiau kartu mažėja NO<sub>x</sub>.

Padarius tyrimą iš gautų duomenų matome, jog mažinant deguonies koncentraciją dūmuose NO<sub>x</sub> koncentracija mažėja. Didžiausia NO<sub>x</sub> koncentracija (313mg/m<sup>3</sup>) dūmuose, prie deguonies koncentracijos (6,01) proc. Sumažinus deguonies koncentraciją iki 3,5 proc. buvo sumažinta NO<sub>x</sub> 245mg/m<sup>3</sup>.



1.3 pav. Azoto oksidų koncentracijos dūmuose priklausomybė nuo deguonies koncentracijos dūmuose

Atlikę tyrimą matome, jog mažinat deguonį mažėja NO. Didžiausia NO koncentracija 308 mg/m<sup>3</sup> yra esant 6,01proc. deguonies koncentracijai. Kaip matome iš grafiko, kuo daugiau mažinsime deguonį, tuo labiau mažės NO koncentracija.

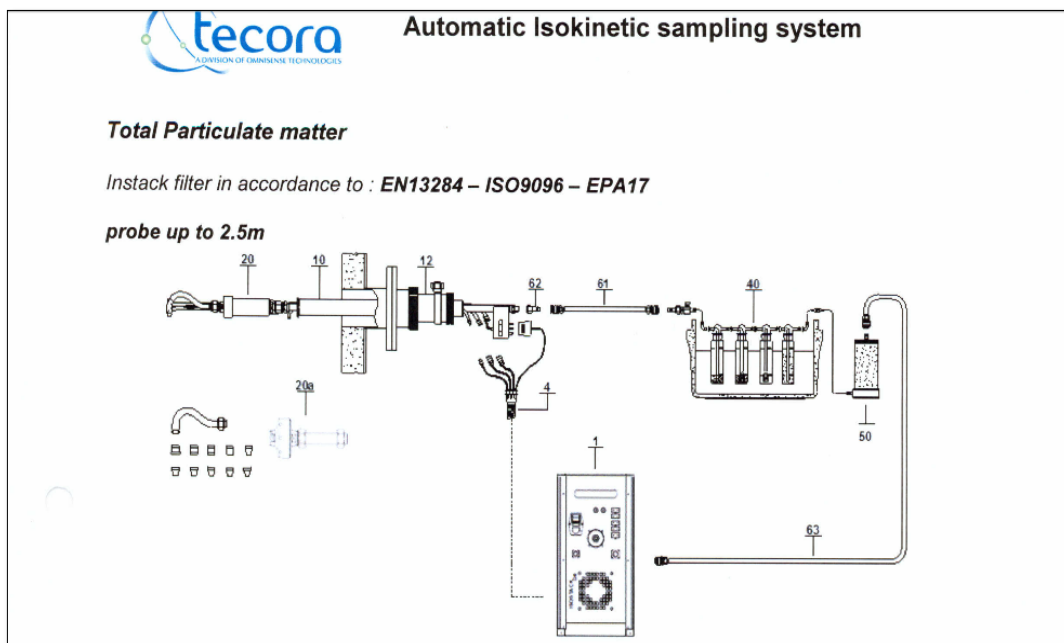
Padarę tyrimą, iš gautų duomenų matome, jog mažinant deguonies koncentraciją dūmuose NO<sub>2</sub> koncentracija mažėja. Didžiausia NO<sub>2</sub> koncentracija (4,5mg/m<sup>3</sup>) dūmuose, prie deguonies koncentracijos 6,01 proc. Sumažinus deguonies koncentraciją iki 3,5 proc. buvo sumažinta NO<sub>2</sub> 2,6 mg/m<sup>3</sup>.

### 1.3. Dulkių masės koncentracijos tyrimas

Tyrimo aprašymas, darbo eiga.

Dujų srauto ėminys matuojamą laiko tarpą imamas iš pagrindinio dujų srauto reprezentatyviuose ėminio ėmimo taškuose, izokinetiškai kontroliuojant srautą ir matuojant tūrį. Dujų ėminyje esančios dulkės atskiriamos prieš tai pasvertu plokščiu filtru, kuris vėliau išdžiovinamas ir dar kartą pasveriamas. Ėminio ėmimo įrangoje iki filtro prieš srautą nusėdusios dulkės tai pat surenkamos ir pasveriamos. Padidėjusi filtro masė ir iki filtro prieš srautą nusėdusių dulkių masė priskiriama iš tiriamų dujų surinktoms dulkėms; tai sudaro galimybę apskaičiuoti dulkių koncentraciją.





1.4 pav. Automatinio izokinetinio ėminių ėmimo sistemos Tecora schema

- 1 - Automatinis bandinių ėmiklis Isostack G4;
- 10 - Integruotas kamino ėmimo zondas;
- 20a - 47mm plokščiasis filtras Filtro laikiklis, komplektas 8 antgaliai;
- 20 - 30 x 100 kapsulės filtro laikiklis, komplektas 8 antgaliai;
- 12 - Šliaužiklis ir užrakto įrenginys iki 2,5 m universalaus flanšo;
- 62 - Greita montavimo jungtis;
- 40 - Nešiojami aušinimo įrenginiai, keturi vakuuminių kolbų rinkiniai;
- 4 - Kabelis G4;
- 50 - 1 lt. Silikagelinė drėgmės gaudyklė;
- 61 - Silicio siurbimo vamzdis T max., 180 diam.,;
- 63 - Siurbimo vamzdis;



1.5 pav. Dūmų matavimo vietos už katilo ir multiciklono

Buvo atlikti matavimai už katilo ir multiciklono darinėjant dūmų srauto kiekį reguliuojančios sklendes, 1.7 pav. buvo nustatomas srauto greitis, tūrio debitas bei kietųjų dalelių koncentracija, taip suskaičiuotas ciklono efektyvumas.



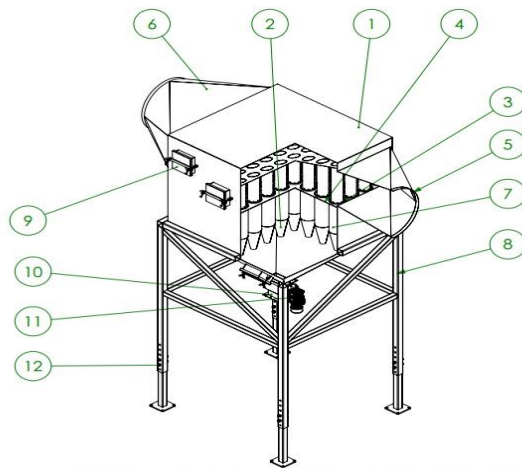
1.6 pav. Matavimo įranga ir biokuras

Buvo atlikti kietųjų dalelių matavimai. Kai kuras geras, mažėja kietųjų dalelių koncentracija dūmuose, jei stambi kuro frakcija, pelenų gabaliukai lieka dideli. Taip prastėja pelenų gabalėlių pašalinimas iš pakuros, dėl to mažėja dalelių koncentracija.



1.7 pav. Multiciklono reguliuojančių sklendžių pozicija

Šiame multiciklone yra sumontuotos dūmų srauto kiekį reguliuojančios sklendės, jos leidžia uždaryti arba atidaryti dūmų kelią per šonines baterijas. Katilui dirbant pastoviu, mažesniu nei 50 proc., apkrovimu rekomenduojama sklendes uždaryti, kad galima būtų padidinti dūmų valymo efektyvumą.[3]



1 pav. Multiciklono pjūvis: 1 - Korpusas; 2 - Kūgis; 3 - Mentė; 4 - Plokštė, skirianti įėjimo ir išėjimo kameras; 5 - Įėjimo kanalas; 6 - Išėjimo kanalas; 7 - Cilindras; 8 - Rėmas; 9 - Revizinės durelės; 10 - Dozatorius; 11 - Motoreduktorius; 12 - fiksavimo varžtai; 13 - Veržlė.

1.8 pav. Multiciklono schema

#### **1.4. Multiciklono veikimo principas ir paskirtis**

Įrangos aprašymas:[3]

Multiciklono paskirtis – pašalinti nesudegusias kuro dalis ir pelenus iš išmetamų į aplinką dūmų. Multicikloną sudaro nelaidus dūmams pagrindas, ciklono elementai, surinkimo kūgis ir atrama.

Dūmų srautas patenka į padavimo kanalą ir įėjimo kamerą. Įėjimo kameroje dūmų srautas paskirstomas ir pro kreipiančiąsias mentes patenka į ciklono elementus, kur generuojama sukurtinė srovė. Dėl smulkias pelenų daleles veikiančios išcentrinės jėgos jos priartėja prie ciklono elemento korpuso, netenka kinetinės energijos ir nukrenta į surinkimo kūgį. Išvalyti dūmai iš ciklono elemento keliauja į išleidimo kamerą ir tolyn išleidimo kanalu. Labai svarbu, kad darbo metu multiciklonas būtų švarus, nes taip sumažinamos elektros energijos, kurią sunaudoja dūmsiurbis, sąnaudos. Multiciklonas dažniausiai įrengiamas tarp katilo ir dūmsiurbio.

Tuo atveju, jei dūmų sudėtyje yra vandens lašelių, kanalai tarp kreipiančiųjų multiciklono elementų gali užsikimšti, nes drėgmės dalelės prikimba prie paviršiaus, todėl multiciklonas negali atlikti savo funkcijos.

Baterinio ciklono konstrukcija suvirinta iš lakštinio plieno, vamzdžių ir valcuotės. Gaminio aukštis reguliuojamas su rėmo konstrukcija ir fiksuojamas varžtu su veržle.

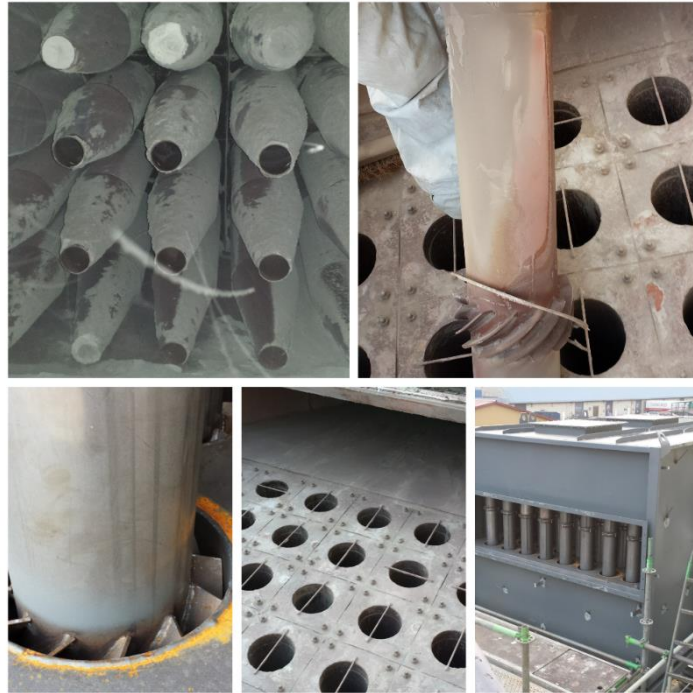
Multiciklono elementuose dūmų užsikimimui naudojami „sparnelių“ tipo su 45° kampu sumontuotomis 8-mis mentėmis įsukimo elementai.

Ant multiciklono įmontuotas vibracinis motoras, kurio paskirtis neleisti pelenams kauptis ant multiciklono sienelių.

Multiciklono pelenų šalinimo sistema pradeda veikti, kai suveikia pelenų lygio daviklis arba periodiškai nustatytu laiku.

Suveikus pelenų lygio davikliui pradeda veikti vibracinis motoras, pelenų dozatorius ir sraigtnis pelenų transporteris, kol pasiekiamas žemas pelenų lygis multiciklono kūgyje.

Jei per tam tikrą laiką nepradeda veikti pelenų lygio daviklis, tuomet pelenų šalinimo sistema vis tiek pradės veikti nustatytu laiku. Jei nesuveikia pelenų lygio daviklis, tai gali nulemti jo gedimas arba mažas pelenų kiekis multiciklono kūgyje.[3]



1.9 pav. Multiciklono užsikimšimo atvejai

Taip gali nutikti, jeigu katilo (pakuros) vidaus mūro plyšiai (įtrūkimai) yra užkamšomi vata, o ne specialiu mišiniu. Tuomet trauka ištraukia vatos gabaliukus ir galiausiai jie atsiduria ciklono dūmų užsikimo mentėse, dėl to dūmai praeina per mažiau celių ir ciklonas dirba neefektyviai. Tai galima pamatyti iš dūmų perkričio per cikloną, nes jis dirba neefektyviai.

### 1.5. Dulkių masės koncentracijos gauti tyrimo duomenys ir analizė

Matavimas atliktas su BK 1, Multiciklonas T290. Pateikti duomenys, gauti eksperimentų metu 2016 metais spalio 25 dieną, yra apytiksliai.

1.4. lentelė. Gauti tyrimo rezultatai iš KD matuoklio Isokinetic G4

Mata- vimo nr.	Matavimo taškas	Celių skai- čius	Multiciklono sklendžių pozicija	Dalelių koncen- tracija, mg/m <sup>3</sup>	Absoliuti- nis slėgis ortakyje, kPa	Statinis slėgis ortakyje, kPa	Srau- to grei- tis, m/s	Orta- kyje, °C
1	Prieš multicikloną	55	Viena uždaryta	79	101,04	-0,592	11,95 4	162
2	Už multiciklono	55	Viena uždaryta	52	100,257	-1,36	13,31 4	163
3	Už multiciklono	66	Abi atviros	43	100,378	-1,21	13,45 2	164
4	Už multiciklono	44	Uždarytos 2 sklendės	63	100,187	-1,396	11,37 9	164
5	Prieš multicikloną	66	Abi atviros	88	100,879	-0,69	11,57 1	168



Duomenys imti iš SCADA programos pagal KD matavimo laiką. Kuro drėgmė išskaičiuojama iš abiejų katilų, vėliau ta drėgmė panaudojama skaičiuojant vieno katilo debitus. Matavimo vidurkiai.

SCADA - katilinės valdymo ir duomenų saugojimo programma.

1.5 lentelė. SCADA programos duomenys

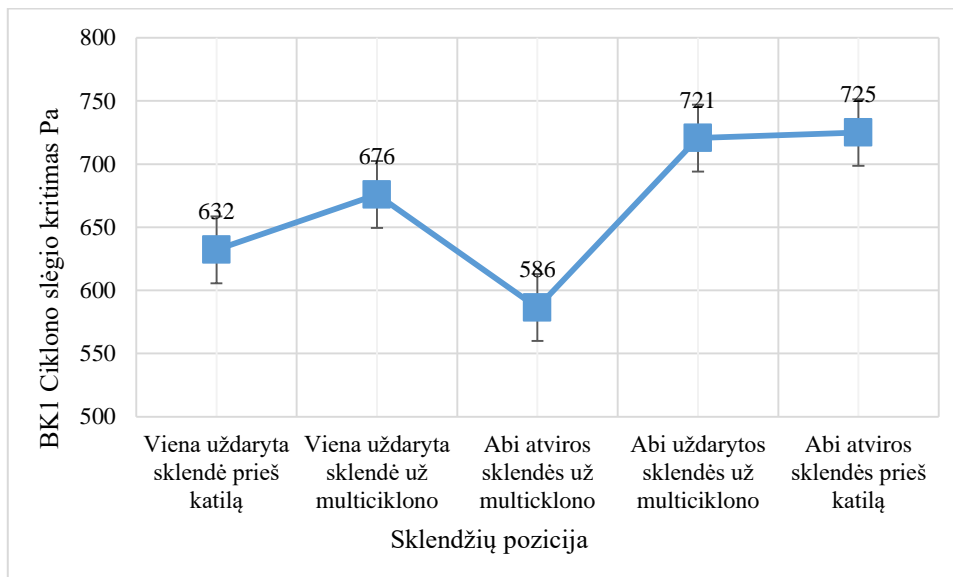
Matavimo nr.	BK1 Šiluminė galia, MW	BK2 Šiluminė galia, MW	Už BK1 Dūmų temp., C	Už BK2 Dūmų temp., C	Už BK1 O <sub>2</sub> , %	Už BK2 O <sub>2</sub> , %	BK1 Ciklono slėgio kritimas, Pa	BK2 Ciklono slėgio kritimas, Pa	Santykis BK1 slėgis/galia, Pa/MW	Santykis BK2 slėgis/galia, Pa/MW
1	7,5	7,5	161	156	5,0	5,1	632	525	84	70
2	7,5	7,7	165	167	5,0	4,9	676	739	90	97
3	7,9	7,5	160	155	5,0	5,0	586	518	74	69
4	7,6	7,4	164	162	5,0	4,8	721	692	95	94
5	8,0	7,4	167	160	5,0	5,1	725	596	91	80

1.6 lentelė. SCADA programos duomenys

Už ekonomizerio dūmų temp., C	Ekonomizerio šiluminė galia, MW	Dūmsiurbis B1, Hz	Dūmsiurbis B1, A	Dūmsiurbis B2, Hz	Dūmsiurbis B2, A	BK1 elektra, kW/MW	BK2 elektra, kW/MW
39,3	4,6	29,43	50,17	29,43	50,17	5,9	5,1
39,3	5,2	30,81	52,33	30,81	52,33	5,0	6,7
38,9	4,5	28,50	48,18	28,50	48,18	4,1	5,1
39,4	4,8	30,65	52,07	30,65	52,07	4,8	8,4
39,5	4,9	31,26	52,68	31,26	52,68	5,2	6,0

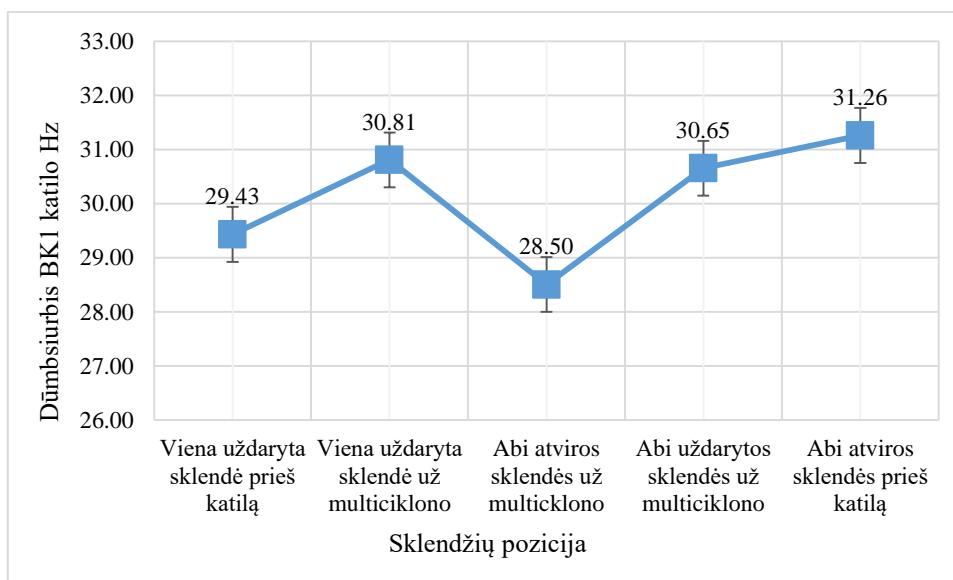
1.7 lentelė. SCADA programos duomenys, apskaičiuoti su Flue gas programa.

Matavimo nr.	Celių skaičius	Debitas be rec., tik BK1, m <sup>3</sup> /h	Debitas su rec., m <sup>3</sup> /h. Skaičiuojant siekiama temp. 1050 rec apie 158 (t iš dūmų uz katilo)	Kuro drėgmė, %	O <sub>2</sub> , in wet gas, %	Drėgmė in dry gas, g/kg	Water content, weight %/kg dry gas	Debitas celei, m <sup>3</sup> /h.	Debitas celei, m <sup>3</sup> /s	Įtekėjimo greitis celei, m/s; kai įtek. plotas 0.017051 m <sup>2</sup>
1	55	50245	59332	52	5	182	18,23	914	0,254	14,88
2	55	53603	60403	54		191	19,13	975	0,271	15,88
3	66	49892	60146	50		174	17,4	756	0,210	12,32
4	44	51901	61428	53		186	18,67	1180	0,328	19,22
5	66	53265	63041	53		186	18,67	807	0,224	13,15



1.10 pav. Dūmų slėgio perkritis priklausomai nuo ciklono sklendžių pozicijos

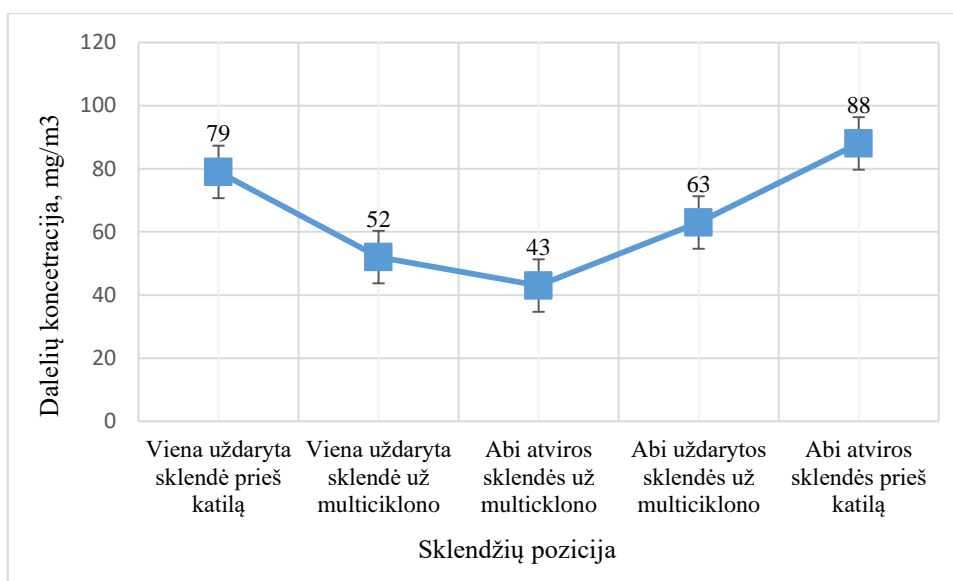
Atlikus tyrimą matyti, kaip kinta slėgis, junginėjant sklendes tam tikromis pozicijomis. Didžiausias slėgis buvo už multiciklono, kai abi sklendės uždarytos - 721 Pa. Mažiausias slėgis buvo, kai abi sklendės atviros už multicklono - 586 Pa. Tokį kitimą galėjo lemti aerodinaminis pasipriešinimas. Kai sklendės uždaromos, tada išauga aerodinaminis pasipriešinimas, o kai sklendės atviros, sumažėja aerodinaminis pasipriešinimas.



1.11 pav. Dūmsiurbio apkrovimas Hz priklausomai nuo ciklono sklendžių pozicijos

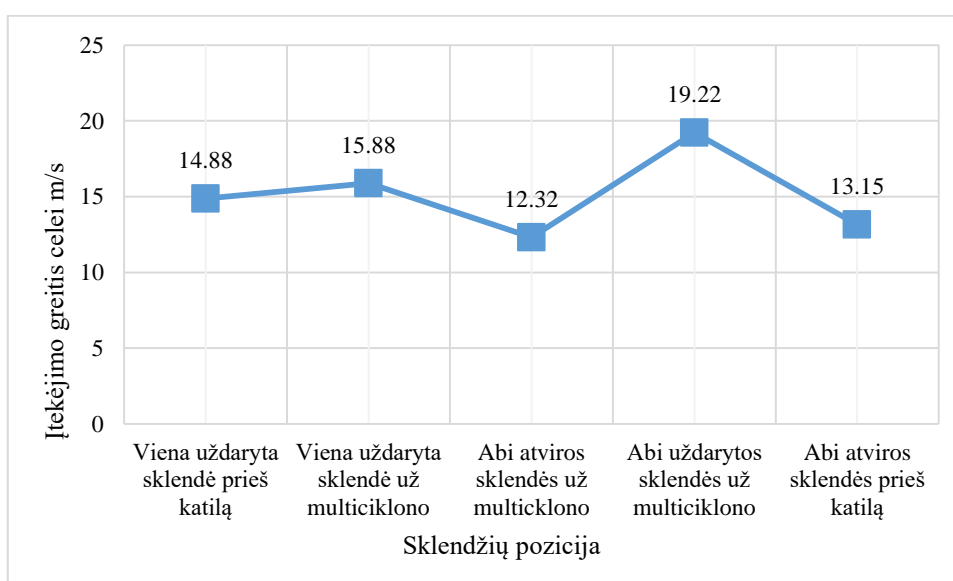
Kaip matome iš tyrimo, didžiausias apkrovimas yra, kai viena sklendė uždaryta už multiciklono - 30,81 Hz, o mažiausias apsikrovimas, kai abi sklendės atviros už multiciklono- 28,50Hz. Dūmsiurbis palaiko reikiamą trauką pakuroje, sudegusio produkto išmetimą į kaminą. Traukai matuoti pakuroje yra įrengti du traukos davikliai, pagrindinis ir pagalbinis, galima

pasirinkti vieną arba kitą daviklį. Dūmsiurbis apsikraudamas arba nusikraudamas palaiko reikiamą trauką pakuroje – 50 Pa. Pakuros ventiliavimo metu užduota trauka pakuroje – 60 Pa.



1.12 pav. Kietųjų dalelių koncentracija priklausomai nuo ciklono sklendžių pozicijos

Atlikus matavimus matyti, kad kietosios dalelės pasiskirsto esant tam tikrai sklendžių pozicijai. Didžiausia dalelių koncentracija, kai abi sklendės atidarytos prieš katilą - 88 mg/m<sup>3</sup>, o mažiausia dalelių koncentracija, kai abi sklendės atidarytos už multicklono - 43 mg/m<sup>3</sup>. Didžiausią dalelių koncentraciją galėjo nulemti katilo našumas, kai atidarytos abi sklendės prieš katilą, katilas dirbo esant 7,4 MW, o esant abiem atviroms sklenėms už multicklono katilas dirbo 7,5 MW. Pridarius sklendes turėtų sumažėti kietųjų dalelių išmetimas, bet gauta priešingai – kai atidarytos sklendėmis, valoma geriausiai.



1.13 pav. Srauto greitis priklausomai nuo ciklono sklendžių pozicijos



Iš tyrimo rezultatų matyti, kaip kinta srauto greitis. Didžiausias įtekėjimo greitis celei, kai abi uždarytos sklendės už multiciklono - 19,22 m/s, o mažiausias įtekėjimo greitis celei, kai abi sklendės atviros už multiciklono. Gali būti, jog +/- 20 mg/m<sup>3</sup> yra per žemos koncentracijos pamatyti tą efektą arba per didelis įtekėjimo greitis ciklone – 19,22 m/s (kai normaliai būna 12-15 m/s) ir pasiurbia pelenus iš bunkerio per trumpąsias ciklonų tūtas. Reikėtų pailginti tūtas, kad matytųsi efektyvumas.

### 1.6. Multiciklono efektyvumo skaičiavimas

Skaičiavimo metodika ir formulės imtos iš [18-19]:

Oro teršalų valymo įrenginių darbo efektyvumo skaičiavimas:

Faktinis valymo efektyvumas (proc.) apskaičiuojamas iš lygties:

$$h = \left( 1 - \frac{C_{išein.} \cdot V_{išein.}}{C_{įein.} \cdot V_{įein.}} \right) * 100\% \quad (1.1)$$

Čia:

*h* - valymo efektyvumas, procentais;

*C<sub>įein.</sub>* ir *C<sub>išein.</sub>* - teršalo koncentracijos prieš ir po valymo (nustatytos matavimais) mg/Nm<sup>3</sup> arba g/Nm<sup>3</sup>;

*V<sub>įein.</sub>* ir *V<sub>išein.</sub>* - išmetamų dujų tūris prieš ir po valymo, Nm<sup>3</sup>/s;

Dujų tūrio debitas *V*, m<sup>3</sup>/s, ortakyje apskaičiuojamas, nustatant vidutinį dujų srauto greitį ir ortakio skerspjūvio plotą, pagal formules:

$$V = w_{vid.} * F \text{ m}^3/\text{s}, \quad (1.2)$$

$$V = w_0 * \alpha_{vid.} * F, \quad (1.3)$$

$$F = \pi r^2 \quad (1.4)$$

Čia:

*w<sub>vid.</sub>* – vidutinis dujų srauto greitis ortakyje, m/s;

*w<sub>0</sub>* – dujų srauto greitis ortakio centre, m/s;

*F* – ortakio skerspjūvio plotas, m<sup>2</sup>;

*vid* – greičių pasiskirstymo skerspjūvyje koeficientas.

Dujų tūrio debitas normaliosioms sąlygoms perskaičiuojamas pagal formulę:

$$V = 0,36 \frac{V(P \pm \Delta P)}{273 + t} \quad (1.5)$$

*V<sub>0</sub>* – dujų tūrio debitas, perskaičiuotas normaliosioms sąlygoms (0oC, 760 mmHg), m<sup>3</sup>/s.

Duomenys skaičiavimams paimti iš 5.1 lentelės.

1.8 lentelė. Multiciklono efektyvumo rezultatai

<b>Sklandė viena uždaryta</b>			
<i>Už katilo</i>			
Dūmtakio skersmuo, m	0,96	Srauto temperatūra dūmtakyje, °C	162
Srauto greitis dūmtakyje, m/s	11,954	Slėgis dūmtakyje, kPa	101,04
Tūrio debitas, Nm <sup>3</sup> /s	5,42	Kietosios dalelės mg/m <sup>3</sup>	79
<i>Už multiciklono</i>			
Dūmtakio skersmuo, m	0,91	Srauto temperatūra dūmtakyje, °C	163
Srauto greitis dūmtakyje, m/s	13,314	Slėgis dūmtakyje, kPa	100,257
Tūrio debitas, Nm <sup>3</sup> /s	5,37	Kietosios dalelės mg/m <sup>3</sup>	52
<b>Efektyvumas</b>	<b>42,11</b>		
<b>Sklandės abi atviros</b>			
<i>Už katilo</i>			
Dūmtakio skersmuo, m	0,96	Srauto temperatūra dūmtakyje, °C	168
Srauto greitis dūmtakyje, m/s	11,571	Slėgis dūmtakyje, kPa	100,879
Tūrio debitas, Nm <sup>3</sup> /s	5,17	Kietosios dalelės mg/m <sup>3</sup>	88
<i>Už multiciklono</i>			
Dūmtakio skersmuo, m	0,91	Srauto temperatūra dūmtakyje, °C	164
Srauto greitis dūmtakyje, m/s	13,452	Slėgis dūmtakyje, kPa	100,378
Tūrio debitas, Nm <sup>3</sup> /s	5,42	Kietosios dalelės mg/m <sup>3</sup>	43
<b>Efektyvumas</b>	<b>48,74</b>		

Pridarius sklendes turėtų sumažėti kietųjų dalelių išmetimas, bet gauta priešingai - atidarius sklendes valoma geriausiai.

Optimaliausias valymas yra esant abiem atidarytomis sklendėmis. Kaip matome iš gauto tyrimo rezultato, multiciklono efektyvumas yra 48,74 proc., o kai sklendės abi uždarytos, multiciklono efektyvumas yra mažesnis - 42,11 proc.

## 2. 8MW VERTIKALIŲ VANDENS ŠILDYMO KATILŲ ŠILUMOS NUOSTOLIŲ NUO IŠORINIŲ PAVIRŠIŲ TYRIMAS

### 2.1. Darbo metodika

- Darbo tikslas.

Ištirti šilumos nuostolius, prarandamus nuo katilo ir pakuros paviršių.

- Mokslinis darbo naujumas.

Mokslinėje literatūroje šilumos praradimai nuo katilo paviršių, vamzdžių ir pakuros sudaro 0,5 – 3 proc. NK. Šiuo tyrimu norima patikslinti, kiek nuo skirtingų gamintojų katilų paviršių prarandama šilumos.

- Tyrimo metodika.

Katilo ir pakuros paviršių temperatūros buvo išmatuotos termovizine kamera. Naudojant termovizinės kameros nuotraukas buvo suskaičiuoti šilumos nuostoliai nuo paviršiaus. Nuostoliai įvertinti katilo naudingumo skaičiuoklėje. Tyrimas atliktas biokuro katilinėse. Biokuro pakuros darbinis galingumas siekė 100 proc.

$$Q_5 = k \cdot F \cdot \Delta T; \quad (2.1)$$

Čia:

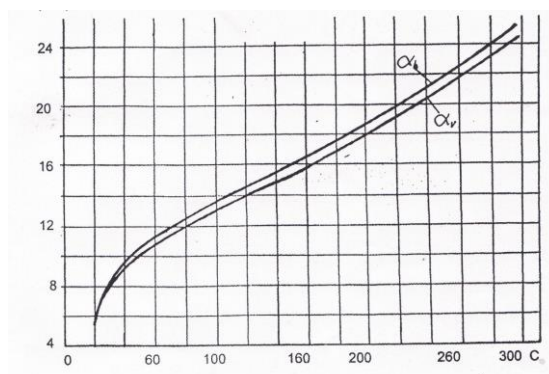
$Q_5$  – į aplinką perduodamas šilumos kiekis (šilumos nuostoliai į aplinką), kW;

$k$  – šilumos atidavimo koeficientas,  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ;

$F$  – katilo elemento paviršiaus plotas,  $m^2$ ;

$\Delta T$  – temperatūrų skirtumas tarp aplinkos ir katilo elemento paviršiaus.  $^\circ C$ .

$$q_5 = \frac{Q_5}{Q_A^n \cdot \frac{B_k}{3600}} \cdot 100\%; \quad (2.2)$$



2.1 pav. Plokščių paviršių šilumos atidavimo koeficiento priklausomybė nuo temperatūros  $W/(m \cdot K)$

## 2.2. Katilinės Nr.1 vertikalaus katilo VHB 8000 ir pakuros tyrimas

Padarytos 62 nuotraukos. Termogramos atliktos pakuros, katilo ir oro/dūmų vamzdžių išorinių paviršių. Tyrimas atliktas 2017-01-30. Šioje ataskaitoje pateikiamos katilo ir pakuros nuotraukos su termogramomis.

Vandens šildymo katilas yra vertikalus dūmų vamzdžių katilas.

2.1 lentelė. Katilo VHB 8000 techniniai duomenys

Galia	8 MW	Ekspluatacinė temperatūra	$t_d=130\text{ }^{\circ}\text{C}$	Katilo hidraulinis pasipriešinimas	0,3 bar
Didžiausias leidžiamasis slėgis	$P_s=12\text{ bar}$	Grįžtamo vandens temperatūra	$t_g=100\text{ }^{\circ}\text{C}$	Dūmų slėgio nuostoliai	900 Pa
Ekspluatacinis slėgis	$P_d=10\text{ bar}$	Katilo išmatavimai, m	3,65 x 7,5	Dūmų temperatūra už katilo	180 °C
Didžiausia leidžiamoji vandens temperatūra	$t_s=140\text{ }^{\circ}\text{C}$	Katilo agregato naudingumo koeficientas	85%	Katilo markė	VHB 8000

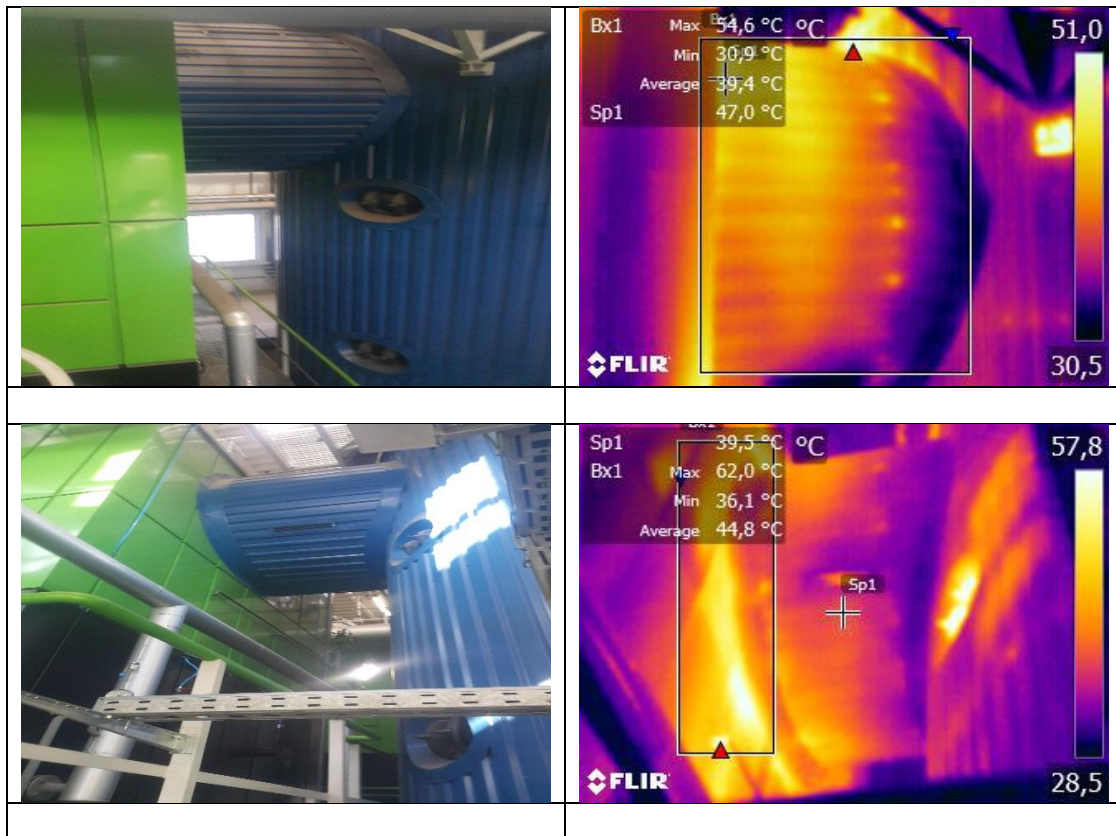
Biokuro pakura su judančiu ardynu suprojektuota įvairių biokuro rūšių, tokių kaip medienos skiedrų, smulkintų kirtimo atliekų, žievės, deginimui, kai kuro drėgnumas - 30÷60 proc.

2.2 lentelė. Pakuros techniniai duomenis

Projektinė galia	$Q_c=10\text{ MW}$
Apkrovimo diapazonas	25÷100%
Degimo produktų temperatūra už pakuros	Iki 1200 °C
Pakuros išmatavimai, m	9,12 x 6,8 x 4,0

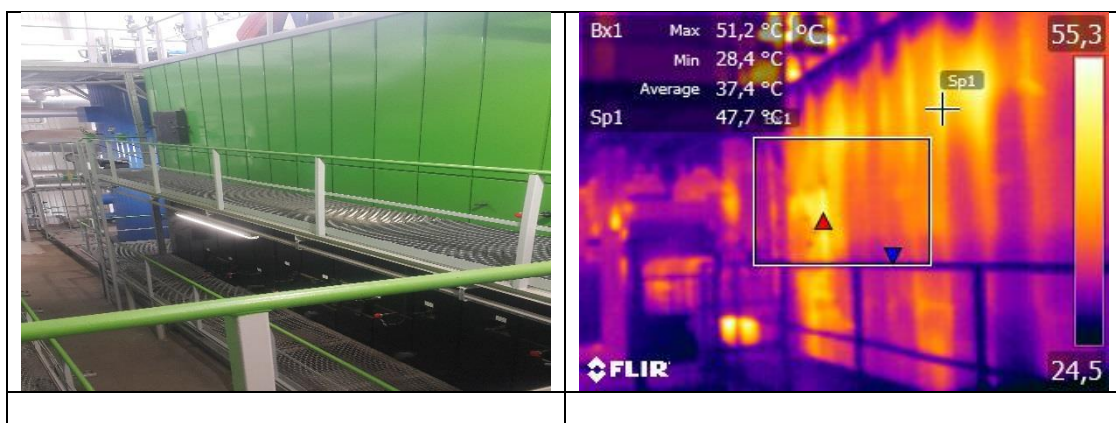
Jungtyje tarp pakuros ir katilo (2.2 pav.) maksimali temperatūra siekia 62 °C. Aukšta temperatūra spinduliuojama nuo pakuros galinės sienelės ir jungties. Ant pakuros galinės sienelės temperatūra pasiskirsto tolygiai. Nėra išskirtinių detalių. Lyginant su šonine sienele temperatūrų skirtumas siekia iki 22 laipsnių. Toks skirtumas gali atsirasti dėl mažesnio šiluminės izoliacijos kiekio arba tai dūmų srauto atsimušimo į galinę sienelę padarinys.

Jungties vamzdyje grioveliai spinduliuoja aukštesnę temperatūrą. Griovelių galuose temperatūra aukščiausia dėl prasčiausio paviršiaus šilumos nutekėjimo.

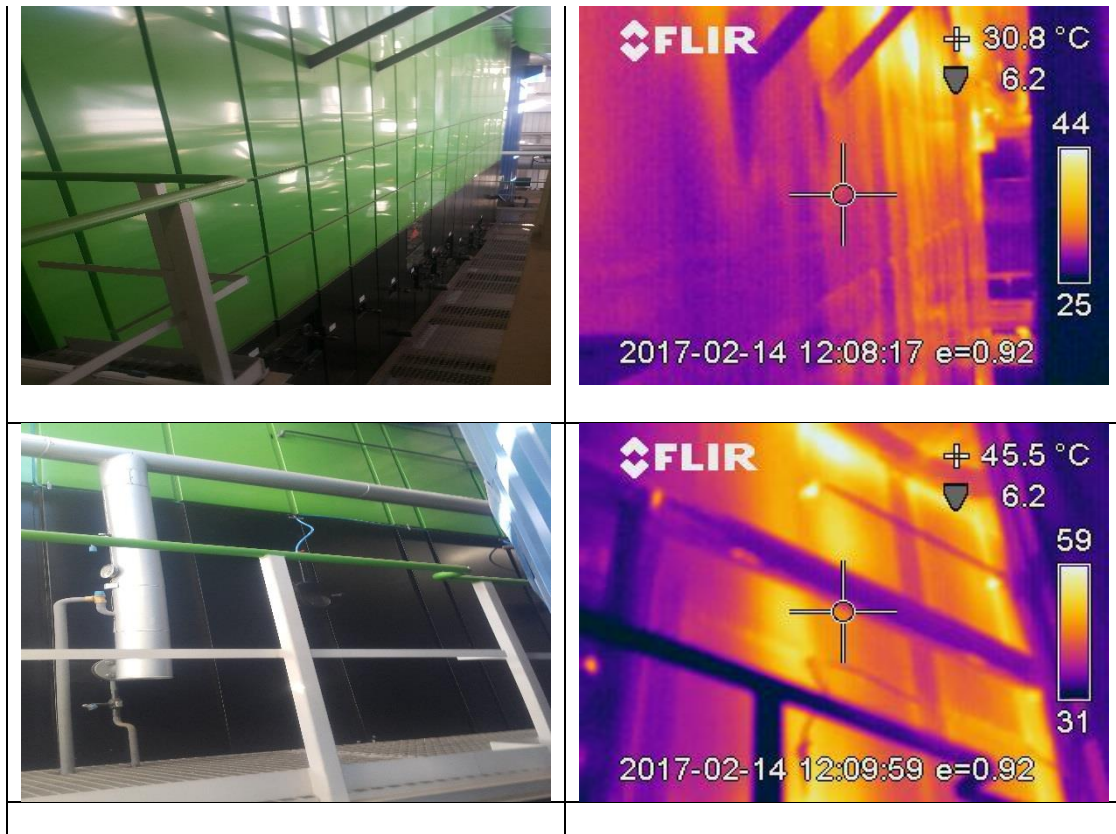


2.2 pav. Katilinės Nr. 1 pakuros ir katilo jungties nuotraukos ir termogramos

Pateikiamos pakuros šoninių sienelių nuotraukos ir termogramos (2.3 pav.). Maksimali sienelių temperatūra siekia apie 59 °C, bet yra detalių, kurios spinduliuoja ir aukštesnes temperatūras. Durelių maksimali temperatūra siekia 71,3 °C, atraminių detalių maksimali temperatūra siekia 62,5 °C. Aukščiausia temperatūra nuo pakuros sienelių spinduliuojama viršutinėje dalyje, nes aukščiausios temperatūros dėmai laikosi viršutinėje pakuros dalyje.

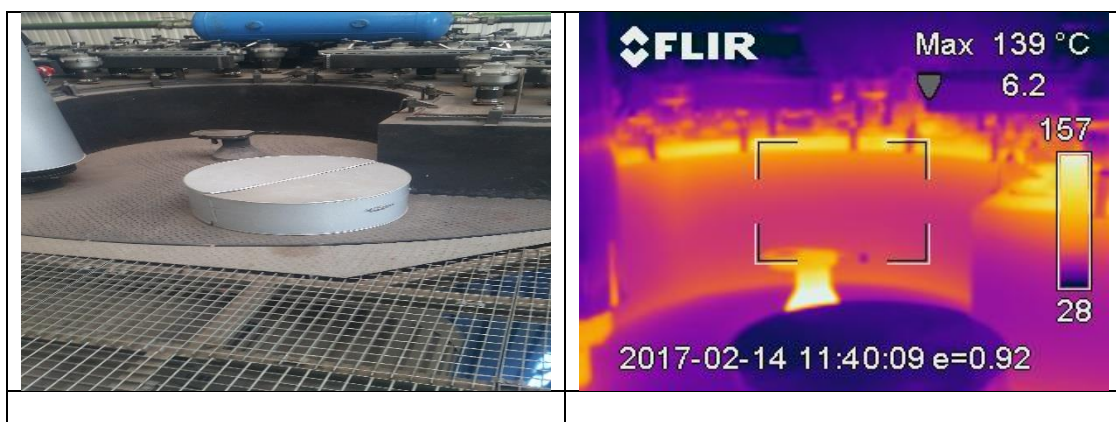


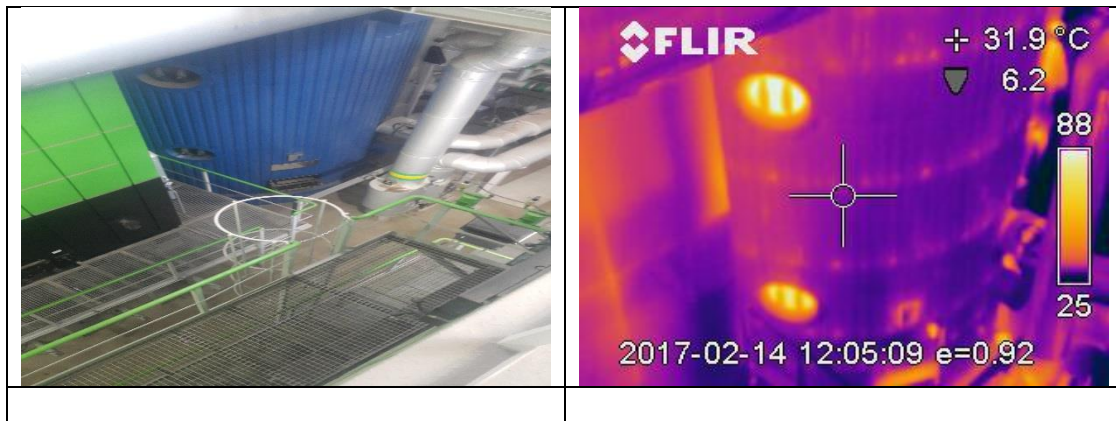




2.3 pav. Katilinės Nr. 1 pakuros šoninių sienelių nuotraukos ir termogramos

Toliau pateikiamos katilo nuotraukos ir termogramos (2.4 pav.). Katilo viršutinė dalis turi ypač aukštos temperatūros detalę, kurios maksimumas siekia 177,5 °C. Šios detalės plotas nėra didelis. Dūmų jungties kameros viršutinis dangtis, kuriame dūmai pereina iš antros eigos vamzdelių į trečios eigos vamzdelius, spinduliuoja iki 123,1 °C. Šie du plotai neturi šiluminio izoliacinio sluoksnio, todėl yra pasiekama aukšta temperatūra. Katilo šonai turi izoliacinį sluoksnį, kuris gerai apsaugo nuo šilumos išspinduliavimo. Ties atvamzdžiu šilumos atidavimas yra didesnis dėl galimo šiluminio izoliacinio sluoksnių sujungimo.





2.4 pav. Katilinės Nr. 1 katilo nuotraukos ir termogramos

Buvo vertinami rezultatai ir apskaičiuojami šilumos praradimai. Paviršiai suskirstomi į horizontalius ir vertikalūs dėl skirtingo šilumos atidavimo koeficiento. Atlikus skaičiavimą suminis šilumos paviršių nuostolis  $Q_5 = 53,45$  kW. Įvertinus visus katilo ir pakuros nuostolius tai sudaro apie 0,67 proc. Tad patirti šilumos nuostoliai nuo išorinių paviršių per metus - 4967,88 eurais, kai katilo izoliacija - 120 mm akmens vata. Katilas dirba 8000 valandų per metus, šilumos kainos metinis vidurkis 0,0116 Eur, aplinkos temperatūra 20 °C.

2.3 lentelė. Nuostoliai nuo išorinių paviršių, tyrimo rezultatai

Vertikalūs paviršiai	Plotas	m <sup>2</sup>	Sieneles temperatūra	°C	$\alpha_v$	$Q_5$	Šilumos nuostoliai į aplinką, kW	Kaina, Eur	Nuostoliai per metus, Eur
	F <sub>1</sub>	62,01	t <sub>p1</sub>	38	8,71	Q <sub>51v</sub>	9,72	0,1129	903,19
	F <sub>2</sub>	62,01	t <sub>p2</sub>	38	8,71	Q <sub>52v</sub>	9,72	0,1129	903,19
	F <sub>3</sub>	27,2	t <sub>p3</sub>	40	8,94	Q <sub>53v</sub>	4,87	0,0565	452,20
	F <sub>4</sub>	27,2	t <sub>p4</sub>	40	8,94	Q <sub>54v</sub>	4,87	0,0565	452,20
	F <sub>5</sub>	89,95	t <sub>p5</sub>	34	8,20	Q <sub>55v</sub>	9,86	0,1146	916,72
	F <sub>6</sub>	2,45	t <sub>p6</sub>	40	8,94	Q <sub>56v</sub>	0,44	0,0051	40,73
Iš viso:							39,47		3668,22
Horizontalūs paviršiai	Plotas	m <sup>2</sup>	Sieneles temperatūra	°C	$\alpha_v$	$Q_5$	kW	Eur	Nuostoliai per metus, Eur
	F <sub>1</sub>	36,48	t <sub>p1</sub>	35	8,69	Q <sub>51v</sub>	4,76	0,0552	441,93
	F <sub>2</sub>	10,45	t <sub>p2</sub>	80	12,72	Q <sub>52v</sub>	7,98	0,0927	741,47
	F <sub>3</sub>	6,66	t <sub>p3</sub>	40	9,39	Q <sub>53v</sub>	1,25	0,0145	116,27
Iš viso:							13,98		1299,66

### 2.3. Katilinės Nr.2 vertikalaus katilo AK8000P ir pakuros tyrimas

Padaryta 70 nuotraukų. Termogramos atliktos pakuroje, katile ir oro/dūmų vamzdžiuose. Tyrimas atliktas 2017-02-05. Šioje ataskaitoje pateikiamos katilo ir pakuros nuotraukos su termogramomis.

Vandens šildymo katilas yra vertikalus dūmų vamzdžių katilas.

2.4 lentelė. Katilo AK8000P techniniai duomenys

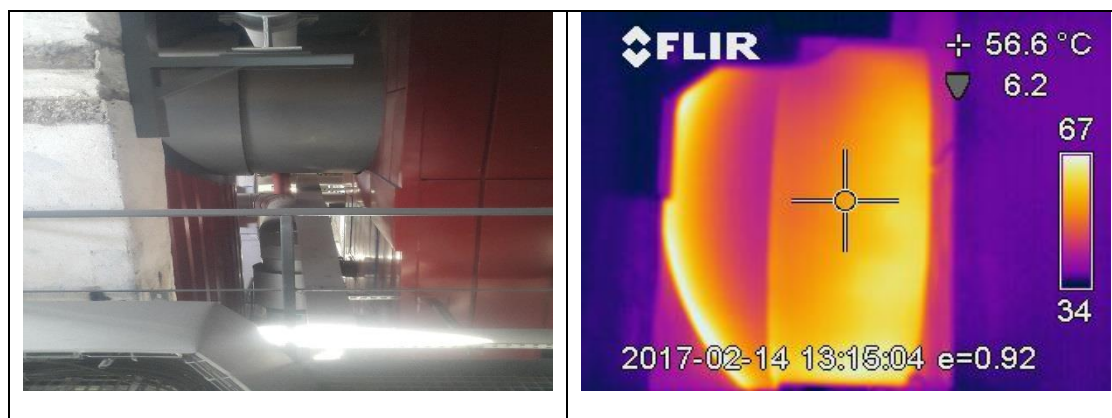
Galia	8 MW	Eksploatacinė temperatūra	$t_d=130\text{ }^{\circ}\text{C}$	Katilo hidraulinis pasipriešinimas	1,0 bar
Didžiausias leidžiamasis slėgis	$P_s=10\text{ bar}$	Grižtamo vandens temperatūra	$t_g=90\text{ }^{\circ}\text{C}$	Dūmų slėgio nuostoliai	1000 Pa
Eksploatacinis slėgis	$P_d=10\text{ bar}$	Katilo išmatavimai, m	3,5 x 7,5	Dūmų temperatūra už katilo	$180\text{ }^{\circ}\text{C}$
Didžiausia leidžiamoji vandens temperatūra	$t_s=130\text{ }^{\circ}\text{C}$	Katilo agregato naudingumo koeficientas	85%	Katilo markė	AK8000P

Biokuro pakura PKS 10 (Axis industries) su judančiu ardynu suprojektuota įvairių biokuro rūšių, tokių kaip medienos skiedrų, smulkintos kirtimo atliekos, žievės, deginimui. Drėgmės kiekis kure gali siekti iki 60 proc.

2.5 lentelė. Pakuros PKS10 techniniai duomenys

Projektinė galia	$Q_c=9,2\text{ MW}$
Apkrovimo diapazonas	30÷100%
Degimo produktų temperatūra už pakuros	900÷1100 $^{\circ}\text{C}$
Pakuros išmatavimai, m	9,0 x 6,0 x 3,3

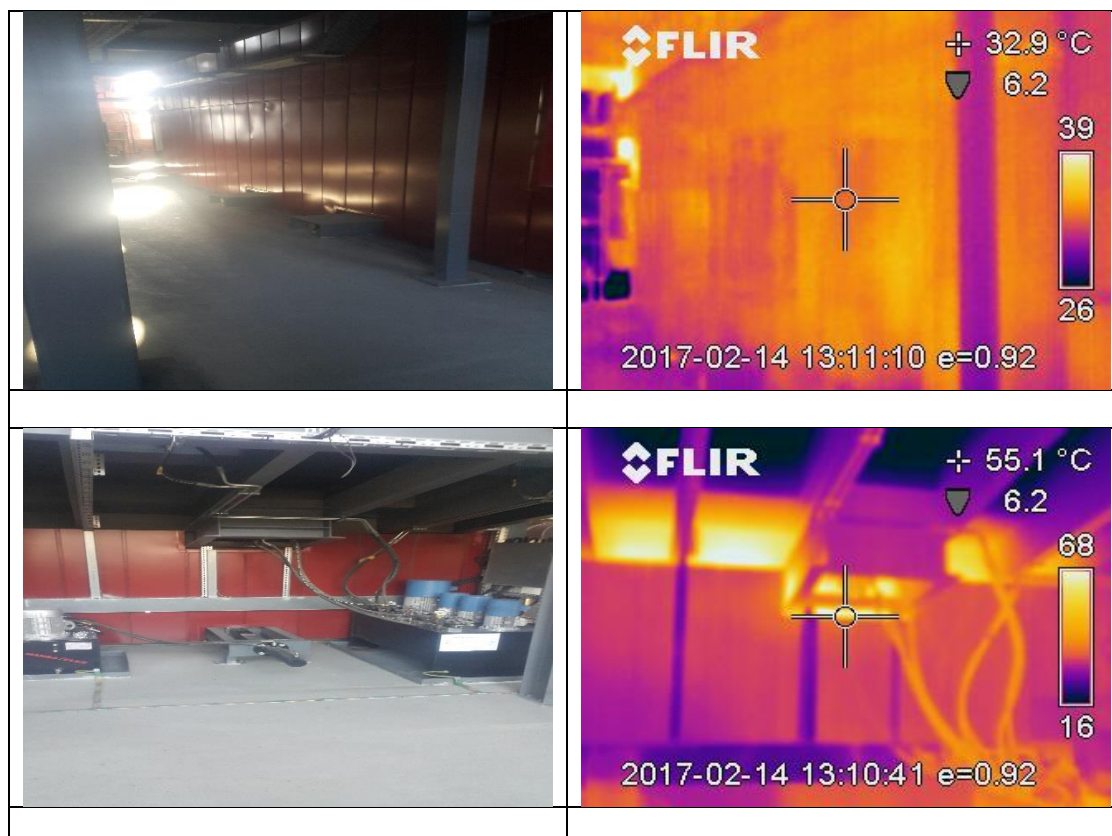
Jungtyje tarp pakuros ir katilo (2.5 pav.) maksimali temperatūra siekia 67  $^{\circ}\text{C}$ . Aukšta temperatūra spinduliuojama nuo pakuros galinės sienelės ir jungties. Ant pakuros galinės sienelės temperatūra pasiskirsto tolygiai. Nėra išskirtinių detalių. Lyginant su šonine sienele temperatūrų skirtumas siekia iki 31 laipsnio. Toks skirtumas gali atsirasti dėl mažesnio kiekio šiluminės izoliacijos arba tai dūmų srauto atsimušimo į galinę sienelę padarinys. Jungties vamzdyje grioveliai spinduliuoja aukštesnę temperatūrą. Griovelių galuose temperatūra aukščiausia dėl prasčiausio paviršiaus šilumos nutekėjimo.





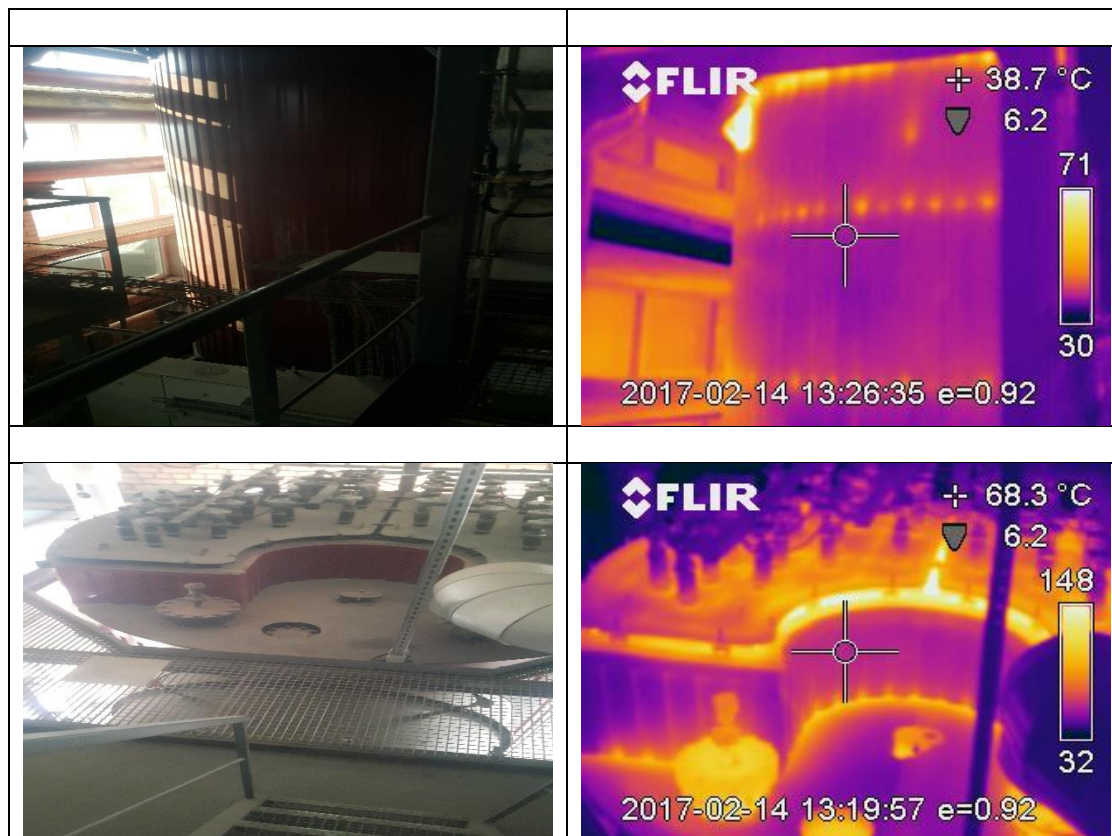
## 2.5 pav. Katilinės Nr. 2 pakuros ir katilo jungties nuotraukos ir termogramos

Pateikiamos pakuros šoninių sienelių nuotraukos ir termogramos (2.6 pav.). Sienelių maksimali temperatūra siekia apie 68°C, bet yra detalių, kurios spinduliuoja ir aukštesnes temperatūras. Durelių maksimali temperatūra siekia 88,7 °C, atraminių detalių maksimali temperatūra siekia iki 60 °C. Aukščiausia temperatūra nuo pakuros sienelių spinduliuojama viršutinėje dalyje, nes aukščiausios temperatūros dūmai laikosi viršutinėje pakuros dalyje.



2.6 pav. Katilinės Nr. 2 pakuros šoninių sienelių nuotraukos ir termogramos

Toliau pateikiamos katilo nuotraukos ir termogramos (2.7 pav.). Katilo viršutinėje dalyje yra ypač aukštos temperatūros detalė, kurios maksimumas siekia 148 °C. Šios detalės plotas nėra didelis. Dūmų jungties kameros viršutinis dangtis, kuriame dūmai pereina iš antros eigos vamzdelių į trečios eigos vamzdelius, spinduliuoja iki 123,4 °C. Šie du plotai neturi šiluminio izoliacinio sluoksnio, todėl yra pasiekama aukšta temperatūra. Katilo šonai turi izoliacinį sluoksnį, kuris gerai apsaugo nuo šilumos išspinduliavimo. Ties atvamzdžiu šilumos atidavimas yra didesnis dėl galimo šiluminio izoliacinio sluoksnių sujungimo.

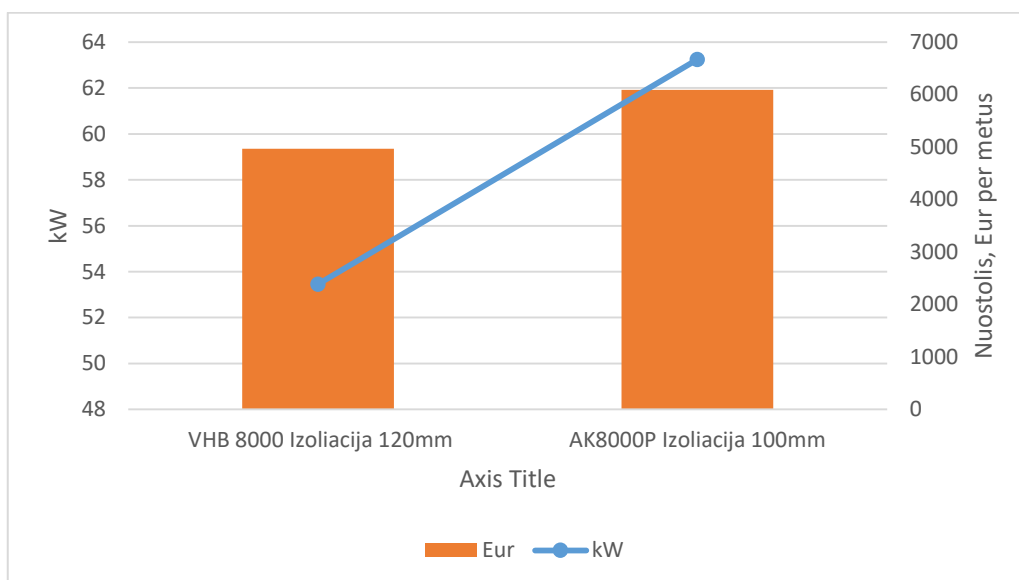


2.7 pav. Katilinės Nr. 2 katilo nuotraukos ir termogramos

Buvo vertinami rezultatai ir apskaičiuojami šilumos praradimai. Paviršiai suskirstomi į horizontalius ir vertikalius dėl skirtingo šilumos atidavimo koeficiento. Atlikus skaičiavimą suminis šilumos paviršių nuostolis  $Q_5 = 63,25 \text{ kW}$ . Įvertinus visus katilo ir pakuros nuostolius tai sudaro apie 0,79 proc. Tad patirti šilumos nuostoliai nuo išorinių paviršių per metus - 6088,96 eurai, kai katilo izoliacija – 100 mm akmens vata. Katilas dirba 8000 valandų, šilumos kainos metinis vidurkis 0,012033 Eur, Aplinkos temperatūra 20 °C.

2.6 lentelė. Nuostoliai nuo išorinių paviršių, gauti tyrimo rezultatai

Vertikalūs paviršiai	Plotas	m <sup>2</sup>	Sienelės temperatūra	°C	$\alpha_v$	$Q_5$	kW	Eur	Nuostoliai per metus, Eur
	F <sub>1</sub>	54	t <sub>p1</sub>	39	8,83	Q <sub>51v</sub>	9,06	0,108979164	871,83
	F <sub>2</sub>	54	t <sub>p2</sub>	39	8,83	Q <sub>52v</sub>	9,06	0,108979164	871,83
	F <sub>3</sub>	19,8	t <sub>p3</sub>	40	8,94	Q <sub>53v</sub>	3,54	0,042621431	340,97
	F <sub>4</sub>	19,8	t <sub>p4</sub>	40	8,94	Q <sub>54v</sub>	3,54	0,042621431	340,97
	F <sub>5</sub>	82,42	t <sub>p5</sub>	40	8,94	Q <sub>55v</sub>	14,74	0,177417088	1419,34
	F <sub>6</sub>	3,79	t <sub>p6</sub>	56	10,50	Q <sub>56v</sub>	1,43	0,01723621	137,89
Viso:							41,73		3982,48
Horizontalūs paviršiai	Plotas	m <sup>2</sup>	Sienelės temperatūra	°C	$\alpha_v$	$Q_5$	kW	Eur	Nuostoliai per metus, Eur
	F <sub>1</sub>	29,7	t <sub>p1</sub>	50	10,55	Q <sub>51v</sub>	9,40	0,05524117	441,93
	F <sub>2</sub>	9,61	t <sub>p2</sub>	90	13,20	Q <sub>52v</sub>	8,88	0,092683465	741,47
	F <sub>3</sub>	8,98	t <sub>p3</sub>	56	11,12	Q <sub>53v</sub>	3,59	0,014533412	116,27
Viso:							21,88		2106,18



2.8 pav. Katilų palyginimas esant tam tikrai izoliacijai

Iš 2.8 pav. matyti, jog katilas VHB8000 turi didesnę 120 mm šiluminę izoliaciją, taigi šilumos nuostoliai, kurie yra išspinduliuojami į aplinką, yra mažesni - 53,45 kW. Antro katilo AK8000P šiluminė izoliacija yra 100 mm, nuostoliai yra didesni - 63,25 kW. Katilai dirbo apie 8000 valandų, patalpos oro temperatūra buvo 20 °C, buvo įvertinta šilumos kaina per metus, išvestas vidurkis ir suskaičiuota, kiek per metus katilai patiria nuostolių Eur. Pirmo katilo nuostoliai – 4976,88 Eur, o antro katilo – 6089 Eur. Buvo suskaičiuoti papildomi katilų apšiltinimo kaštai: įvertinus medžiagų kainas, žmogaus darbą, paaiškėjo, kad tai ekonomiškai nenaudingas sprendimas.

### 3. BIOKURO KATILO NAUDINGUMO KOEFICIENTO APSKAIČIAVIMO METODIKA

Naudingumo koeficientas skaičiuojamas pagal faktinius parametrų matavimų duomenis, kurie gaunami katilo bandymo metu.

Naudingumo koeficientas skaičiuojamas atvirkštinio balanso metodu, nustatant visus katilo šilumos nuostolius, pagal (3.1) formulę:

$$NK = 100\% - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6 \quad (3.1)$$

**1.  $q_2$ – Šilumos nuostoliai su išeinančiais dūmais nustatomi pagal aplinkos oro ir dūmų temperatūras bei sudėtį, oro pertekliaus koeficientą.**

1.1. Numatomos degimo produktų sudėtys ir kiekiai:

1.1.1. Teoriškai degimui reikalingo oro tūris apskaičiuojamas pagal (3.2) formulę ( $m^3/kg_{kuro}$ ):

$$V_O^t = 0,0889 \cdot (C^n + 0,375 \cdot S_d^n) + 0,265 \cdot H^n - 0,0333 \cdot O^n; \quad (3.2)$$

1.1.2. Triatomų dujų tūris, susidaręs deginant kietąjį kurą, apskaičiuojamas pagal (3.3) formulę ( $m^3/kg_{kuro}$ ):

$$V_{RO_2} = 0,01866 \cdot (C^n + 0,375 \cdot S_d^n); \quad (3.3)$$

1.1.3. Deginant kurą susidaręs teorinis azoto kiekis apskaičiuojamas pagal (3.4) formulę ( $m^3/kg_{kuro}$ ):

$$V_{N_2}^t = 0,79 \cdot V_O^t + 0,008 \cdot N^n; \quad (3.4)$$

1.1.4. Deginant kurą išsiskyres vandens garo kiekis apskaičiuojamas pagal (3.5) formulę ( $m^3/kg_{kuro}$ ):

$$V_{H_2O} = 0,111 \cdot H^n + 0,0124 \cdot W^n + 0,0161 \cdot \alpha \cdot V_O^t; \quad (3.5)$$

Čia: 0,0161- drėgmės kiekis ore 0,0161 g/kg

1.1.5. Teorinis degimo produktų kiekis apskaičiuojamas pagal (3.6) formulę ( $m^3/kg_{kuro}$ ):

$$V_d = V_{RO_2} + V_{N_2}^t + (\alpha - 1) \cdot V_O^t + V_{H_2O}; \quad (3.6)$$

1.2. Degimo produktų entalpija

1.2.1. Teorinio dūmų tūrio entalpija apskaičiuojama pagal (3.7) formulę ( $kJ/kg_{kuro}$ ):

$$H_d = (V_{RO_2} \cdot c_{CO_2} + V_{N_2}^t \cdot c_{N_2} + V_{H_2O}^t \cdot c_{H_2O}) \cdot t_d + (\alpha - 1) \cdot V_O^t \cdot c_{oro} \cdot t_d; \quad (3.7)$$

1.3. nuostoliai su išeinančiais dūmais apskaičiuojami pagal (3.8) formulę:

$$Q_2 = (H_d - H_O) \cdot \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) \cdot \frac{B_k}{3600}; \quad (3.8)$$

Čia:  $q_4$  - šilumos nuostoliai dėl nepilno mechaninio sudegimo (žr. žemiau),  $B_k$  – realus kuro suvartojimas.

$$H_O = (\alpha \cdot V_O^t \cdot c_{oro} \cdot t_{oro}) \quad (3.9)$$

$$1.3.1. q_2 = \frac{Q_2}{Q_A \cdot \frac{B_k}{3600}} \cdot 100\%; \quad (3.10)$$

$$1.3.2. Q_2 = \dots \dots \dots kW;$$

$$1.3.3. q_2 = \dots \dots \dots \%$$

**2.  $q_3$  – šilumos nuostoliai dėl cheminio nesudegimo apskaičiuojami pagal (3.12) formulę, nustatomi pagal anglies monoksido koncentraciją dūmuose.**

$$2.1. q_3 = \frac{Q_3}{Q_A \cdot \frac{B_k}{3600}} \cdot 100\%; \quad (3.11)$$

$$2.2. Q_3 = \frac{CO}{100\%} \cdot V_{s.d} \cdot Q_{CO} \cdot \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) \cdot \frac{B_k}{3600}; \quad (3.12)$$

$$2.3. V_{s.d} = V_{RO_2} + V_{N_2}^t + (\alpha - 1) \cdot V_O^t; \quad (3.13)$$

$$2.4. Q_{CO} = \dots \dots \dots kJ/m^3;$$

$$2.5. Q_3 = \dots \dots \dots kW$$

$$2.6. q_3 = \dots \dots \dots \%$$

**3.  $q_4$  – šilumos nuostoliai dėl cheminio nesudegimo apskaičiuojami pagal (3.14) formulę, nustatomi pagal nesudegusios grynosios anglies koncentraciją pelenuose.**

$$3.1. Q_4 = \left( \frac{(w)C_{Ash}}{100\%} \cdot \frac{A^n}{100\%} \cdot \frac{B_k}{3600} \right) \cdot Q_C; \quad (3.14)$$

Čia:  $(w)C_{Ash}$  – nesudegusios anglies koncentracija pelenuose %,  $Q_C = 29330 kJ/kg$  – likutinės anglies degimo šiluma.

$$3.2. q_4 = \frac{Q_4}{Q_A \cdot \frac{B_k}{3600}} \cdot 100\%; \quad (3.15)$$

$$3.3. Q_4 = \dots \dots \dots kW$$

$$3.4. q_4 = \dots \dots \dots \%$$

**4.  $q_5$  – šilumos nuostoliai į aplinką nuo katilo sienų apskaičiuojami pagal (3.16) formulę, nustatomi pagal išorinių katilo sienų temperatūrą.**

$$4.1. Q_5 = k \cdot F \cdot \Delta T; \quad (3.16)$$

Čia  $Q$  – į aplinką perduodamas šilumos kiekis (šilumos nuostoliai į aplinką), kW;  $k$  – šilumos atidavimo koeficientas,  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ;  $F$  – katilo elemento paviršiaus plotas,  $\Delta T$  – temperatūrų skirtumas tarp aplinkos ir katilo elemento paviršiaus.

Priimama vidutinė šilumos atidavimo koeficiento reikšmė  $8 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ .

$$4.2. q_5 = \frac{Q_5}{Q_A \cdot \frac{B_k}{3600}} \cdot 100\%; \quad (3.17)$$

$$4.3. Q_5 = \dots \dots \dots kW$$

$$4.4. q_5 = \dots \dots \dots \%$$

**5.  $q_6$ - šilumos nuostoliai kartu su šlaku ir karštais pelenais apskaičiuojami pagal (3.18) formulę.**

$$5.1. \quad Q_6 = \frac{B_k}{3600} \cdot \frac{A^n}{100} \cdot c_{Ash} \cdot \Delta T_{Ash}; \quad (3.18)$$

Čia:  $c_{Ash}$ - pelenų specifinė šiluminė talpa,  $\Delta T_{Ash}$  - temperatūros skirtumas tarp aplinkos ir karštų pelenų.

$$5.2. \quad q_6 = \frac{Q_5}{Q_A^n \cdot \frac{B_k}{3600}} \cdot 100\%; \quad (3.19)$$

$$5.3. \quad Q_6 = \dots \dots kW$$

$$5.4. \quad q_6 = \dots \dots \%;$$

**6. Katilo naudingumo koeficientas apskaičiuojamas pagal (3.20) formulę:**

$$6.1. \quad NK = 100\% - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6 \quad (3.20)$$

### **3.1. Katilinės Nr. 1 aprašymas**

Katilinė suprojektuota ir sumontuota Kauno mieste. Katilinės paskirtis – šilumos gamyba ir tiekimas į Kauno miesto centralizuoto šilumos tiekimo tinklus ištisus metus: tiek šildymo, tiek ir nešildymo sezono metu. Visą darbo laikotarpį į tinklus atiduodama iki 20 MW šilumos – iki 16 MW pagamintų vandens šildymo katilų ir iki 4 MW kondensacinio ekonomaizerio, kurio galia priklauso nuo grįžtančio iš tinklų termofikacinio vandens temperatūros, kuro drėgnumo. Katilinė yra suprojektuota dirbti su biokuru. Pagal šilumos tiekimo patikimumą katilinė priskiriama antrajai kategorijai.

Katilinėje yra du biokuro kūrenami agregatai, kuriuos sudaro biokuro pakuros su kuro tiekimu, pelenų šalinimo bei kitomis pagalbinėmis sistemomis, užtikrinančiomis saugų ir stabilų darbą, bei vertikalūs dūmų vamzdžių vandens šildymo katilai (2 vnt. po 8 MW) su cirkuliaciniais (4 vnt.) ir recirkuliaciniais siurbliais (po 1 vnt.), slėgio pakėlimo siurbliai (4 vnt.). Grįžtamo termofikacinio vandens pašildymui sumontuotas 4 MW ekonomaizeris su dūmų kondensato valymo įranga.[17]

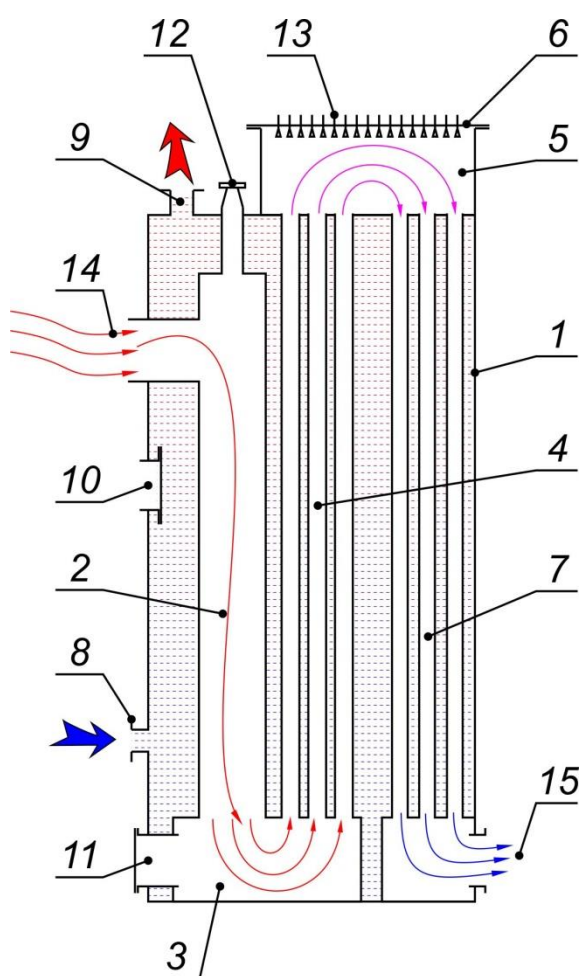
### **3.2. Katilinės Nr.1 vandens šildymo katilų VHB 8000 techniniai duomenis**

Biokuro katilo konstrukcija yra trijų dūmų eigų vandens šildymo katilas – įrenginys, skirtas termofikacinio vandens šildymui, kurui naudojant biomasę. Dūmų eiga tokios tvarkos: pirma eiga yra ugniavamzdis, 2-a ir 3-čia eigos yra vamzdžių pluoštai.

Katilo korpusas sudarytas iš vandens dalies ir kaitinimo paviršių. Degimo produktai eina kaitravamzdžių viduje, o termofikacinis vanduo cirkuliuoja kaitravamzdžių išorėje.[17]

Degimo produktų judėjimo kelias katile (žr. 3.1 pav.):

- a. įėjimas į ugniavamzdį (poz. 14);
- b. ugniavamzdyje (1-a eiga) (poz. 2);
- c. reversinėje kameroje (poz. 3);
- d. 2 eigos dūmavamzdžiuose (poz. 4);
- e. viršutinėje reversinėje kameroje (poz. 5)
- f. 3 eigos dūmavamzdžiuose (poz. 7)
- g. dūmų kameroje.



1. Katilo korpusas
2. Ugniavamzdis
3. Reversinė kamera
4. 2-os eigos dūmavamzdžiai
5. Reversinė kamera
6. Katilo dangtis
7. 3-os eigos dūmavamzdžiai
8. Termofikacinio vandens įėjimo atvamzdis (2 vnt.)
9. Termofikacinio vandens išėjimo atvamzdis (2 vnt.)
10. Slėginės dalies apžiūros liukas
11. Pelenų šalinimo liukas
12. Apžiūros anga
13. Apšaudymo suspaustu oru sistema
14. Dūmų įėjimas
15. Dūmų išėjimas

3.1 pav. Vandens šildymo katilo konstrukcinė schema

### 3.3. Dūmų kondensacinio ekonomizerio CEB 4000 aprašymas ir techniniai duomenys

Kondensacinio ekonomizerio paskirtis yra gaminti šiluminę energiją tam panaudojant biokuro katilo išmetamų dūmų likutinę šilumą. Šiluminė energija ekonomizeryje gaunama tiek dūmų fizinės, tiek dūmuose esančių vandens garų kondensacinės šilumos sąskaita. Šilumos

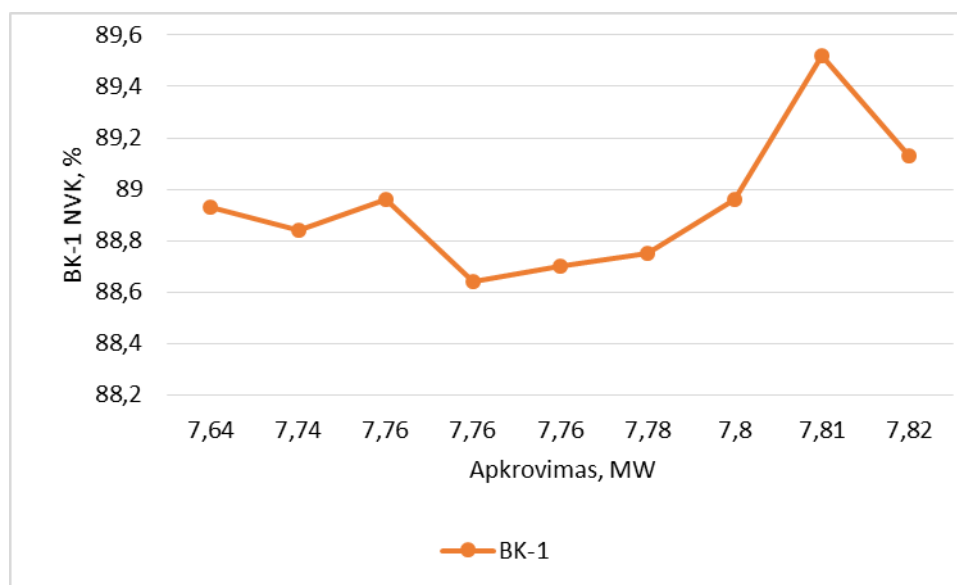


mainai vyksta betarpiškai (dūmai - termofikacinis vanduo) pačiame ekonomizaizeryje, nenaudojant tarpinių šilumokaičių. Tinkamas sąlygas efektyviam kondensacinio ekonomizaizerio darbui sudaro:

- biokuro katilų galia 2 x 8 MW;
- biokuro katile deginamas biokuras (medienos atliekos), turintis 30-60 proc. drėgmės;
- žema iš miesto šilumos tiekimo sistemos grįžtančio vandens temperatūra: 43-50°C;
- aukšta katilų išmetamų dūmų temperatūra- iki -150 ÷180 °C;
- kondensacinio ekonomizaizerio šiluminė galia 4,0 MW;
- vandens debitas per ekonomizaizerį iki 600 m<sup>3</sup>/h.

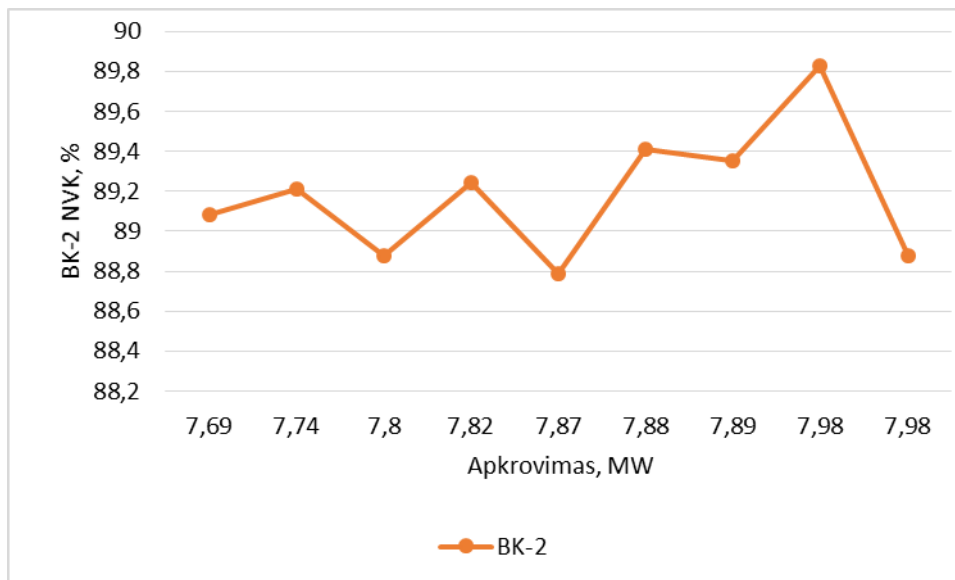
Kondensacinio ekonomizaizerio pagalba, priklausomai nuo sąlygų derinio, galima nesudeginant papildomo kuro kiekio gauti 15-30 proc. katilų (visos sistemos) galios padidėjimą.[17]

### 3.4. Katilinės Nr.1 grafikų analizė



3.2 pav. BK-1 katilo NK priklausomybė nuo katilo apkrovimo

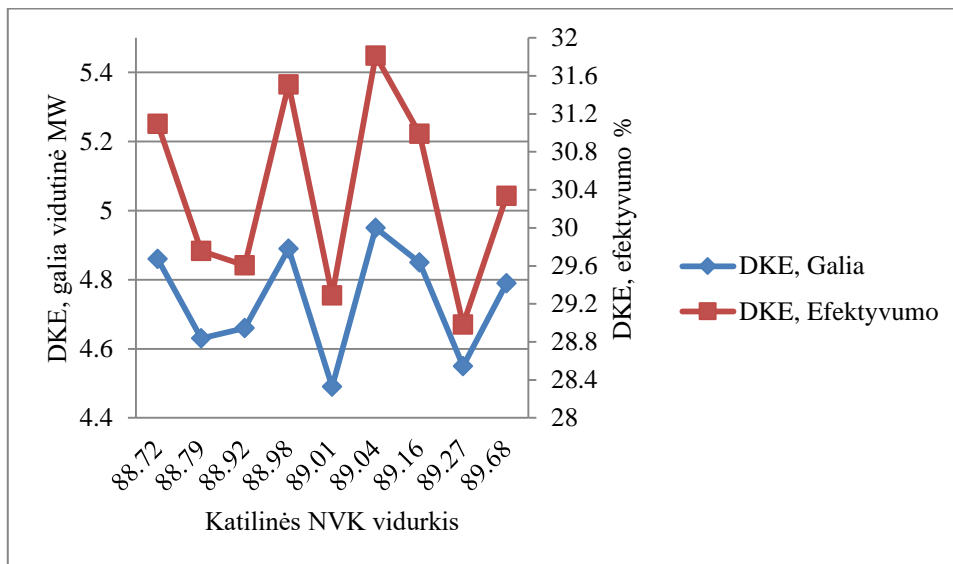




3.3 pav. BK-2 katilo NK priklausomybė nuo katilo apkrovimo

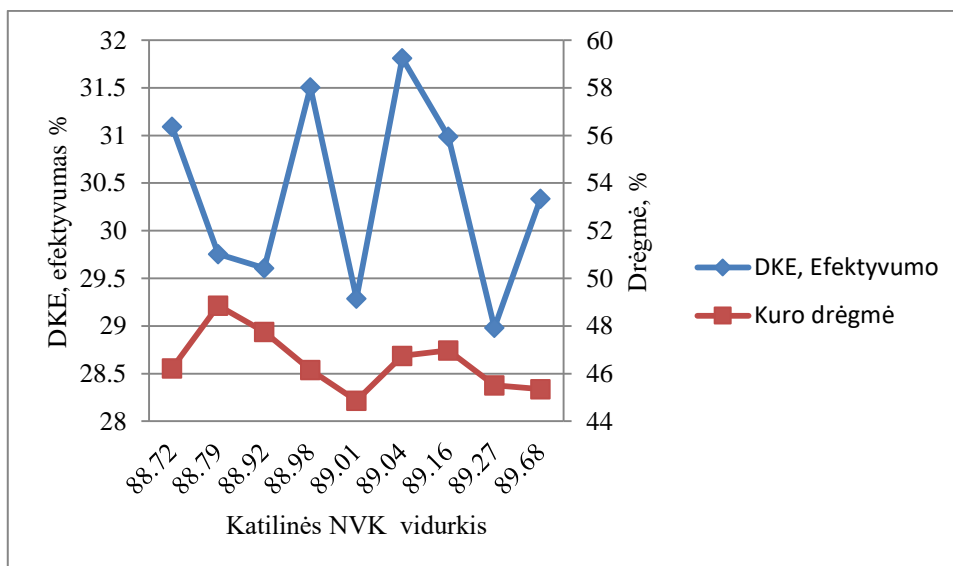
Skaičiavimai ir analizė atlikti nuo 02-29 iki 05-01. Esant tam tikriems parametrams, iš katilinės duomenų bazės programinės įrangos „Scada“ buvo paimti savaitiniai vidurkiai, katilo galia, kuro drėgmė, išeinančių dūmų temperatūra. NK skaičiavimai buvo atlikti atvirkštiniu balanso metodu. Skaičiuojama buvo BK-1 katilo NK kiekvieną savaitę. Šilumos nuostoliai į aplinką buvo suskaičiuoti atliekant tyrimą su termovizine kamera ir pritaikyti skaičiavimuose. Analogiškai buvo atlikti skaičiavimai ir katilui BK-2.

Iš grafiko matyti mažas apkrovimas, kadangi katilas dirbo realiomis sąlygomis ir negalima buvo keisti apkrovimo dėl realių šilumos tiekimo į tinklus sąlygų. Iš 3.2 pav., kuriame pavaizduota BK-1 katilo NK priklausomybė nuo katilo apkrovimo, nustatyta, jog didžiausias NK yra esant 7,81 MW - 89,52 proc., mažiausias NK yra esant 7,76 MW apkrovimo – 88,64 proc., kadangi katilas BK-1 dirbo realiomis sąlygomis, iš grafiko matyti mažas kitimas 0,3 MW diapazone. Iš 3.3 pav., kuriame pavaizduota BK-2 katilo NK priklausomybė nuo katilo apkrovimo, matyti, jog didžiausias NK yra prie 7,98 MW - 89,83 proc., mažiausias NK yra esant 7,87 MW apkrovimo – 88,79 proc., kadangi katilas BK-2 dirbo realiomis sąlygomis iš grafiko matyti mažas kitimas 0,3 MW diapazone.



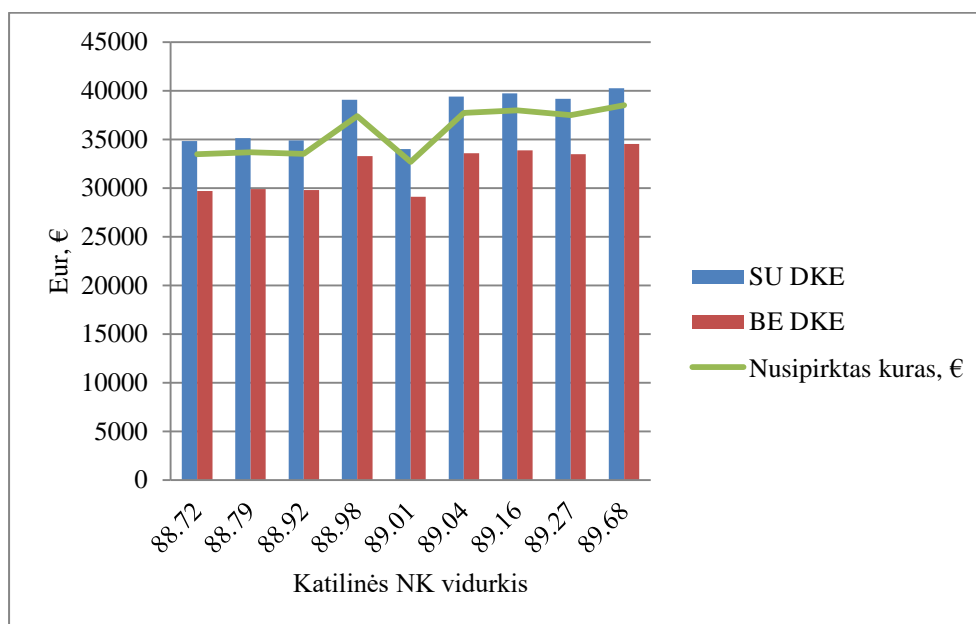
3.4 pav. Kondensacinio ekonomizerio galios ir efektyvumo priklausomybė nuo katilinės NK vidurkio

3.4 pav. pateikti duomenys, kaip kinta DKE generuojamos galios savaitės vidurkiai bei DKE efektyvumas lyginant su katilinės NK vidurkiu. Projektiskai biokuro katilinės ekonomizeris yra 25 proc. Kaip matome iš grafiko, galia viršija efektyvumą, kadangi galios apribojimo nėra. Sąlygos darbui buvo palankios, todėl efektyviai išnaudojamas ekonomizeris.



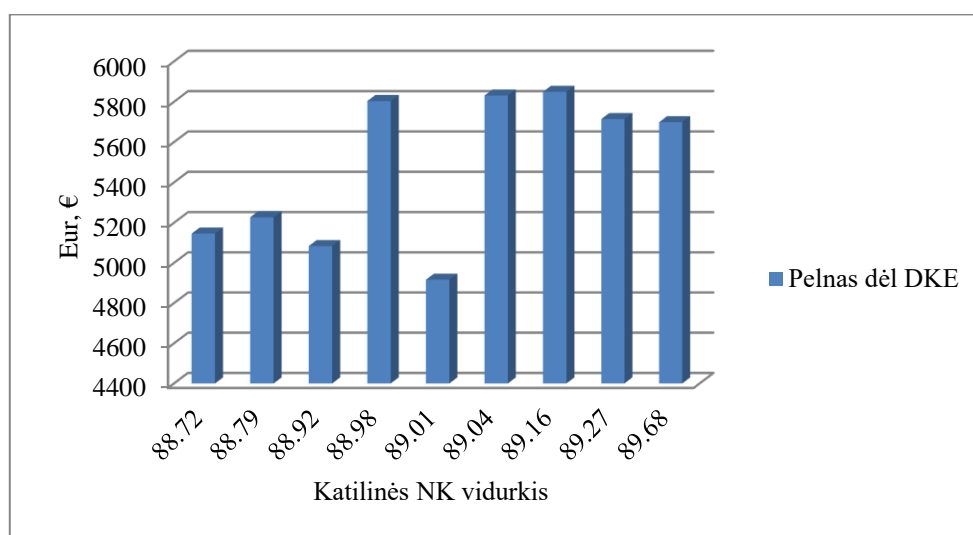
3.5 pav. Kondensacinio ekonomizerio efektyvumo priklausomybė nuo kuro drėgmės lyginant su katilinės NK vidurkiu

3.5 pav. DKE efektyvumo priklausomybė nuo kuro drėgmės, gauti rezultatai pateikti grafike. Tačiau DKE efektyvumas nepriklauso vien nuo kuro drėgmės, DKE efektyvumas priklauso ir nuo grįžtamo termofikacinio vandens temperatūros, deguonies dūmuose, dūmų temperatūros. Vidutinis DKE efektyvumas- 30,36 proc.



3.6 pav. Kondensacinio ekonomizerio reikšmė katilinėje

Iš 3.6 pav. matyti, jog efektyviai išnaudojamas katilinės efektyvumas yra 105 proc., jei katilinėje nebūtų dūmų kondensacinio ekonomizerio, katilas dirbtų neefektyviai, tik 85 proc., tad 20 proc. šiluminės energijos išmestume pro kaminą. Kaip matome sutaupome pinigų, gauname pelną, efektyviai išnaudojamas nupirktas kuras dėl kondensacinio ekonomizerio.



3.7 pav. Dūmų kondensacinio ekonomizerio pelnas

Iš 3.8 pav. matome, jog tam tikromis savaitėmis dėl DKE dirbta pelningai. Sutaupyta 49269,08 Eur. Vadinasi, kiekvieną savaitę dėl DKE efektyvumo sutaupyta vidutiniškai po 5474,34 Eur.

### 3.5. Katilinės Nr.1 vandens šildymo katilų VHB 8000 NK skaičiavimo rezultatai

Skaičiavimams atlikti buvo sukurta Microsoft Excel bazėje programa ir joje buvo atliekami skaičiavimai, naudingumo koeficientas skaičiuojamas atvirkštinio balanso metodu, nustatant visus katilo šilumos nuostolius. Šilumos nuostoliai į aplinką nuo katilo sienų nustatomi pagal išorinių katilo sienų temperatūrą, duomenys paimti iš atlikto antro tyrimo su termovizine kamera atliekant skaičiavimus, įvertinant nuostolius.

3.1 lentelė. Katilinės Nr.1 parametrų savaitiniai vidurkiai katilams BK-1 ir BK-2 VHB 8000

Savaitiniai vidurkiai						
Laikotarpis	Drėgmė, %	Išeinančių dūmų temperatūra, BK-2, °C	Išeinančių dūmų temperatūra, BK-1 °C	Galia, MW BK-1	Galia, MW BK-2	Aplinkos oro temperatūra °C
02.29-03.06	45,35	154,6	159	7,81	7,98	20
03.07-03.13	46,97	158,9	164,2	7,76	7,89	
03.14-03.20	46,75	160,7	166,4	7,74	7,82	
03.21-03.27	46,16	162	168,7	7,78	7,74	
03.28-04.03	45,51	160,4	164,4	7,82	7,88	
04.04-04.10	48,86	162,1	164,5	7,76	7,8	
04.11-04.17	44,87	165,9	168,1	7,64	7,69	
04.18-04.24	46,22	168,2	170,1	7,76	7,87	
04.25-05.01	47,76	164,3	162,9	7,8	7,98	

3.2 lentelė. BK-1 katilo skaičiavimo rezultatai

BK-1		02.29-03.06	03.07-03.13	03.14-03.20	03.21-03.27	03.28-04.03	04.04-04.10	04.11-04.17	04.18-04.24	04.25-05.01
Katilo apkrovimas	MW	7,81	7,76	7,74	7,78	7,82	7,76	7,64	7,76	7,76
Išeinančių dūmų temperatūra	°C	159	164,2	166,4	168,7	164,4	164,5	168,1	170,1	162,9
Deguonies kiekis dūmuose	%	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Q n.ž	kJ/kg	9150	8804	8851	8977	9116	8401	9252	8964	8636
N.V.K	%	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
$\alpha$	-	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31
Mo2	kg/kg	0,770	0,747	0,750	0,759	0,768	0,721	0,777	0,758	0,736
Vto	m³/kg	2,590	2,513	2,523	2,551	2,582	2,423	2,613	2,549	2,476
VRO2	m³/kg	0,515	0,500	0,502	0,508	0,514	0,482	0,520	0,507	0,493
VtN2	m³/kg	2,049	1,988	1,996	2,018	2,043	1,917	2,067	2,016	1,958

VH2O	m³/kg	0,981	0,989	0,988	0,985	0,982	0,998	0,979	0,985	0,992
Vd	m³/kg	4,354	4,262	4,275	4,308	4,345	4,154	4,382	4,305	4,217
Co	kJ/(kg* K)	1,306	1,307	1,307	1,307	1,307	1,307	1,307	1,307	1,307
Cco2	kJ/(kg* K)	1,788	1,791	1,792	1,793	1,791	1,791	1,793	1,794	1,790
CN2	kJ/(kg* K)	1,324	1,324	1,324	1,325	1,324	1,324	1,325	1,325	1,324
CH2O	kJ/(kg* K)	1,513	1,514	1,515	1,515	1,514	1,514	1,515	1,515	1,514
Hd	kJ/kg	813,62 6	825,05 9	838,54 4	856,31 8	840,3 33	808,14 8	866,07 7	862,98 7	810,74 1
Hd	kJ/kg	981,69 6	993,56 0	1010,0 46	1032,1 55	1013, 688	970,94 6	1045,4 77	1040,1 09	975,39 9
B kuro. val	kg/h	3432,6	3566,7	3543,8	3515,5	3464, 9	3748,8	3342,8	3515,7	3636,3
Q 2	kW	1098,1 8	1115,9 5	1135,7 7	1161,7 6	1137, 79	1091,9 1	1175,5 7	1171,6 5	1095,2 1
q 2	%	9,76	10,31	10,43	10,52	10,15	10,57	10,33	10,63	10,31
Q 3	kW	3,33	3,27	3,3	3,36	3,37	3,16	3,43	3,37	3,22
q 3	%	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Q 4	kW	0,99	0,96	0,96	0,97	0,98	0,92	0,99	0,97	0,94
q 4	%	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Q5	kW	53,45	53,45	53,45	53,45	53,45	53,45	53,45	53,45	53,45
q5	%	0,68	0,69	0,69	0,69	0,68	0,69	0,7	0,69	0,69
Q6	kW	0,23	0,22	0,22	0,22	0,23	0,21	0,23	0,22	0,22
q6	%	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
NK	%	89,52	88,96	88,84	88,75	89,13	88,7	88,93	88,64	88,96

### 3.3 lentelė. BK-2 katilo skaičiavimo rezultatai

BK-2		02.29- 03.06	03.07- 03.13	03.14- 03.20	03.21- 03.27	03.28- 04.03	04.04- 04.10	04.11- 04.17	04.18- 04.24	04.25- 05.01
Katilo apkrovimas	MW	7,98	7,89	7,82	7,74	7,88	7,8	7,69	7,87	7,98
Išeinančių dūmų temperatūra	°C	154,6	158,9	160,7	162	160,4	162,1	165,9	168,2	164,3
Deguanies kiekis dūmuose	%	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Q n.ž	kJ/kg	9150	8804	8851	8977	9166	8401	9252	8964	8636
N.V.K	%	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
α	-	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31
Mo2	kg/kg	0,770	0,747	0,750	0,759	0,768	0,721	0,777	0,758	0,736
V 0t	m³/kg	2,590	2,513	2,523	2,551	2,582	2,423	2,613	2,549	2,476
V tN2	m³/kg	0,515	0,500	0,502	0,508	0,514	0,482	0,520	0,507	0,493
V ro2	m³/kg	2,049	1,988	1,996	2,018	2,043	1,917	2,067	2,016	1,958
V H2O	m³/kg	0,981	0,989	0,988	0,985	0,982	0,998	0,979	0,985	0,992
Vd	m³/kg	4,354	4,262	4,275	4,308	4,345	4,154	4,382	4,305	4,217

Co	kJ/(kg* K)	1,306	1,306	1,306	1,306	1,306	1,306	1,307	1,307	1,307
Cco2	kJ/(kg* K)	1,786	1,788	1,789	1,790	1,789	1,790	1,792	1,793	1,791
CN2	kJ/(kg* K)	1,323	1,324	1,324	1,324	1,324	1,324	1,324	1,325	1,324
CH2O	kJ/(kg* K)	1,512	1,513	1,513	1,513	1,513	1,513	1,514	1,515	1,514
Hd	kJ/kg	790,62 4	797,83 5	809,17 4	821,53 9	819,42 8	796,0 89	854,4 80	853,12 1	817,869
Hd	kJ/kg	953,97 7	960,81 9	974,71 5	990,28 9	988,50 3	956,4 76	1031, 496	1028,2 34	983,963
B kuro. val	kg/h	3494,9	3610,9	3564,1	3479,2	3480,5	3760, 7	3358, 5	3559,9	3742,8
Q 2	kW	1064,1 3	1075,7 4	1092,3 7	1110,3 3	1106,8 5	1074, 14	1158, 4	1157,0 6	1105,73
q 2	%	9,46	9,93	10,03	10,06	9,87	10,4	10,18	10,49	10,41
Q 3	kW	3,3	3,23	3,26	3,31	3,34	3,14	3,42	3,35	3,23
q 3	%	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Q 4	kW	0,99	0,96	0,96	0,97	0,98	0,92	0,99	0,97	0,94
q 4	%	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Q5	kW	53,45	53,45	53,45	53,45	53,45	53,45	53,45	53,45	53,45
q5	%	0,67	0,68	0,68	0,69	0,68	0,69	0,7	0,68	0,67
Q6	kW	0,23	0,22	0,22	0,22	0,23	0,21	0,23	0,22	0,22
q6	%	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
NK	%	89,83	89,35	89,24	89,21	89,41	88,88	89,08	88,79	88,88

#### 4. KATILINĖS NR.1 KATILO VHB 8000 IR PAKUROS SKAIČIAVIMAS ESANT 50 PROC. KURO DRĖGMEI

##### 4.1. Pakuros skaičiavimas

##### 4.1.1. Kuro degimo skaičiavimas

Skaičiavimai atlikti pagal formules, kurios imtos iš metodikas.[6, 7, 9, 10, 11, 12]

Atlikti kuro degimo skaičiavimai rodo, kad biokuro cheminė elementinė sudėtis bus kaip pateikta 4.1 lentelėje.[5, 2.1 lentelė]

4.1 lentelė. Sausos masės elementinė sudėtis

Žymėjimas	C <sup>s</sup>	H <sup>s</sup>	S <sup>s</sup>	O <sup>s</sup>	N <sup>s</sup>	A <sup>s</sup>	Q <sub>ž</sub> <sup>s.m.</sup>
%	50,5	6	0,1	41,5	0,6	0,5	18817

C-anglis, H-vandenilis, S-siera, O-deguonis, N-azotas, A-pelenai, W-drėgmė, Q<sub>ž</sub><sup>s.m.</sup>- kuro žemutinis šilmingumas sausoje masėje.

Pirmas skaičiavimas bus atliekamas deginat kurą esant 50 proc. drėgmei.

Įvertinus kuro drėgmę suskaičiuojama, kaip keičiasi elementinė sudėtis:

$$C = C^s * \frac{100-W}{100} = 50,5 * \frac{100-50}{100} = 25,25 \% \quad (4.1)$$

$$H = H^s * \frac{100-W}{100} = 6 * \frac{100-50}{100} = 3 \% \quad (4.2)$$

$$S = S^s * \frac{100-W}{100} = 0,1 * \frac{100-50}{100} = 0,05 \% \quad (4.3)$$

$$O = O^s * \frac{100-W}{100} = 41,5 * \frac{100-50}{100} = 20,75 \% \quad (4.4)$$

$$N = N^s * \frac{100-W}{100} = 0,6 * \frac{100-50}{100} = 0,3 \% \quad (4.5)$$

$$A = A^s * \frac{100-W}{100} = 0,5 * \frac{100-50}{100} = 0,25 \% \quad (4.6)$$

4.2 lentelė. Kuro elementinė sudėtis

Žymėjimas	C <sub>n</sub>	H <sub>n</sub>	S <sub>n</sub>	O <sub>n</sub>	N <sub>n</sub>	A <sub>n</sub>	W <sub>n</sub>	kcal/kg
%	25,25	3	0,05	20,75	0,3	0,25	50	1949,8

Biokuro šilminguma apskaičiuojama pagal (4.7) formulę:

$$Q_{ž}^{n.m.} = 339 * C_n + 1035 * H_n - 109(O_n - S_n) - 25 * W_n = 339 * 25,25 + 1035 * 3 - 109 * (20,75 - 0,05) - 25 * 50 = 8158 \frac{kJ}{kg} \quad (4.7)$$

Biokuro sunaudojimas, katiliui dirbant nominalia galia- 8 MW esant 50 proc. drėgmei, apskaičiuojamas pagal (4.8) formulę:

$$B = \frac{Q_n}{\eta * Q_{ž}^n} = \frac{8000}{0,85 * 8158} = 4153,26 \frac{kg}{h} = 1,15 \frac{kg}{s} \quad (4.8)$$

*Q<sub>n</sub>-Naudingai sunaudota šiluma;*

$Q_z^n$  - Medienos skiedrų kaloringumas kJ/kg;

$\eta$  - katilo naudingumo koeficientas %.

- **Teorinis degimui reikalingo oro tūris apskaičiuojamas pagal (4.9) formulę:**

$$V_0^t = 0,0889 * (C^n + 0,375 * S_d^n) + 0,265H^n - 0,0333O^n = 0,0889 * (25,3 + 0,375 * 0,1) + 0,265 * 3 - 0,0333 * 20,8 = 2,35 \frac{m^3}{kg} \quad (4.9)$$

Primame oro pertekliaus koeficientas bus  $\alpha = 1,3$

Oro pertekliaus koeficiento išraiška yra  $\alpha = \frac{21}{21-O^2} = \frac{21}{21-5} = 1,31$

O<sup>2</sup>-deguonies kiekis.

- **Degimo produkto tūris apskaičiuojamas pagal (4.10) formulę:**

Žinant, kad dujų specifinis tūris  $V = \frac{22,4}{\mu} m^3/kg$  triatomų dujų tūris, deginant kietąjį kurą yra:

$$V_{RO_2} = 0,01866(C^n + 0,375S_d^n) = 0,01866(25,3 + 0,375 * 0,1) = 0,473 \frac{m^3}{kg} \quad (4.10)$$

Kadangi azotas ore sudaro 79 proc. tūrio, pačiame kure yra  $N^n$  % azoto, todėl teorinis azoto tūris, sudeginus 1 kg biokuro, bus:

$$V_{N_2}^t = 0,79 * V_0^t + 0,008N^n = 0,79 * 2,35 + 0,008 * 0,3 = 1,859 \frac{m^3}{kg} \quad (4.11)$$

- **Tikrasis azoto tūris apskaičiuojamas pagal (4.12) formulę:**

$$V_{N_2} = 0,79 * V_0^t \alpha + 0,008N^n = 0,79 * 2,35 * 1,3 + 0,008 * 0,3 = 2,41 \frac{m^3}{kg} \quad (4.12)$$

Deginant kietąjį kurą, vandens garai degimo produktuose atsiranda sudegus kuro vandeniliui, išgaravus drėgmei, taip pat patekus atmosferinio oro. Apskaičiuojamas pagal (4.13) formulę:

$$V_{H_2O} = 0,111 * H^n + 0,0124 * W^n + 0,0161 * \alpha * V_0^t = 0,111 * 3 + 0,0124 * 50 + 0,0161 * 1,3 * 2,35 = 1,002 \frac{m^3}{kg} \quad (4.13)$$

- **Suminis deginimo produktų tūris apskaičiuojamas pagal (4.14) formulę:**

$$V_d = V_{RO_2} + V_{N_2}^t + (\alpha - 1) * V_0^t + V_{H_2O} = 0,473 + 2,41 + (1,3 - 1) * 2,35 + 1,002 = 4,59 \frac{m^3}{kg} \quad (4.14)$$

- **Tūrinė triatomų dujų dalis apskaičiuojama pagal (4.15) formulę:**

$$r_{RO_2} = \frac{V_{RO_2}}{V_D} = \frac{0,473}{4,59} = 0,103 \quad (4.15)$$

- **Tūrinė vandens garų dalis apskaičiuojama pagal (4.16) formulę:**



$$r_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_d} = \frac{1,002}{4,59} = 0,218 \quad (4.16)$$

#### 4.1.2. Degimo produktų entalpija

Kurui degant išsiskyrusi šiluma visų pirma yra sunaudojama degimo produktams šildyti, jų entalpijai didinti. Kadangi degimo produktų komponentų specifinė šiluma nevienoda, jų entalpiją reikia apskaičiuoti atskirai ir po to sumuoti. Komponentų specifinė šiluma imama iš [6] prieduose esančios 7 lentelės. Skaičiuojama specifinės šilumos ir atitinkamos temperatūros sandauga. Skaičiavimai pateikiami 4.3 lentelėje.

4.3 lentelė. Specifinė šiluma

t, °C	(ct) <sub>RO<sub>2</sub></sub>	(ct) <sub>N<sub>2</sub></sub>	(ct) <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	(ct) <sub>Oro</sub>
0	1,5998	1,2946	1,4943	1,2971
100	170,03	129,58	150,52	130,04
200	357,46	259,92	304,46	261,42
300	558,81	392,01	462,72	395,16
400	771,88	526,52	626,16	531,56
500	994,35	663,8	794,85	671,35
600	1224,66	804,12	968,88	813,9
700	1461,88	947,52	1148,84	959,56
800	1704,88	1093,6	1334,4	1107,36
900	1952,28	1241,64	1526,13	1257,84
1000	2203,05	1391,7	1722,9	1409,7
1100	2458,39	1543,74	1925,11	1563,54
1200	2716,56	1697,16	2132,28	1719,24
1300	2976,74	1852,76	2343,64	1876,16
1400	3239,04	2008,72	2559,2	2033,92
1500	3503,1	2166	2779,05	2193
1600	3768,8	2324,48	3001,76	2353,28
1700	4036,31	2484,04	3229,32	2527,39

Teorinė dūmų komponentų entalpija apskaičiuojamas pagal (4.17) formulę:

$$H^t = V * (c * t), \frac{kJ}{kg} \quad (4.17)$$

Teorinė dūmų entalpija apskaičiuojamas pagal (4.18) formulę:

$$H_d^t = V_{RO_2}(ct)_{RO_2} + V_{N_2}(ct)_{N_2} + V_{H_2O}(ct)_{H_2O}, \frac{kJ}{kg} \quad (4.18)$$

4.4 lentelė. Teorinė dūmų entalpija

t, °C	(ct) <sub>RO<sub>2</sub></sub>	(ct) <sub>N<sub>2</sub></sub>	(ct) <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	(ct) <sub>Oro</sub>	H <sub>t</sub> d
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
100	80,42	240,89	150,82	305,59	777,73
200	169,08	483,19	305,07	614,34	1571,68
300	264,32	728,75	463,65	928,63	2385,34
400	365,10	978,80	627,41	1249,17	3220,48
500	470,33	1234,00	796,44	1577,67	4078,44

<b>600</b>	579,26	1494,86	970,82	1912,67	4957,61
<b>700</b>	691,47	1761,44	1151,14	2254,97	5859,01
<b>800</b>	806,41	2033,00	1337,07	2602,30	6778,78
<b>900</b>	923,43	2308,21	1529,18	2955,92	7716,74
<b>1000</b>	1042,04	2587,17	1726,35	3312,80	8668,35
<b>1100</b>	1162,82	2869,81	1928,96	3674,32	9635,91
<b>1200</b>	1284,93	3155,02	2136,54	4040,21	10616,71
<b>1300</b>	1408,00	3444,28	2348,33	4408,98	11609,58
<b>1400</b>	1532,07	3734,21	2564,32	4779,71	12610,31
<b>1500</b>	1656,97	4026,59	2784,61	5153,55	13621,72
<b>1600</b>	1782,64	4321,21	3007,76	5530,21	14641,82
<b>1700</b>	1909,17	4617,83	3235,78	5939,37	15702,15

Tikroji dūmų entalpija apskaičiuojamas pagal (4.19) formulę:

$$H_d = H_d^t + (\alpha - 1)H_o^t, \frac{kJ}{kg} \quad (4.19)$$

Tikrosios dūmų entalpijos suskaičiuojamos esant priimto oro pertekliaus koeficientui ( $\alpha=1,3$ ). Skaičiavimai pateikiami 4.5 lentelėje

4.5 lentelė. Tikrosios dūmų entalpijos

<b>t, °C</b>	<b>H<sub>d</sub> kJ/kg</b>
0	0,00
100	869,41
200	1755,98
300	2663,92
400	3595,23
500	4551,75
600	5531,41
700	6535,50
800	7559,46
900	8603,52
1000	9662,19
1100	10738,21
1200	11828,78
1300	12932,27
1400	14044,22
1500	15167,78
1600	16300,88
1700	17483,96

Suskaičiuojant dūmų entalpijas neįvertinami pelenai. Kadangi medienoje nėra dulkių pavidalo ir pelenų, jų pateikimas į dūmtakius yra nežymus.

### 4.1.3. Pakuros šiluminis balansas

Vandens šildymo katilas – įrenginys, skirtas termofikacinio vandens šildymui, kurui naudojant biomasę, tačiau panaudojama ne visa kuriui degant išsiskirianti šiluma. Nemažai šilumos prarandama pačioje kūrykloje, nuo kitų katilo paviršių, daug šilumos prarandama su išeinančiais dūmais. Nustatant katilo ekonomiškumą, reikia žinoti naudingai išnaudotą šilumos kiekį bei visus katilo nuostolius.

Šiluminiu balansu vadinama lygybė tarp katilo pagamintos šilumos kiekio ir šilumos suvartojimo vandens pašildymui bei šilumos nuostoliams padengti.

Vandens šildymo katilai dirba pagal termofikacinio vandens temperatūrą už katilų – į pakuras paduodamo kuro kiekis reguliuojamas pagal nustatytą temperatūrą už katilo.[6] Balansas sudaromas 1 kg kuro, esant nusistovėjusiam katilo režimui, apskaičiuojamas pagal (4.20) formulę:

$$Q_d = Q_1 + \sum Q_n = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 \frac{kJ}{kg} \quad (4.20)$$

Čia:

$Q_d$  - disponuojamoji šiluma, kJ/kg;

$Q_1$  - naudingai pakuroje panaudota šiluma, priimu 0;

$Q_2$  - šilumos nuostoliai su išeinančiais dūmais pagal gautus dūmų parametus;

$Q_3$  – šilumos nuostoliai dėl ne visiško cheminio sudegimo, priimta 0,2 proc.;

$Q_4$  – šilumos nuostoliai dėl ne visiško mechaninio sudegimo, priimta 0,4 proc.;

$Q_5$  – šilumos nuostoliai į aplinką suskaičiuoti 2 tyrime;

$Q_6$  - šilumos nuostoliai kartu su šlaku ir karštais pelenais. 0,1 proc.

Aplinkos oro temperatūra, kuri yra tokia pat, kaip ir į pakurą patiekiamas oras  $t_{oro}=20$  °C

Teorinė oro entalpija apskaičiuojama pagal (4.21) formulę:

$$H_{oro}^t = 0 + \frac{(20-0)(305,59)}{100-0} = 61,11 \frac{kJ}{kg} \quad (4.21)$$

Šilumos kiekis su oru apskaičiuojamas pagal (4.22) formulę:

$$Q_{oro} = \alpha * H_{oro}^t = 1,3 * 61,11 = 79,45 \frac{kJ}{kg} \quad (4.22)$$

Disponuojamos šilumos kiekis apskaičiuojamas pagal (4.23) formulę:

$$Q_d = Q_{\frac{n}{z}} + Q_{biokuro} + Q_{oro} = 8158 + 0 + 79,45 = 8237,45 \frac{kJ}{kg} \quad (4.23)$$

Kadangi kuras nėra šildomas, nevertiname kuro fizinių savybių.

#### 4.1.4. Šilumos nuostoliai

- Cheminiai ne visiško sudegimo šilumos nuostoliai

Šie nuostoliai atsiranda kūrykloje, kai kuras ne visiškai sudega, trūksta oro arba kūrykloje yra per žema temperatūra. Dūmuose atsiranda ne visiško sudegimo produktų. Šiluma, kuri liko nesudegus dujoms, katile neišnaudojama efektyviai ir taip atsiranda cheminio nevisiško sudegimo šilumos nuostoliai.[9] Nuostoliai buvo pasirinkti 0,2 proc.

$$Q_3 = 0,002 * 8237,45 = 16,47 \frac{kJ}{kg} \quad (4.24)$$

- Mechaniniai nevisiško sudegimo šilumos nuostoliai

Ne visas kuras, patekęs į kūryklą, sudega, kai kurios dalelės išbyra pro ardyno tarpelius, vienos dalelės, nespėjusios sudegti, pašalinimos su šlaku, o kitas daleles išneša dūmai. Nevisiškai sudegus kietosioms kuro dalelėms, prarandamas tam tikras šilumos kiekis, kuris sudaro mechaninius nevisiško sudegimo šilumos nuostolius.[9]

Nuostoliai buvo pasirinkti 0,4 proc.

$$Q_4 = 0,004 * 8237,45 = 32,95 \frac{kJ}{kg} \quad (4.25)$$

- Šilumos nuostoliai į aplinką

Katilo ir pakuros išorinio paviršiaus, metalinių dalių bei vamdžių izoliacijos paviršių temperatūra visada aukštesnė už aplinkos temperatūrą, tuomet šie katilo ir pakuros paviršiai konvekcijos ir spinduliavimo būdu perduoda šilumą aplinkai.[9]

Katilo ir pakuros paviršių temperatūros buvo išmatuotos termovizine kamera. Naudojant termovizinės kameros nuotraukas buvo suskaičiuoti nuostoliai nuo paviršiaus. Skaičiavimai pateikti 2 tyrime.

Vertikalios pakuros šilumos nuostoliai:

$$Q_{v.5} = 29,17 \text{ kW}$$

Horizontalios pakuros šilumos nuostoliai:

$$Q_{h5} = 9,51 \text{ kW}$$

Suminiai pakuros šilumos nuostoliai į aplinką apskaičiuojami pagal (4.26) formulę:

$$Q_5 = Q_{v.5} + Q_{h5} = 29,17 + 9,51 = 36,68 \text{ kW} \quad (4.26)$$

Taigi nuostoliai į aplinką įvertinus pakuros našumą vienetai bus apskaičiuojami pagal (4.27) formulę:

$$Q_5^{naš.} = \frac{Q_5}{B} = \frac{36,68}{1,15} = 31,89 \frac{kJ}{kg} \quad (4.27)$$

- Šilumos nuostoliai su šlaku ir pelenais

$$Q_6 = 0,001 * 8237,45 = 8,24 \frac{kJ}{kg} \quad (4.28)$$

Suskaičiuojame pakuros šiluminį balansą, kad galėtume nustatyti iš pakuros išeinančių dūmų temperatūrą. Apskaičiuojama pagal (4.29) formulę:

$$Q_2 = Q_d - Q_3 - Q_4 - Q_5 - Q_6 = 8237,45 - 16,47 - 32,95 - 31,89 - 8,24 = 8147,92 \frac{kJ}{kg} \quad (4.29)$$

Randame 4.5 lentelėje pateiktą išeinančių pakuros dūmų temperatūrą. Apskaičiuojama pagal (4.30) formulę:

$$t_d^{iš.} = 800 + \frac{8147,92 - 7559,46}{8603,52 - 7559,46} * (900 - 800) = 856^\circ\text{C} \quad (4.30)$$

## 4.2. Katilo šiluminis skaičiavimas

Biokuro katilo konstrukcija yra trijų dūmų eigų vandens šildymo katilas – įrenginys, skirtas termofikacinio vandens šildymui, kurui naudojant biomasę. Dūmų eigą sudaro pirma eiga- ugniavamzdis, 2-a ir 3-čia eigos yra vamzdžių pluoštai. Kaip dūmai keliauja, matyti 3.1 pav. Vandens šildymo katilo konstrukcinė schema. Pirmiausiai dūmai patenka iš pakuros į katilą. Iš katilo dūmai keliauja kaitrovamzdžiu žemyn - 1442 mm vamzdžiu, po to dūmai kyla į viršų 80,9 mm vamzdžiu antros eigos vamzdelių pluoštu, o vėliau dūmai patenka į 68,9 mm vamzdį, trečios eigos vamzdelių pluoštą, ir leidžiasi žemyn. Tada išeina iš katilo.

Katilo korpusas sudarytas iš vandens dalies ir kaitinimo paviršių. Degimo produktai eina kaitravamzdžių viduje, o termofikacinis vanduo cirkuliuoja kaitravamzdžių išorėje.

Šiluminio katilo skaičiavimo tikslas - nustatyti katile perduodamus šilumos kiekius ir nustatyti išeinančių dūmų temperatūrą.

### 4.2.1. Katilo šiluminis balansas

Katilo šiluminis balansas apskaičiuojamas pagal (4.31) formulę:

$$Q_{katilo} = Q_1 + Q_2 + Q_5 \quad (4.31)$$

*Q<sub>katilo</sub>* - šilumos srautas prieš katilą, kJ/kg;

*Q<sub>1</sub>* - naudingai išnaudota šiluma, kJ/kg;

*Q<sub>2</sub>* - šilumos nuostoliai su dūmais, kJ/kg;

*Q<sub>5</sub>* - šilumos nuostoliai į aplinką, kJ/kg.

Q<sub>5</sub> duomenys paiimti iš 2 tyrimo su termovizine kamera:

$$Q_5 = 19,53 \text{ kW}$$

Taigi nuostoliai į aplinką paašškės įvertinus katilo našumą vienetai, apskaičiuojami pagal (4.32) formulę:

$$Q_5^{naš.} = \frac{Q_5}{B} = \frac{19,53}{1,15} = 16,98 \frac{kJ}{kg} \quad (4.32)$$

Naudingai išnaudota šiluma apskaičiuojama pagal (4.33) formulę:

$$Q_1 = \frac{Q_n}{B} = \frac{8000}{1,15} = 6956,52 \frac{kJ}{kg} \quad (4.33)$$

$Q_2$  šilumos nuostoliai su dūmais randami 4.5 lentelėje, apskaičiuojami pagal (4.34) formulę:

$$Q_2 = 869,41 + \frac{1755,98-869,41}{200-100} * (133 - 100) = 1161,97 \frac{kJ}{kg} \quad (4.34)$$

Katilo šiluminis balansas apskaičiuojamas pagal (4.35) formulę:

$$Q_{katilo} = Q_1 + Q_2 + Q_5 = 6956,52 + 1161,97 + 16,98 = 8135,48 \frac{kJ}{kg} \quad (4.35)$$

Iš balanso lygties surandame dūmų temperatūrą prieš katilą, pateiktą 4.5 lentelėje, apskaičiuojama pagal (4.36) formulę:

$$800 + \frac{8135,48-7559,46}{8603,52-7559,46} * (900 - 800) = 855^\circ\text{C} \quad (4.36)$$

#### 4.2.2. Katilo pirmos eigos šilumos mainų kaitrovamzdyje skaičiavimas

Skaičiavimai atlikti pagal formules, kurios imtos iš metodikas.[6, 7, 9, 10, 11, 12]

Katilo kaitrovamzdžio išorinis diametras 1,490 m

Katilo kaitrovamzdžio vidinis diametras 1,442 m

Katilo kaitrovamzdžio ilgis 5,762 m

Dūmų temperatūra prieš kaitrovamzdį:

$$t'_{kaitrovam.} = 855^\circ\text{C}$$

Dūmų temperatūra už kaitrovamzdžio:

$$t''_{kaitrovam.} = 770^\circ\text{C}$$

Vidutinė temperatūra kaitrovamzdyje apskaičiuojama pagal (4.37) formulę:

$$t_{kaitrovamzd.} = \frac{t'_{kaitrovam.} + t''_{kaitrovam.}}{2} = \frac{855+770}{2} = 812^\circ\text{C} \quad (4.37)$$

Iš katilo išeinančių dūmų tūris normaliomis sąlygomis apskaičiuojamas pagal (4.38) formulę:

$$V_d^{nor.sąlyg.} = B * V_d = 1,15 * 4,59 = 5,28 \frac{m^3}{s} \quad (4.38)$$

Iš katilo išeinančių dūmų tūris realiomis sąlygomis apskaičiuojamas pagal (4.39) formulę:

$$V_d^{812} = V_d^{nor.sąlyg.} * \left(273,15 + \frac{t_d}{273,15}\right) = 5,28 * \left(273,15 + \frac{812}{273,15}\right) = 20,98 \frac{m^3}{s} \quad (4.39)$$

Dūmų praėjimo skerspjūvio plotas vamzdžiui apskaičiuojamas pagal (4.40) formulę:

$$f_d \text{ kaitrovaim.} = \frac{\pi * d_v^2}{4} = \frac{3,14 * 1,442^2}{4} = 1,63 m^2 \quad (4.40)$$

Čia:

$d_v$ - vidinis vamzdžio diametras, m.

Dūmų greitis kaitrovamzdyje apskaičiuojamas pagal (4.41) formulę:

$$W_d \text{ kaitrovaim.} = \frac{v_d^{812}}{f_d \text{ kaitrovaim.}} = \frac{20,98}{1,63} = 12,87 \frac{m}{s} \quad (4.41)$$

Iš [9] 8 priedo pagal temperatūrą  $t=812$  °C randu dūmų parametrus.

Kinematinis dūmų klampumo koeficientas apskaičiuojamas pagal (4.42) formulę:

$$v_d^{812} = 131,8 + \frac{(812-800)}{900-800} (152,5 - 131,8) 10^{-6} = 134,28 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s} \quad (4.42)$$

Prandtlio kriterijus apskaičiuojamas pagal (4.43) formulę:

$$Pr_d^{812} = 0,60 + \frac{(812-800)}{900-800} (0,60 - 0,59) = 0,601 \quad (4.43)$$

Šilumos laidumo koeficientas apskaičiuojamas pagal (4.44) formulę:

$$\lambda_d^{812} = 9,15 + \frac{(812-800)}{900-800} (10,0 - 9,15) 10^{-2} = 9,25 \cdot 10^{-2} \frac{W}{m^2K} \quad (4.44)$$

### • Šilumos mainai kaitrovamzdyje konvekcijos būdu

Apie tekėjimo režimą sprendžiama pagal Reinoldso kriterijų. Vamzdžiui jis lygus, apskaičiuojamas pagal (4.45) formulę:

$$Re = \frac{w \cdot d_v}{\nu} = \frac{12,57 \cdot 1,44}{134,28 \cdot 10^{-6}} = 134798 \quad (4.45)$$

Čia:  $w$  – vidutinis fluideo greitis, m/s;

$d_v$  – vamzdžio skersmuo, m;

$\nu$  – kinematinis fluideo klampumo koeficientas,  $m^2/s$ .

Reinoldso kriterijus yra  $Re > 10000$ , todėl tekėjimas yra visiškai turbulentinio režimo.

Iš [6] 2.146 formulės aiškėja, jog tekant fluidui uždaraus kanalais, kai tekėjimas visiškai turbulentinis, vidutinį šilumos atidavimo koeficientą galima apskaičiuoti pagal (4.46) formulę:

$$Nu_f = 0,021 \cdot Re_f^{0.8} Pr_f^{0.43} \left( \frac{Pr_f}{Pr_p} \right)^{0.25} * \varepsilon_l = 0,021 \cdot 134798^{0.8} \cdot 0,601^{0.43} \cdot 1^{0.25} * 1,11 = 237,80 \quad (4.46)$$

Kadangi, dūmų prandtlio kriterijus nuo temperatūros priklauso nežymiai, tai apytikriai lygus vienetiui -  $\left( \frac{Pr_f}{Pr_p} \right)^{0.25}$ .

$\varepsilon_l$ - tai yra daugiklis, kuriuo įvertinimas šilumos atidavimo koeficiento pokytis stabilizacijos ruože.

Randamas [6] 2.5 lentelėje pagal santykį  $\frac{l/d}{Re}$ .

$$\frac{5,762}{1,44} = 4$$

$$\varepsilon_l = 1,15 + \frac{4-2}{5-2} (1,1 - 1,15) = 1,11 \quad (4.47)$$

Vidutinis šilumos atidavimo koeficientas nuo dūmų vamzdžio sienelei apskaičiuojamas pagal (4.48) formulę:

$$\alpha_d = \frac{Nu_f \cdot \lambda}{d_e} = \frac{237,80 \cdot 0,0925}{1,44} = 15,27 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (4.48)$$

Čia:  $\alpha$  – vidutinis šilumos atidavimo koeficientas apiplaunamu paviršiumi,  $W/(m^2K)$ ;

- **Šilumos mainų spinduliavimu kaitrovamzdyje skaičiavimas**

Suminis spinduliuojančių dujų parcialinis slėgis apskaičiuojamas pagal (4.49) formulę:

$$p_s = (r_{RO_2} + r_{H_2O}) * p = (0,103 + 0,218) * 0,1 = 0,321 \text{ MPa} \quad (4.49)$$

Spinduliuojančių dujų tūris apskaičiuojamas pagal (4.50) formulę:

$$V_k = \frac{\pi * d^2}{4} * l = \frac{3,14 * 1,442^2}{4} * 5,762 = 9,40 \text{ m}^3 \quad (4.50)$$

Dujų tūrio paviršiaus plotas apskaičiuojamas pagal (4.51) formulę:

$$F_{pav} = \pi * d * l + \frac{2 * \pi * d^2}{4} = 3,14 * 1,442 * 5,762 + \frac{2 * 3,14 * 1,442^2}{4} = 29,35 \text{ m}^2 \quad (4.51)$$

Kaitrovamdzio spindulio kelio ilgis apskaičiuojamas pagal (4.52) formulę:

$$l = 3,6 \frac{V_k}{F_{pav}} = 3,6 * \frac{9,40}{29,35} = 1,15 \text{ m} \quad (4.52)$$

Dujų tūrio optinis tankis apskaičiuojamas pagal (4.53) formulę:

$$\kappa = (0,8 + 1,6 * r_{H_2O}) (p_{H_2O+RO_2} * l)^{0,5} (1 - 0,38 * 10^{-3} * T) = (0,8 + 1,6 * 0,218) (0,321 * 1,15)^{0,5} (1 - 0,38 * 10^{-3} * 1085) = 0,410 \quad (4.53)$$

Čia:  $r_{H_2O}$  – vandens garų tūrinė dalis degimo produktuose;

$p_{RO_2+H_2O}$  – suminis anglies dvideginio ir vandens garų parcialinis slėgis, bar;

$T$  – absoliuti degimo produktų temperatūra, K.

Dujų juodumo laipsnis apskaičiuojamas pagal (4.54) formulę:

$$\varepsilon_d = 1 - e^{-\kappa} = 1 - e^{-0,410} = 0,336 \quad (4.54)$$

Šilumos atidavimo spinduliavimu koeficientas apskaičiuojamas pagal (4.55) formulę:

$$\alpha_{spk} = \frac{0,5(\varepsilon_p + 1) * \delta (\varepsilon_d T_d^4 - A_d T_p^4)}{T_d - T_p} = \frac{0,5(0,9 + 1) * 5,67 * 0,336 \left( \left( \frac{812 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{80 + 273}{100} \right)^4 \right)}{1085 - 353} = 33,88 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (4.55)$$

Čia:  $\varepsilon_p$  – paviršiaus juodumo laipsnis (plienui pasirenkamas 0,9 [6]);

$T_d$  – dujų temperatūra, K;

$T_p$  – paviršiaus temperatūra, K;

$\sigma$  – absoliučiai juodo kūno spinduliavimo konstanta;

$\varepsilon_d$  – dujų sugėrimo koeficientas.

Visas šilumos nuo dūmų atidavimo sienelei koeficientas apskaičiuojamas pagal (4.56) formulę:

$$\alpha'_{d1} = \alpha_d + \alpha_{spk} = 15,27 + 33,88 = 49,15 \frac{W}{(m^2 \cdot K)} \quad (4.56)$$

- **Šilumos atidavimo nuo vamzdžio sienelės vandeniui koeficiento skaičiavimas**

Kaitravamdzio vamzdelių užimamas plotas apskaičiuojamas pagal (4.57) formulę:

$$F_{kaitra} = \frac{\pi * d_{iš}^2}{4} = \frac{3,14 * 1,49^2}{4} = 1,74 \text{ m}^2 \quad (4.57)$$



Antros eigos vamzdelių užimamas plotas apskaičiuojamas pagal (4.58) formulę:

Vamzdelis 88,9\*4 mm, vamzdelių kiekis - 234 vienetai.

$$F_{2 \text{ eig.vamz.}} = \frac{\pi * d_{i\bar{s}}^2}{4} * n_v = \frac{3,14 * 0,0889^2}{4} * 234 = 1,45 \text{ m}^2 \quad (4.58)$$

Trečios eigos vamzdelių užimamas plotas apskaičiuojamas pagal (4.59) formulę:

Vamzdelis 76,1\*3,6 mm, vamzdelių kiekis - 188 vienetai.

$$F_{3 \text{ eig.vamz.}} = \frac{\pi * d_{i\bar{s}}^2}{4} * n_v = \frac{3,14 * 0,0761^2}{4} * 188 = 0,85 \text{ m}^2 \quad (4.59)$$

Katilo vidinis skerspjūvio plotas apskaičiuojamas pagal (4.60) formulę:

$$F_{katil.} = \frac{\pi * d_{i\bar{s}}^2}{4} = \frac{3,14 * 3,64^2}{4} = 10,40 \text{ m}^2 \quad (4.60)$$

Vandens pratekėjimas plotas per katilą apskaičiuojamas pagal (4.61) formulę:

$$F_{prat.} = F_{katil.} - F_{kaitra.} - F_{2 \text{ eig.vamz.}} - F_{3 \text{ eig.vamz.}} = 10,40 - 1,74 - 1,45 - 0,85 = 6,36 \text{ m}^2 \quad (4.61)$$

*Pasirenkama*, jog per katilą pratekės trečdalis vandens, apskaičiuojama pagal (4.62) formulę:

$$F_{prat.} * 0,33 = 6,36 * 0,33 = 2,09 \text{ m}^2 \quad (4.62)$$

Vandens debitas per katilą apskaičiuojamas pagal (4.63) formulę:

$$M = \frac{Q}{c\Delta t} = \frac{8000}{4,19 * (90 - 70)} = 95,5 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 343,8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad (4.63)$$

Vidutinis vandens greitis išilgai aptekant vamzdžius apskaičiuojamas pagal (4.64) formulę:

$$w_v = \frac{M}{F_{prat.}} = \frac{0,0955}{2,09} = 0,046 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (4.64)$$

$$t_{vid} = \frac{t_{v1} + t_{v2}}{2} = \frac{90 + 70}{2} = 80^\circ\text{C} \quad (4.65)$$

Duomenys imami iš [6] priedų 11 lentelės:

Kinematinis dūmų klampumo koeficientas:

$$\nu = 0,365 * 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Šilumos laidumo koeficientas:

$$\lambda = 0,675 \frac{\text{W}}{\text{m} * \text{K}}$$

Prandtlio kriterijus:

$$Pr = 2,21$$

Apskaičiuoju tekėjimo režimą, apskaičiuojamas pagal (4.66) formulę:

$$Re = \frac{w * d_e}{\nu} = \frac{0,046 * 1,49}{0,365 * 10^{-6}} = 187780 \quad (4.66)$$

Reinoldso kriterijus yra  $Re > 10000$ , todėl tekėjimas yra visiškai turbulentinio režimo.

Iš [6] 2.146 formulės aiškėja, jog tekant fluidui uždarais kanalais, kai tekėjimas visiškai turbulentinis, vidutinį šilumos atidavimo koeficientą galima apskaičiuoti pagal (4.67) formulę:

$$Nu_f = 0,021 \cdot Re_f^{0,8} Pr_f^{0,43} \left( \frac{Pr_f}{Pr_p} \right)^{0,25} * \varepsilon_l = 0,021 \cdot 187780^{0,8} \cdot 2,21^{0,43} \cdot 1^{0,25} * 1,119 = 547,08 \quad (4.67)$$

Kadangi dūmų prandtl'io kriterijus nuo temperatūros priklauso nežymiai, tad apytikriai lygus vienetiui -  $\left( \frac{Pr_f}{Pr_p} \right)^{0,25}$ .

$\varepsilon_l$ - tai yra daugiklis, kuriuo įvertinamas šilumos atidavimo koeficiento pokytis stabilizacijos ruože.

Randamas [6] 2.5 lentelėje pagal santykį  $\frac{l/d}{Re}$ .

$$\frac{5,762}{1,49} = 3,86$$

$$\varepsilon_l = 1,15 + \frac{3,86-2}{5-2} (1,1 - 1,15) = 1,119 \quad (4.68)$$

Taigi, vandens šilumos atidavimo koeficientas apskaičiuojamas pagal (4.69) formulę:

$$\alpha_v = \frac{Nu_f * \lambda}{d_e} = \frac{547,08 * 0,675}{1,49} = 247,83 \frac{W}{(m^2 \cdot K)} \quad (4.69)$$

Šilumos nuo dūmų perdavimo vandeniui koeficientas apskaičiuojamas pagal (4.70) formulę:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha'_{d1} * d_v} + \frac{1}{2 * \lambda} \ln \frac{d_{is}}{d_v} + \frac{1}{\alpha_v * d_{is}}} = \frac{1}{\frac{1}{48,85 * 1,44} + \frac{1}{2 * 47} \ln \frac{1,49}{1,44} + \frac{1}{247,83 * 1,49}} = 58,25 \frac{W}{(m \cdot K)} \quad (4.70)$$

$\lambda$  – plieno šilumos atidavimo koeficientas ( $\lambda = 47 W/m \cdot K$ );

Pirmame konvekciniame pluošte perduotas šilumos kiekis apskaičiuojamas pagal (4.71) formulę:

$$Q_1 = k * \pi * l * n (t_d - t_v) = 58,25 * 3,14 * 5,762 * 1 * (812 - 80) = 771453,78 W = 771,45 kW \quad (4.71)$$

Perduotas šilumos kiekis, tenkantis 1 kg kuro, apskaičiuojamas pagal (4.72) formulę:

$$Q_{K1} = \frac{Q_1}{B} = \frac{771,45}{1,15} = 670,83 kJ/kg \quad (4.72)$$

Dūmų šiluma po pirmo konvekcinio pluošto apskaičiuojama pagal (4.73) formulę:

$$Q_{d1} = Q_k - Q_{K1} = 8135,48 - 670,83 = 7464,65 kJ/kg \quad (4.73)$$

Dūmų temperatūra po pirmo konvekcinio pluošto randama 4.5 lentelėje, apskaičiuojama pagal (4.74) formulę :

$$t_{d1} = 700 + \frac{7464,65 - 6535,50}{7559,46 - 6535,50} (800 - 700) = 791^\circ C \quad (4.74)$$

Vidutinė analitiškai apskaičiuota dūmų temperatūra apskaičiuojama pagal (4.75) formulę:

$$t_{d2} = \frac{855 + 791}{2} = 823^\circ C \quad (4.75)$$

Nusistatytos ir apskaičiuotos temperatūrų nesutapimas apskaičiuojamas pagal (4.76) formulę:

$$\Delta = \frac{812-823}{812} * 100 = 1,35\% \quad (4.76)$$

#### 4.2.3. Šilumos mainų antrame vamzdelių pluošte skaičiavimas

Katilo antros eigos išorinis vamzdžio diametras –  $d_{is} = 0,0889$  m

Katilo vidinis antros eigos vamzdžio diametras –  $d_v = 0,0809$  m

Vamzdžio ilgis –  $l = 5,981$  m

Dūmų temperatūra prieš pirmąjį pluoštą:

$$t_1 = 791^\circ\text{C}$$

Dūmų temperatūra už pirmojo pluošto:

$$t_2 = 330^\circ\text{C}$$

Vidutinė temperatūra apskaičiuojamas pagal (4.77) formulę:

$$t_{vid} = \frac{t_1+t_2}{2} = \frac{791+330}{2} = 560^\circ\text{C} \quad (4.77)$$

Dūmų tūris, išeinantis realiomis sąlygomis, apskaičiuojamas pagal (4.78) formulę:

$$V_d^{560} = V_d^{n.s.} \cdot \left(273 + \frac{t_d}{273}\right) = 5,28 \cdot \left(\frac{560+273}{273}\right) = 16,11 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (4.78)$$

Dūmų praėjimo skerspjūvio plotas vamzdžiui apskaičiuojamas pagal (4.79) formulę:

$$f_d = n_v \frac{\pi d_v^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,0809^2}{4} * 234 = 1,20 \text{ m}^2 \quad (4.79)$$

Čia:  $d_v$  – vamzdžio vidinis diametras, m;

$n_v$  – vamzdelių skaičius pirmame pluošte.

Dūmų greitis pirmame vamzdelių pluošte apskaičiuojamas pagal (4.80) formulę :

$$w_{d1} = \frac{V_d^{560}}{f_d} = \frac{16,11}{1,20} = 13,42 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (4.80)$$

Iš [9] 8 priedo pagal temperatūrą  $t = 560^\circ\text{C}$  randu dūmų parametrus.

Kinematinis dūmų klampumo koeficientas apskaičiuojamas pagal (4.81) formulę:

$$\nu_d^{560} = 76,30 + \frac{(560-500)}{600-500} (93,61 - 76,30) 10^{-6} = 86,68 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad (4.81)$$

Prandtlio kriterijus apskaičiuojamas pagal (4.82) formulę:

$$Pr_d^{560} = 0,63 + \frac{(560-500)}{600-500} (0,63 - 0,62) = 0,636 \quad (4.82)$$

Šilumos laidumo koeficientas apskaičiuojamas pagal (4.83) formulę:

$$\lambda_d^{560} = 6,56 + \frac{(560-500)}{600-500} (7,42 - 6,56) 10^{-2} = 7,076 \cdot 10^{-2} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (4.83)$$

- **Šilumos mainų antrame vamzdelių pluošte konvekcijos būdu skaičiavimai**

Apie tekėjimo režimą sprendžiama pagal Reinoldso kriterijų. Vamzdžiui jis lygus, apskaičiuojamas pagal (4.84) formulę:

$$Re = \frac{w \cdot d_v}{\nu} = \frac{13,42 \cdot 0,0809}{86,68 \cdot 10^{-6}} = 12525 \quad (4.84)$$

Čia:  $w$  – vidutinis fluideo greitis, m/s;  
 $d_v$  – vamzdžio skersmuo, m;  
 $\nu$  – kinematinis fluideo klampumo koeficientas, m<sup>2</sup>/s.

Reinoldso kriterijus yra  $Re > 10000$ , todėl tekėjimas yra visiškai turbulentinio režimo.

Iš [6] 2.146 formulės aiškėja, jog tekant fluidui uždaraus kanalais, kai tekėjimas visiškai turbulentinis, vidutinį šilumos atidavimo koeficientą galima apskaičiuoti pagal (4.85) formulę:

$$Nu_f = 0,021 \cdot Re_f^{0.8} Pr_f^{0.43} \left( \frac{Pr_f}{Pr_p} \right)^{0.25} * \varepsilon_l = 0,021 \cdot 12525^{0.8} \cdot 0,636^{0.43} \cdot 1^{0.25} * 1 = 32,80 \quad (4.85)$$

Kadangi dūmų prandtlio kriterijus nuo temperatūros priklauso nežymiai, tad apytikriai lygus vienetiui -  $\left( \frac{Pr_f}{Pr_p} \right)^{0.25}$ .

$\varepsilon_l$  - tai yra daugiklis, kuriuo įvertinimas šilumos atidavimo koeficiento pokytis stabilizacijos ruože.

Randamas iš [9] 2.5 lentelės pagal santykį  $\frac{l/d}{Re}$ .

$$\frac{5,981}{0,0809} = 73,93$$

$l/d > 50$ , todėl  $\varepsilon_l = 1$

Vidutinis šilumos atidavimo koeficientas nuo dūmų vamzdžio sienelei apskaičiuojamas pagal (4.86) formulę:

$$\alpha_d = \frac{Nu_f \cdot \lambda}{d_e} = \frac{32,80 \cdot 0,0707}{0,0809} = 28,66 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (4.86)$$

Čia:  $\alpha$  – vidutinis šilumos atidavimo koeficientas apiplaunamu paviršiumi, W/(m<sup>2</sup>K);  
 $l$  – būdingas apiplaunamo kūno paviršiaus matmuo, m. Vamzdžiui imamas vamzdžio skersmuo.

$\lambda$  – fluideo šilumos laidumo koeficientas pagal jo vidutinę temperatūrą, W/mK.

- **Šilumos mainai spinduliavimu antrame vamzdelių pluošte**

Pirmojo pluošto spinduliuojančių dujų tūris apskaičiuojamas pagal (4.87) formulę:

$$V_k = \frac{\pi \cdot d^2}{4} * l = \frac{3,14 \cdot 0,0809^2}{4} * 5,981 = 0,030 m^3 \quad (4.87)$$

Pirmojo pluošto dujų tūrio paviršiaus plotas apskaičiuojamas pagal (4.88) formulę:

$$F_{pav} = \pi * d * l + \frac{2 * \pi * d^2}{4} = 3,14 * 0,0809 * 5,981 + \frac{2 * 3,14 * 0,0809^2}{4} = 1,52 m^2 \quad (4.88)$$

Pirmojo pluošto spindulio kelio ilgis apskaičiuojamas pagal (4.89) formulę:

$$l = 3,6 \frac{V_k}{F_{pav}} = 3,6 * \frac{0,030}{1,520} = 0,071 m \quad (4.89)$$

Dujų tūrio optinis tankis apskaičiuojamas pagal (4.90) formulę:

$$\kappa = (0,8 + 1,6 \cdot r_{H_2O})(p_{H_2O+RO_2} \cdot l)^{0,5} (1 - 0,38 \cdot 10^{-3} \cdot T) = (0,8 + 1,6 \cdot 0,218)(0,321 \cdot 0,071)^{0,5} (1 - 0,38 \cdot 10^{-3} \cdot 833) = 0,118 \quad (4.90)$$

Dujų juodumo laipsnis apskaičiuojamas pagal (4.91) formulę:

$$\varepsilon_d = 1 - e^{-\kappa} = 1 - e^{-0,118} = 0,111 \quad (4.91)$$

Šilumos atidavimo spinduliavimu koeficientas apskaičiuojamas pagal (4.92) formulę:

$$\alpha_{spk} = \frac{0,5(\varepsilon_p+1) \cdot \delta \cdot \varepsilon_d \left( \left( \frac{T_d}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_p}{100} \right)^4 \right)}{T_d - T_p} = \frac{0,5(0,9+1) \cdot 5,67 \cdot 0,111 \left( \left( \frac{560+273}{100} \right)^4 - \left( \frac{80+273}{100} \right)^4 \right)}{833-353} = 5,80 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (4.92)$$

Čia:  $\varepsilon_p$  – paviršiaus juodumo laipsnis, (plienui pasirenkamas 0,9 [6]);

$T_d$  – dujų temperatūra, K;

$T_p$  – paviršiaus temperatūra, K;

$\sigma$  – absoliučiai juodo kūno spinduliavimo konstanta;

$\varepsilon_d$  – dujų sugėrimo koeficientas.

Visas šilumos nuo dūmų atidavimo sienelės koeficientas apskaičiuojamas pagal (4.93) formulę:

$$\alpha'_{d1} = \alpha_{d1} + \alpha_{spk} = 28,66 + 5,80 = 34,46 \frac{W}{(m^2 \cdot K)} \quad (4.93)$$

• **Šilumos atidavimo nuo vamzdžio sienelės vandeniui koeficiento skaičiavimas**

Pasirenku, jog per katilą pratekės trečdalis vandens, apskaičiuojamas pagal (4.94) formulę:

$$F_{prat.} \cdot 0,33 = 6,36 \cdot 0,33 = 2,09 m^2 \quad (4.94)$$

Vandens debitas per katilą apskaičiuojamas pagal (4.95) formulę:

$$M = \frac{Q}{c \Delta t} = \frac{8000}{4,19 \cdot (90-70)} = 95,5 \frac{kg}{s} = 343,8 \frac{m^3}{h} \quad (4.95)$$

Vidutinis vandens greitis išilgai aptekant vamzdžius apskaičiuojamas pagal (4.96) formulę:

$$w_v = \frac{M}{F_{prat.}} = \frac{0,0955}{2,09} = 0,046 \frac{m}{s} \quad (4.96)$$

$$t_{vid} = \frac{t_{v1} + t_{v2}}{2} = \frac{90+70}{2} = 80^\circ C \quad (4.97)$$

Duomenys imami iš [6] priedo 11 lentelės:

Kinematinis dūmų klampumo koeficientas:

$$\nu = 0,365 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$$

Šilumos laidumo koeficientas:

$$\lambda = 0,675 \frac{W}{m \cdot K}$$

Prandtlio kriterijus:

$$Pr = 2,21$$

Apskaičiuoju tekėjimo režimą, apskaičiuojamas pagal (4.98) formulę :

$$Re = \frac{w \cdot d_e}{\nu} = \frac{0,046 \cdot 0,0889}{0,365 \cdot 10^{-6}} = 10195 \quad (4.98)$$

Reinoldso kriterijus yra  $Re > 10000$ , todėl tekėjimas yra visiškai turbulentinio režimo.

Iš [6] 2.146 formulės aiškėja, jog tekant fluidui uždaraus kanalais, kai tekėjimas visiškai turbulentinis, vidutinį šilumos atidavimo koeficientą galima apskaičiuoti pagal (4.99) formulę:

$$Nu_f = 0,021 \cdot Re_f^{0.8} Pr_f^{0.43} \left( \frac{Pr_f}{Pr_p} \right)^{0.25} * \varepsilon_l = 0,021 \cdot 10195^{0.8} \cdot 2,21^{0.43} \cdot 1^{0.25} * 1 = 47,53 \quad (4.99)$$

Kadangi dūmų prandtl'io kriterijus nuo temperatūros priklauso nežymiai, tad apytikriai lygus vienetiui -  $\left( \frac{Pr_f}{Pr_p} \right)^{0.25}$ .

$\varepsilon_l$ - tai yra daugiklis, kuriuo įvertinimas šilumos atidavimo koeficiento pokytis stabilizacijos ruože.

Randamas [6] 2.5 lentelėje pagal santykį  $\frac{l/d}{Re}$ .

$$\frac{5,981}{0,0889} = 67,27$$

$l/d > 50$ , todėl  $\varepsilon_l = 1$ ;

Taigi, vandens šilumos atidavimo koeficientas bus apskaičiuojamas pagal (4.100) formulę:

$$\alpha_v = \frac{Nu_f \cdot \lambda}{d_e} = \frac{47,53 \cdot 0,675}{0,0889} = 360,88 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (4.100)$$

Šilumos nuo dūmų perdavimo vandeniui koeficientas apskaičiuojamas pagal (4.101) formulę:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{d1} \cdot d_v} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \ln \frac{d_{is}}{d_v} + \frac{1}{\alpha_v \cdot d_{is}}} = \frac{1}{\frac{1}{34,46 \cdot 0,0809} + \frac{1}{2 \cdot 47} \ln \frac{0,0889}{0,0809} + \frac{1}{360,88 \cdot 0,0889}} = 2,55 \frac{W}{m \cdot K} \quad (4.101)$$

$\lambda$  – plieno šilumos atidavimo koeficientas ( $\lambda = 47 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ).

Pirmame konvekciniame pluošte perduotas šilumos kiekis apskaičiuojamas pagal (4.102) formulę:

$$Q_1 = k \cdot \pi \cdot l \cdot n \cdot (t_d - t_v) = 2,55 \cdot 3,14 \cdot 5,981 \cdot 234 \cdot (560 - 80) = 5378989,86 \text{ W} = 5378,98 \text{ kW} \quad (4.102)$$

Perduotas šilumos kiekis, tenkantis 1 kg kuro, apskaičiuojamas pagal (4.103) formulę:

$$Q_{K1} = \frac{Q_1}{B} = \frac{5378,98}{1,15} = 4677,38 \text{ kJ/kg} \quad (4.103)$$

Dūmų šiluma po pirmo konvekcinio pluošto apskaičiuojama pagal (4.104) formulę:

$$Q_{d1} = Q_k - Q_{K1} = 7469,26 - 4677,38 = 2791,88 \text{ kJ/kg} \quad (4.104)$$

Dūmų temperatūra po pirmo konvekcinio pluošto randama 4.5 lentelėje, apskaičiuojama pagal (4.105) formulę:

$$t_{d1} = 300 + \frac{2791,87-2663,92}{3595,23-2663,92}(400 - 300) = 313^{\circ}\text{C} \quad (4.105)$$

Vidutinė analitiškai apskaičiuota dūmų temperatūra apskaičiuojama pagal (4.106) formulę:

$$t_{d2} = \frac{791+313}{2} = 552^{\circ}\text{C} \quad (4.106)$$

Nusistatytos ir apskaičiuotos temperatūrų nesutapimas apskaičiuojamas pagal (4.107) formulę:

$$\Delta = \frac{560-552}{560} * 100 = 1,42\% \quad (4.107)$$

#### 4.2.4. Šilumos mainų trečiame konvekciniame pluošte skaičiavimas

Katilo trečios eigos išorinis vamzdžio diametras –  $d_{i3} = 0,0761$  m;

Katilo vidinis trečios eigos vamzdžio diametras –  $d_v = 0,0689$  m;

Vamzdžio ilgis –  $l = 5,984$  m.

Dūmų temperatūra prieš pluoštą:

$$t_1 = 313^{\circ}\text{C}$$

Dūmų temperatūra už pluošto:

$$t_2 = 185^{\circ}\text{C}$$

Vidutinė temperatūra apskaičiuojama pagal (4.108) formulę:

$$t_{vid} = \frac{t_1+t_2}{2} = \frac{313+185}{2} = 249 \quad (4.108)$$

Dūmų tūris, išeinantis realiomis sąlygomis, apskaičiuojamas pagal (4.109) formulę:

$$V_d^{249} = V_d^{n.s.} \cdot \left(273 + \frac{t_d}{273}\right) = 5,28 \cdot \left(\frac{249+273}{273}\right) = 10,09 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (4.109)$$

Dūmų praėjimo skerspjūvio plotas apskaičiuojamas pagal (4.110) formulę:

$$f_d = n_v \frac{\pi d_v^2}{4} = \frac{3,14 * 0,0689^2}{4} * 188 = 0,700 \text{ m}^2 \quad (4.110)$$

Čia:  $d_v$  – vamzdžio vidinis diametras, m;

$n_v$  – vamzdelių skaičius pirmame pluošte.

Dūmų greitis vamzdžiuose apskaičiuojamas pagal (4.111) formulę:

$$w_{d1} = \frac{V_d^{249}}{f_d} = \frac{10,09}{0,700} = 14,42 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (4.111)$$

Iš [9] 8 priedo pagal temperatūrą  $t = 249$  °C randu dūmų parametrus.

Kinematinis dūmų klampumo koeficientas apskaičiuojamas pagal (4.112) formulę:

$$\nu_d^{249} = 32,80 + \frac{(249-200)}{300-200}(45,81 - 32,80)10^{-6} = 39,17 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad (4.112)$$

Prandtlio kriterijus apskaičiuojamas pagal (4.113) formulę:

$$Pr_d^{249} = 0,67 + \frac{(249-200)}{300-200} (0,67 - 0,65) = 0,679 \quad (4.113)$$

Šilumos laidumo koeficientas apskaičiuojamas pagal (4.114) formulę:

$$\lambda_d^{249} = 4,01 + \frac{(249-200)}{300-200} (4,84 - 4,01) 10^{-2} = 4,42 \cdot 10^{-2} \frac{W}{m^2K} \quad (4.114)$$

• **Šilumos mainai trečiame vamzdelių pluošte konvekcijos būdu**

Apie tekėjimo režimą sprendžiama pagal Reinoldso kriterijų. Vamzdžiui jis lygus, apskaičiuojamas pagal (4.115) formulę:

$$Re = \frac{w \cdot d_v}{\nu} = \frac{14,42 \cdot 0,0689}{39,17 \cdot 10^{-6}} = 25364 \quad (4.115)$$

Čia:  $w$  – vidutinis fluideo greitis, m/s;

$d_v$  – vamzdžio skersmuo, m;

$\nu$  – kinematinis fluideo klampumo koeficientas,  $m^2/s$ .

Reinoldso kriterijus yra  $Re > 10000$ , todėl tekėjimas yra visiškai turbulentinio režimo.

Iš [6] 2.146 formulės aiškėja, jog tekant fluidui uždaraais kanalais, kai tekėjimas visiškai turbulentinis, vidutinį šilumos atidavimo koeficientą galima apskaičiuoti, pagal (4.116) formulę:

$$Nu_f = 0,021 \cdot Re_f^{0,8} Pr_f^{0,43} \left( \frac{Pr_f}{Pr_p} \right)^{0,25} * \varepsilon_l = 0,021 \cdot 25364^{0,8} \cdot 0,679^{0,43} \cdot 1^{0,25} * 1 = 59,33 \quad (4.116)$$

Kadangi dūmų prandtlio kriterijus nuo temperatūros priklauso nežymiai, tad apytikriai lygus vienetiui -  $\left( \frac{Pr_f}{Pr_p} \right)^{0,25}$ .

$\varepsilon_l$ - tai yra daugiklis, kuriuo įvertinimas šilumos atidavimo koeficiento pokytis stabilizacijos ruože.

Randamas [6] 2.5 lentelėje pagal santykį  $\frac{l/d}{Re}$ .

$$\frac{5,984}{0,0689} = 86,85$$

$l/d > 50$ , todėl  $\varepsilon_l = 1$ .

Vidutinis šilumos atidavimo koeficientas nuo dūmų vamzdžio sienelei bus apskaičiuojamas pagal (4.117) formulę:

$$\alpha_d = \frac{Nu_f \cdot \lambda}{d_e} = \frac{59,33 \cdot 0,0442}{0,0689} = 38,06 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (4.117)$$

Čia:  $\alpha$  – vidutinis šilumos atidavimo koeficientas apiplaunamu paviršiumi,  $W/(m^2K)$ ;

$l$  – būdingas apiplaunamo kūno paviršiaus matmuo, m. Vamzdžiui imamas vamzdžio skersmuo;

$\lambda$  – fluideo šilumos laidumo koeficientas pagal jo vidutinę temperatūrą,  $W/mK$ .



- **Šilumos mainai spinduliavimu trečiame vamzdelių pluošte**

Antros eigos vamzdelių spinduliuojančių dujų tūris apskaičiuojamas pagal (4.118) formulę:

$$V = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot l = \frac{3,14 \cdot 0,0689^2}{4} \cdot 5,984 = 0,022 m^3 \quad (4.118)$$

Antros eigos vamzdelių dujų tūrio paviršiaus plotas apskaičiuojamas pagal (4.119) formulę:

$$F = \pi \cdot d \cdot l + \frac{2 \cdot \pi \cdot d^2}{4} = 3,14 \cdot 0,0681 \cdot 5,984 + \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,0689^2}{4} = 1,29 m^2 \quad (4.119)$$

Antros eigos vamzdelių spindulio kelio ilgis apskaičiuojamas pagal (4.120) formulę:

$$l = 3,6 \frac{V}{F} = 3,6 \cdot \frac{0,022}{1,29} = 0,061 m \quad (4.120)$$

Dujų tūrio optinis tankis apskaičiuojamas pagal (4.121) formulę:

$$\kappa = (0,8 + 1,6 \cdot r_{H_2O}) (p_{H_2O+RO_2} \cdot l)^{0,5} (1 - 0,38 \cdot 10^{-3} \cdot T) = (0,8 + 1,6 \cdot 0,218) (0,321 \cdot 0,061)^{0,5} (1 - 0,38 \cdot 10^{-3} \cdot 522) = 0,128 \quad (4.121)$$

Čia:  $r_{H_2O}$  – vandens garų tūrinė dalis degimo produktuose;

$p_{RO_2+H_2O}$  – suminis anglies dvideginio ir vandens garų parcialinis slėgis, bar;

$T$  – absoliuti degimo produktų temperatūra, K.

Dujų juodumo laipsnis apskaičiuojamas pagal (4.122) formulę:

$$\varepsilon_d = 1 - e^{-\kappa} = 1 - e^{-0,128} = 0,120 \quad (4.122)$$

Šilumos atidavimo spinduliavimo koeficientas apskaičiuojamas pagal (4.123) formulę:

$$\alpha_{spk} = \frac{0,5(\varepsilon_p + 1) \cdot \delta \cdot \varepsilon_d \left( \left( \frac{T_d}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_v}{100} \right)^4 \right)}{T_d - T_p} = \frac{0,5(0,9 + 1) \cdot 5,67 \cdot 0,120 \left( \left( \frac{249 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{80 + 273}{100} \right)^4 \right)}{522 - 353} = 2,24 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (4.123)$$

Čia:  $\varepsilon_p$  – paviršiaus juodumo laipsnis, (plienui priimu 0,9 [6]);

$T_d$  – dujų temperatūra, K;

$T_v$  – paviršiaus temperatūra, K;

$\sigma$  – absoliučiai juodo kūno spinduliavimo konstanta;

$\varepsilon_d$  – dujų sugėrimo koeficientas.

Visas šilumos atidavimo nuo dūmų sienei koeficientas apskaičiuojamas pagal (4.124) formulę:

$$\alpha_{d1} = \alpha_{d2} + \alpha_{spk} = 38,06 + 2,24 = 40,3 \frac{W}{(m^2 \cdot K)} \quad (4.124)$$

- **Šilumos atidavimo nuo vamzdžio sienelės vandeniui koeficiento skaičiavimas**

Pasirenku, jog per katilą pratekės trečdalis vandens, apskaičiuojamas pagal (4.125) formulę:

$$F_{prat.} \cdot 0,33 = 6,36 \cdot 0,33 = 2,09 m^2 \quad (4.125)$$

Vandens debitas per katilą apskaičiuojamas pagal (4.126) formulę:

$$M = \frac{Q}{c\Delta t} = \frac{8000}{4,19 \cdot (90-70)} = 95,5 \frac{kg}{s} = 343,8 \frac{m^3}{h} \quad (4.126)$$

Vidutinis vandens greitis išilgai aptekant vamzdžius apskaičiuojamas pagal (4.127) formulę:

$$w_v = \frac{M}{F_{prat.}} = \frac{0,0955}{2,09} = 0,046 \frac{m}{s} \quad (4.127)$$

$$t_{vid} = \frac{t_{v1} + t_{v2}}{2} = \frac{90 + 70}{2} = 80^\circ C \quad (4.128)$$

Duomenys imami iš [6] priedu 11 lentelės:

Kinematinio dūmų klampumo koeficientas:

$$\nu = 0,365 * 10^{-6} \frac{m^2}{s}$$

Šilumos laidumo koeficientas:

$$\lambda = 0,675 \frac{W}{m * K}$$

Prandtlio kriterijus:

$$Pr = 2,21$$

Apskaičiuoju tekėjimo režimą, apskaičiuojamas pagal (4.129) formulę:

$$Re = \frac{w * d_e}{\nu} = \frac{0,046 * 0,0761}{0,365 * 10^{-6}} = 9590 \quad (4.129)$$

Reinoldso kriterijus yra  $2000 < Re < 10000$ , todėl tekėjimas yra pereinamo tekėjimo režimas.

Iš [9] 2.82 formulės aiškėja, jog tekant fluidui uždarais kanalais, kai tekėjimas pereinamasis, vidutinį šilumos atidavimo koeficientą galima apskaičiuoti pagal (4.130) formulę:

$$Nu_f = (0,026 \cdot Re_f^{0.8} - 8) Pr_f^{0.43} \left( \frac{Pr_f}{Pr_p} \right)^{0.25} = (0,026 \cdot 9590^{0.8} - 8) \cdot 2,21^{0.43} \cdot \frac{2,21^{0.25}}{13,67} = 28,40 \quad (4.130)$$

Taigi, vandens šilumos atidavimo koeficientas bus apskaičiuojamas pagal (4.131) formulę:

$$\alpha_v = \frac{Nu_f * \lambda}{d_e} = \frac{28,40 * 0,675}{0,0761} = 251,90 \frac{W}{(m^2 \cdot K)} \quad (4.131)$$

Šilumos nuo dūmų perdavimo vandeniui koeficientas apskaičiuojamas pagal (4.132) formulę:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha'_{d1} * d_v} + \frac{1}{2 * \lambda} \ln \frac{d_{iS}}{d_v} + \frac{1}{\alpha_v * d_{iS}}} = \frac{1}{\frac{1}{40,3 * 0,0689} + \frac{1}{2 * 47} \ln \frac{0,0761}{0,0689} + \frac{1}{251,90 * 0,0761}} = 2,41 \frac{W}{m \cdot K} \quad (4.132)$$

$\lambda$  – plieno šilumos atidavimo koeficientas ( $\lambda = 47 W/m \cdot K$ );

Pirmame konvekciniame pluošte perduotas šilumos kiekis apskaičiuojamas pagal (4.133) formulę:

$$Q_1 = k * \pi * l * n(t_d - t_v) = 2,41 * 3,14 * 5,984 * 188 * (249 - 80) = 1438741,69 \text{ W} = 1438,74 \text{ kW} \quad (4.133)$$

Perduotas šilumos kiekis, tenkantis 1 kg kuro, apskaičiuojamas pagal (4.134) formulę:

$$Q_{K1} = \frac{Q_1}{B} = \frac{1438,74}{1,15} = 1251,07 \text{ kJ/kg} \quad (4.134)$$

Dūmų šiluma po pirmo konvekcinio pluošto apskaičiuojama pagal (4.135) formulę:

$$Q_{d1} = Q_k - Q_{K1} = 2791,88 - 1251,07 = 1540,80 \text{ kJ/kg} \quad (4.135)$$

Dūmų temperatūra po pirmo konvekcinio pluošto randama 4.5 lentelėje, apskaičiuojama pagal (4.136) formulę :

$$t_{d1} = 100 + \frac{1540,80 - 869,41}{1755,98 - 869,41} (200 - 100) = 175^\circ\text{C} \quad (4.136)$$

Vidutinė analitiškai apskaičiuota dūmų temperatūra apskaičiuojama pagal (4.137) formulę:

$$t_{d2} = \frac{313 + 175}{2} = 244^\circ\text{C} \quad (4.137)$$

Nusistatytos ir apskaičiuotos temperatūrų nesutapimas apskaičiuojamas pagal (4.138) formulę:

$$\Delta = \frac{249 - 244}{249} * 100 = 2,0\% \quad (4.138)$$

## 5. KATILINĖS NR.1 KATILO VHB 8000 IR PAKUROS SKAIČIAVIMAS ESANT 30 PROC. KURO DRĖGMEI

Toliau šiluminis skaičiavimas buvo atliktas analogiškas kaip esant 50 proc. kuro drėgmei. Esant 30 proc. kuro drėgmei skaičiavimo rezultatai bus pateikti lentelėse.

5.1 lentelė. Teorinė dūmų entalpija esant 30 proc. kuro drėgmei

$t, ^\circ\text{C}$	$(ct)_{RO_2}$	$(ct)_{N_2}$	$(ct)_{H_2O}$	$(ct)_{oro}$	$H_t d$
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
100	112,39	337,17	136,52	427,83	1013,91
200	236,28	676,31	276,15	860,07	2048,81
300	369,37	1020,01	419,69	1300,08	3109,15
400	510,21	1370,01	567,93	1748,83	4196,98
500	657,27	1727,21	720,93	2208,74	5314,14
600	809,50	2092,32	878,77	2677,73	6458,33
700	966,30	2465,45	1042,00	3156,95	7630,70
800	1126,93	2845,55	1210,30	3643,21	8825,99
900	1290,46	3230,75	1384,20	4138,29	10043,70
1000	1456,22	3621,20	1562,67	4637,91	11278,00
1100	1625,00	4016,81	1746,07	5144,05	12531,93
1200	1795,65	4416,01	1933,98	5656,30	13801,93
1300	1967,63	4820,88	2125,68	6172,57	15086,75
1400	2141,01	5226,69	2321,19	6691,60	16380,49
1500	2315,55	5635,93	2520,60	7214,97	17687,05
1600	2491,18	6048,30	2722,60	7742,29	19004,36
1700	2668,00	6463,47	2928,99	8315,11	20375,58

5.2 lentelė. Tikrosios dūmų entalpijos esant 30 proc. kuro drėgmei

$t, ^\circ\text{C}$	$H_d \text{ kJ/kg}$
0	0,00
100	1142,26
200	2306,83
300	3499,17
400	4721,63
500	5976,77
600	7261,64
700	8577,79
800	9918,95
900	11285,19
1000	12669,38
1100	14075,14
1200	15498,82
1300	16938,52
1400	18387,97
1500	19851,54
1600	21327,05
1700	22870,11

5.3 lentelė. Kuro degimo, pakuros balanso, katilo balanso skaičiavimo rezultatai esant 30 proc. kuro drėgmei

Žymėjimas	Matavimo vienetai	Rezultatas	Žymėjimas	Matavimo vienetai	Rezultatas
$C_n$	%	33,35	$H_{oro}^t$	kJ/kg	85,57
$H_n$	%	4,2	$Q_{oro}$	kJ/kg	111,24
$S_n$	%	0,07	$Q_d$	kJ/kg	12533,24
$O_n$	%	29,05	$Q_3$	kJ/kg	25,07
$N_n$	%	0,42	$Q_4$	kJ/kg	50,13
$A_n$	%	0,35	$Q_{v.5} \text{ pakur.}$	kW	29,17
$W_n$	%	30	$Q_{h5} \text{ pakur.}$	kW	9,51
$Q_{\%}^{n.m.}$	kJ/kg	12422	$Q_5 \text{ pakur.}$	kW	36,68
$B$	kg/s	0,757	$Q_5^{nas.} \text{ pakur.}$	kJ/kg	48,45
$V_0^t$	m <sup>3</sup> /kg	3,29	$Q_6$	kJ/kg	12,53
$V_{RO_2}$	m <sup>3</sup> /kg	0,661	$Q_2$	kJ/kg	12397,06
$V_{N_2}^t$	m <sup>3</sup> /kg	2,602	$t_d^{is.}$	°C	980
$V_{N_2}$	m <sup>3</sup> /kg	3,382	$Q_5 \text{ katil.}$	kW	19,53
$V_{H_2O}$	m <sup>3</sup> /kg	0,907	$Q_5^{nas.} \text{ katil.}$	kJ/kg	25,80
$V_d$	m <sup>3</sup> /kg	5,94	$Q_1$	kJ/kg	10568,03
$r_{RO_2}$		0,111	$Q_2 \text{ katil.}$	kJ/kg	1782,77
$r_{H_2O}$		0,153	$Q_{katilo}$	kJ/kg	12376,60

5.4 lentelė. Šilumos mainų kaitrovamzdyje skaičiavimo rezultatai esant 30 proc. kuro drėgmei

Žymėjimas	Matavimo vienetai	Rezultatas	Žymėjimas	Matavimo vienetai	Rezultatas
$Q_{katilo}$	kJ/kg	12376,60	$F_{kaitra.}$	m <sup>2</sup>	1,74
$t'_{kaitrovam.}$	°C	979	$F_{prat}$	m <sup>2</sup>	2,09
$t''_{kaitrovam}$	°C	889	$wv$	m/s	0,046
$V_d$	m <sup>3</sup> /s	19,84	$tv$	°C	80,0
$w_{dkaitrovam.}$	m/s	12,17	$vv$	m/s	0,365*10 <sup>-7</sup>
$vd$	m <sup>2</sup> /s	159,91*10 <sup>-6</sup>	$Prv$		2,21
$Prd$		0,583	$\lambda v$	W/(mK)	0,675
$\lambda d$	W/(mK)	6,86*10 <sup>-2</sup>	$Rev$		187780
$Red$		109591	$Nuv$		542,68
$l/d$		3,99	$\epsilon l$		1,11
$\epsilon l$		1,11	$\alpha v$	W/(m <sup>2</sup> K)	245,84
$Nuf$		198,88	$k$	W/(m <sup>2</sup> K)	54,04
$\alpha d$	W/(m <sup>2</sup> K)	9,46	$Q_1$	kW	834,98
$Vk$	m <sup>3</sup>	9,40	$QK_1$	kJ/kg	1103,01
$F_{pav}$	m <sup>2</sup>	29,34	$Qd_1$	kJ/kg	11273,59
$l$	m	1,15	$td_1$	°C	899
$\kappa$		0,311	$td_2$	°C	939
$\epsilon d$		0,267	$\Delta$	%	0,53%
$T_p$	K	353,0			
$\alpha_{spk}$	W/(m <sup>2</sup> K)	35,48			
$\alpha'd_1$	W/(m <sup>2</sup> K)	44,94			

5.5 lentelė. Šilumos mainų antros eigos vamzdelių pluošte skaičiavimo rezultatai esant 30 proc. kuro drėgmei

Žymėjimas	Matavimo vienetai	Rezultatas	Žymėjimas	Matavimo vienetai	Rezultatas
Qd1	kJ/kg	11273,59	F <sub>2 eig. vamz.</sub>	m <sup>2</sup>	1,45
t1	°C	899	Fprat	m <sup>2</sup>	2,09
t2	°C	310	wv	m/s	0,046
Vd	m <sup>3</sup> /s	14,42	tv	°C	80
wd	m/s	12,01	vv	m/s	0,365*10 <sup>-6</sup>
vd	m <sup>2</sup> /s	94,34*10 <sup>-6</sup>	Prv		2,21
Prd		0,620	λv	W/(mK)	0,675
λd	W/(mK)	7,45*10 <sup>-2</sup>	Re		11203
Re		11317	Nuf		51,26
l/d		73,93	εl		1
εl		1	αv	W/(m <sup>2</sup> K)	389,20
Nuf		29,91	k	W/(m <sup>2</sup> K)	2,46
αd	W/(m <sup>2</sup> K)	27,54	Q1	kW	5664,81
Vk	m <sup>3</sup>	0,030	QK1	kJ/kg	7483,24
Fpav	m <sup>2</sup>	1,52	Qd1	kJ/kg	3790,34
l	m	0,071	td1	°C	323
κ		0,0953	td2	°C	611
εd		0,090	Δ	%	1,15
Tp	K	353,0			
αspk	W/(m <sup>2</sup> K)	5,32			
αd1	W/(m <sup>2</sup> K)	32,86			

5.6 lentelė. Šilumos mainų trečios eigos vamzdelių pluošte skaičiavimo rezultatai esant 30 proc. kuro drėgmei

Žymėjimas	Matavimo vienetai	Rezultatas	Žymėjimas	Matavimo vienetai	Rezultatas
Qd1	kJ/kg	3790,34	F <sub>3 eig. vamz.</sub>	m <sup>2</sup>	0,85
t1	°C	323	Fprat	m <sup>2</sup>	2,09
t2	°C	180	wv	m/s	0,046
Vd	m <sup>3</sup> /s	8,61	tv	°C	80
wd1	m/s	12,31	vv	m/s	0,365*10 <sup>-6</sup>
vd	m <sup>2</sup> /s	39,43*10 <sup>-6</sup>	Prv		2,21
Prd		0,680	λv	W/(mK)	0,675
λd	W/(mK)	4,43*10 <sup>-2</sup>	Re		9590
Re		21510	Nuf		28,40
l/d		86,85	αv	W/(m <sup>2</sup> K)	251,92
εl		1	k	W/(m <sup>2</sup> K)	2,15
Nuf		52,03	Q1	kW	1298,71
αd	W/(m <sup>2</sup> K)	33,45	QK1	kJ/kg	1715,60
V	m <sup>3</sup>	0,022	Qd1	kJ/kg	2074,73
F	m <sup>2</sup>	1,30	td1	°C	180
l	m	0,061	td2	°C	252
κ		0,106	Δ	%	0,3
εd		0,100			
Tp	K	353			
αspk	W/(m <sup>2</sup> K)	1,88			
αd1	W/(m <sup>2</sup> K)	35,33			

## 6. KATILINĖS NR.1 TYRIMAS. ELEKTROS SUVARTOJIMAS DĖL KURO FRAKCIJOS

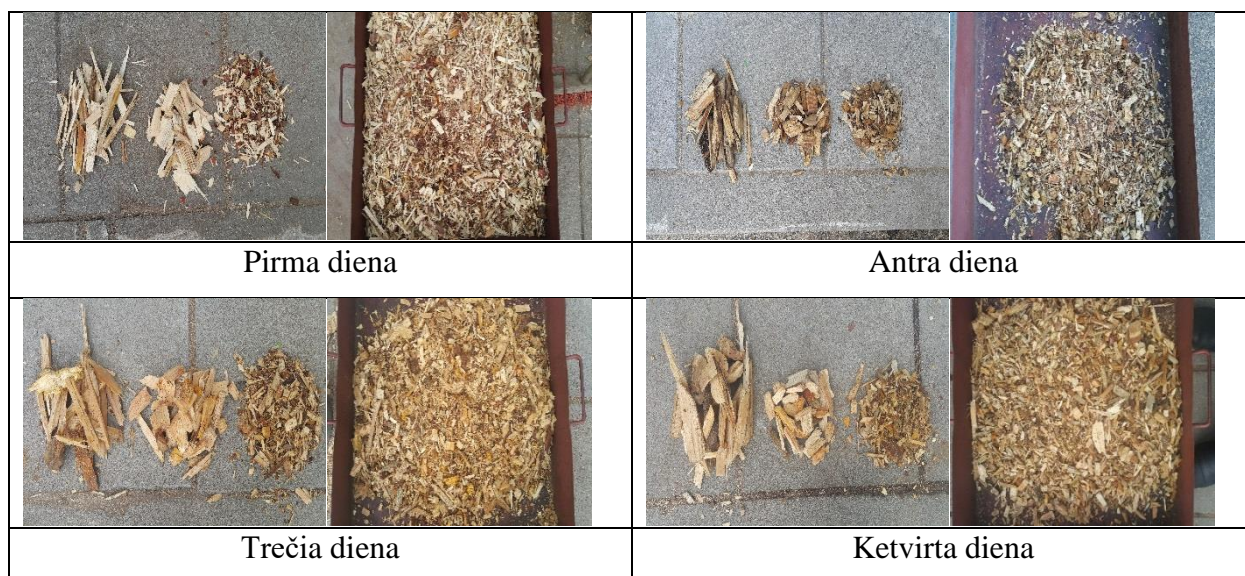
Atliktas tyrimas, kaip kinta elektros sąnaudos dėl kuro frakcijos. Savaitę kiekvieną dieną iš biokuro sandėlio buvo imamas mėginys biokuro frakcijos ilgiui nustatyti. Biokuras buvo rūšiuojamas į tris frakcijas: didelė kuro frakcija, vidutinė kuro frakcija ir maža kuro frakcija. Surūšiavus frakcijas buvo pamatuoti kuro frakcijos ilgiai ir išvestas svertinis vidurkis. Elektros rodiklių vidurkiai imti iš SCADA programos, esančios katilinėje.

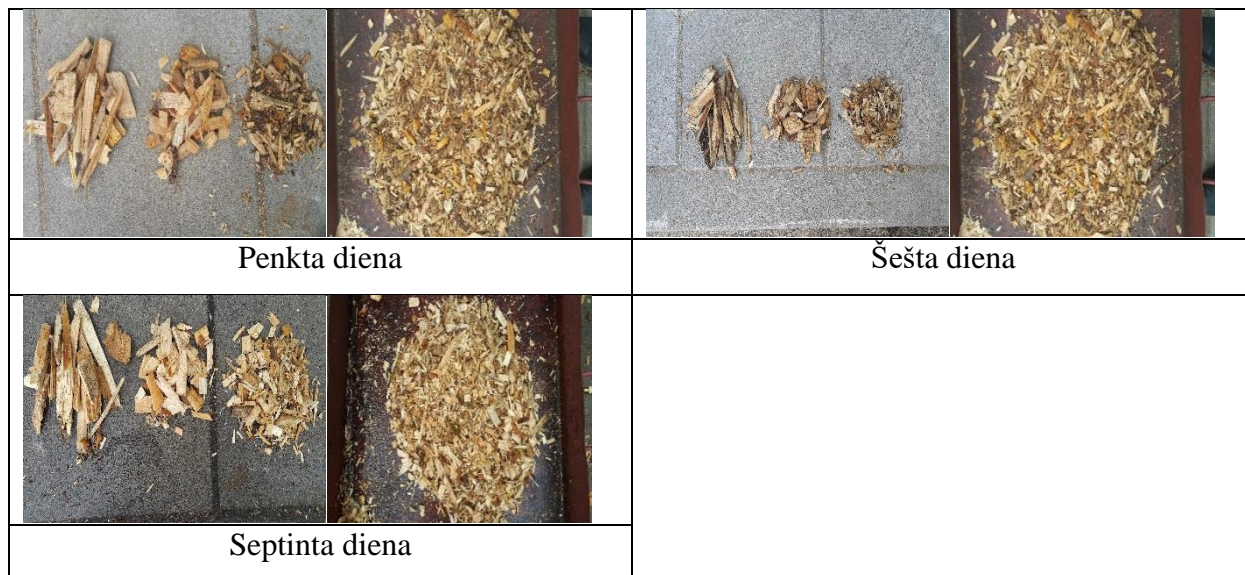
6.1 lentelė. Duomenys iš SCADA programos

Elektros rodiklio vidurkiai, kW/MW							
Diena	1	2	3	4	5	6	7
BK-1 Elektros rodiklio vidurkis	5,9	5,9	5,8	5,7	5,9	5,9	5,8
BK-2 Elektros rodiklio vidurkis	6,1	6,1	5,8	5,9	6,2	6,1	6,1
Abiejų katilų vidurkis	6	6	5,8	5,8	6,05	6	5,95

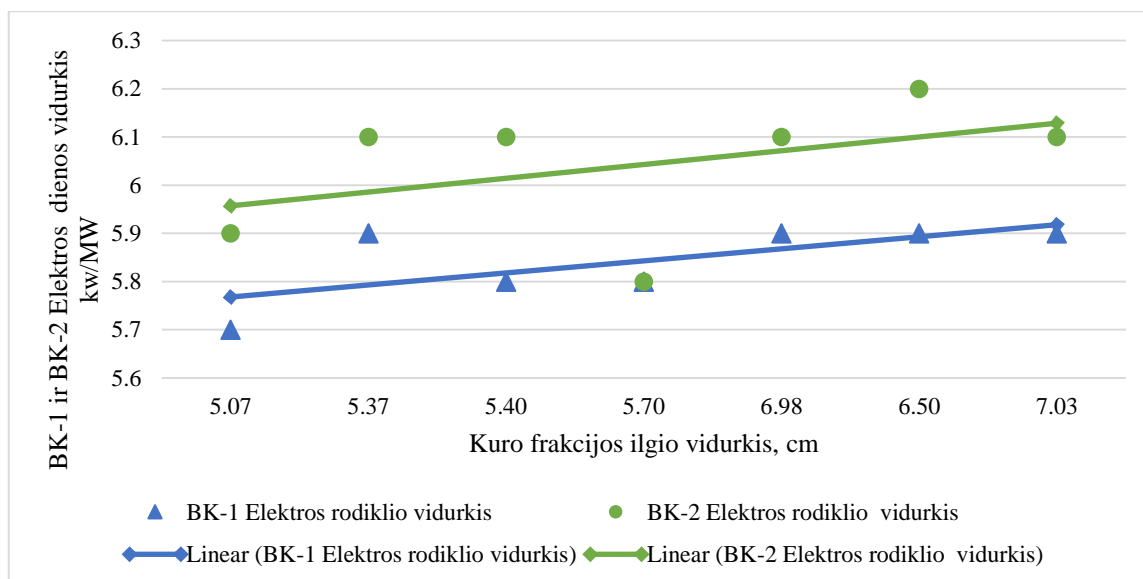
6.2 lentelė. Gauti matavimo rezultatai

Skiedros ilgio vidurkiai, cm							
Diena	1	2	3	4	5	6	7
Didelė kuro frakcija, cm	13,83	9,6	10	9	11	13	9
Vidutinė kuro frakcija, cm	5,5	4,5	5,5	5,3	6,5	6,5	5,5
Maža kuro frakcija, cm	1,62	2	1,6	0,92	2	1,6	1,7
Kuro frakcijos vidurkis	6,98	5,37	5,70	5,07	6,50	7,03	5,40





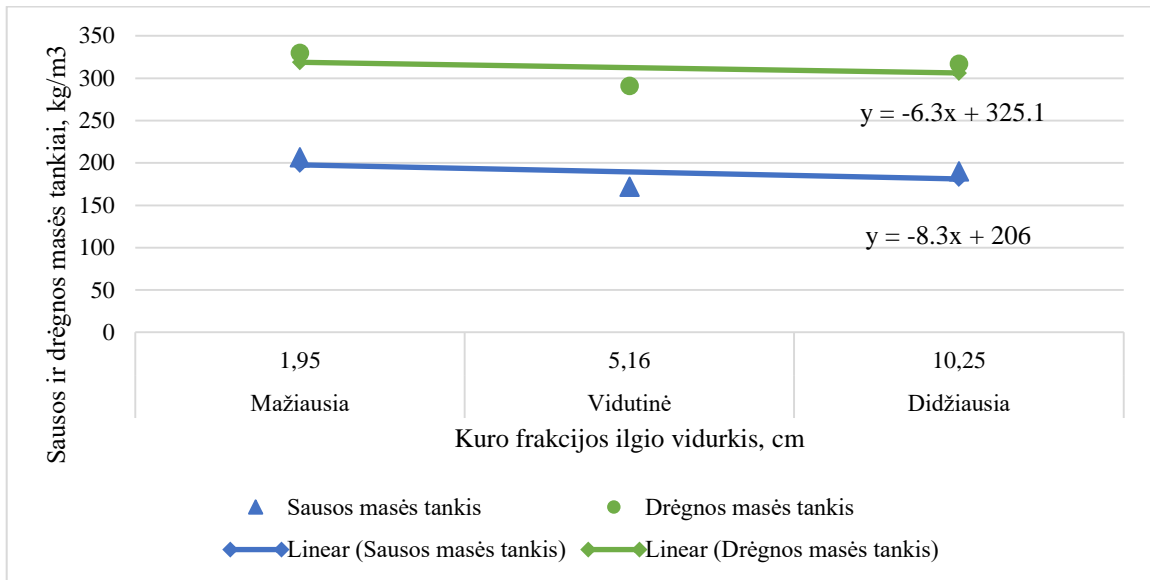
6.1 pav. Bendri kuro frakcijos vaizdai



6.2 pav. Katilo BK-1 ir BK-2 elektros dienos vidurkio priklausomybė nuo kuro frakcijos ilgio

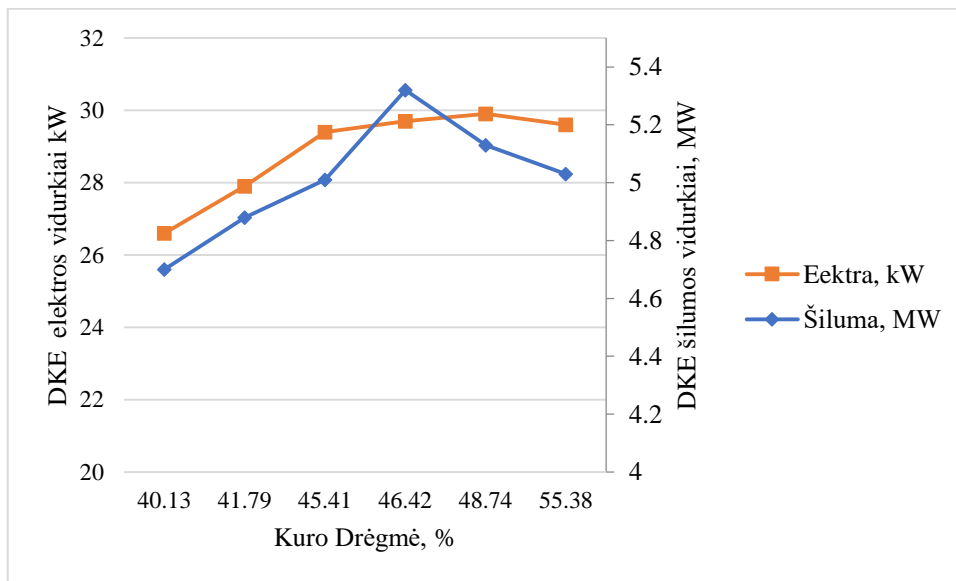
Kuo kuras smulkesnis, tuo daugiau kuro transportuojama ir transportavimo trukmė yra trumpesnė ir tuo elektros sąnaudos yra mažesnės. Kuo kuras stambesnis tuo transportavimo trukmė yra ilgesnė ir kuro perduodama mažiau ir tuo daugiau sunaudojama elektros sąnaudų. Iš 6.3 pav. Sausos ir drėgnos masės tankio priklausomybė nuo kuro frakcijos, matyti kaip kinta tankis, tuo pagrindžiamos elektros sąnaudas.





6.3 pav. Sausos ir drėgnos masės tankių priklausomybė nuo kuro frakcijos dyžio

Laboratorijoje buvo atliktas tyrimas – medienos skiedros buvo išrūšiuotas į tris frakcijas: mažiausia, vidutinė ir didžiausia frakcija. Buvo pasvertas matavimo indelis su mėginiais ir paskaičiuotas tankis. Vėliau dedamas į krosnelę kad iškaitinti kuro drėgmę. Sekančią dieną mėginiai buvo išsiimti ir pasverti su matavimo indėliu, po to suskaičiuojom sausos masės tankį.



6.4 pav. Kondensacinio ekonomizaierio elektros ir šilumos vidurkių priklausomybė nuo kuro drėgmės

Galima sakyti, kad didėjant kuro drėgmei padidėja elektros sąnaudos ir šilumos praradimas. Vienam MWh pagaminti elektros sunaudojama daugiau, nes didėja dūmsiurbio darbas esant sunkesniems dūmams. Didėja šilumos kiekis ir didėja elektros sąnaudos, bet didėja neproporcingai.

## IŠVADOS

1. Nustatyta, kad NO<sub>x</sub> emisijos gali būti sumažintos apie 30 % įrenginiui dirbant sumažintu oro pertekliumi. Sumažinus deguonies koncentraciją iki 3,5proc. buvo sumažinta NO<sub>x</sub> - 245mg/m<sup>3</sup>. Didžiausia CO koncentracija (95 mg/m<sup>3</sup>) buvo esant 3,5 proc. deguonies koncentracijai. Didžiausia NO<sub>x</sub> koncentracija (313mg/m<sup>3</sup>) dūmuose, prie deguonies koncentracija (6,01)%.

2. Taip pat buvo atliktas kietųjų dalelių koncentracijos dūmuose tyrimas keičiant įjungtų multiciklono elementų skaičių. Nustatyta, kad tinkamiausias srauto greitis yra 12,32 m/s, tada kietųjų dalelių koncentracija yra mažiausia. Multiciklono efektyvumas esant mažiausiam srauto greičiui yra 48,74 %, o kai greitis didžiausias (19,22 m/s), multiciklono efektyvumas yra mažesnis - 42,11 %.

3. Apskaičiuoti šilumos nuostoliai nuo katilo ir pakuros paviršių. Apskaičiuoti pirmo katilo VHB8000 šilumos nuostoliai, - 53,45 kW, Antro katilo AK8000P šilumos nuostoliai - 63,25 kW. Kas sudaro 0,67 % ir 0,79 % lyginat su moksline literatūra šilumos nuostoliai yra labai maži. Mokslinėje literatūroje šilumos praradimai nuo katilo paviršių, vamzdžių ir pakuros sudaro 0,5 – 3 proc

Dėl šių nuostolių per metus prarandama nuo 5000 iki 6000 Eur..

4. Apskaičiuota pirmo ir antro katilo NK 2016 metų 02-29 iki 05-01. NK skaičiavimai atlikti atvirkštinio balanso metodu. Pirmo katilo NK yra tarp 88,64 % ir 89,52 %. Antro katilo NK yra tarp 88,79 % ir 89,83 %.

5. Įvertinus kuro kainą 143 Eur/tne kondensacinis ekonomizeris sutaupo apie 50000 Eur per 9 savaites.

6. Apskaičiuoti kuro drėgnumo įtaka katilo parametrams esant 50 % ir 30 % kuro drėgmei, nustatyta išeinančių dūmų temperatūra. Esant 50 % drėgmei sumažėja dūmų temperatūra kaitrovamzdyje, antram vamzdelių sluoksnyje, pirmame vamzdelių sluoksnyje. Esant 30 % drėgmei didėja dūmų temperatūra kaitrovamzdyje, antram vamzdelių sluoksnyje, pirmame vamzdelių sluoksnyje.

7. Nustatyta, kad kuo kuro frakcija smulkesnė, tuo tuo elektros sąnaudos šilumos gamyboje yra mažesnės. Smulki kuro frakcija 5,7 kWh, vidutinė kuro frakcija 5,85 kWh, stambi kuro frakcija 6,2 kWh. elektros sanaudos.

## LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. J. Gudzinskas, V. Lukoševičius, V. Martinaitis, E. Tuomas: „Šilumos vartotojo vadovas“, 2011, Vilnius, Lietuva.
2. <http://home.amis.net/jidoo/Prospects/BHH.pdf>
3. Informacija imta iš multiciklono techninio paso ir eksploataavimo instrukcijos, esančio AB „Kauno energija“ archyve.
4. <http://www.power-technology.com/projects/ornskoldsvik/ornskoldsvik2.html>
5. Villu Vares, Ülo Kask, Peeter Muiste: „Biokuro naudotojo žinynas“, 2007, Talino technologijos universitetas.
6. G. S. Gimbutis, K. Kajutis, A. Drobavičius ir kt.: „Bendroji šiluminė technika“, 1974, „Mintis“, Vilnius, Lietuva.
7. В. П. Воронова, Н. А. Можаров: „Тепловой расчет котлоагрегата“, 1966, Москва, Россия.
8. <http://www.tabex-ozmo.com/en/pdf/katalogwymiarowy.pdf>
9. G. Gimbutis, K. Kajutis, V. Krukonis, A. Pranckūnas, P. Švenčianas. „Šiluminė technika“: Mokslas, 1993. – 333 p.
10. Липов Ю. М. и др. „Компоновка и теплоой расчет парового котла“, 1988. – 208 с.
11. Моган С. И. „Аэродинамический расчет котельных установок“, Нормативный метод, 1979. – 256 с.
12. В. Кузнецова, В. Митор, Е. Дубовский „Тепловой расчет котельных агрегатов 1973-296
13. <http://www.biokuras.lt/zygimantas-vaiciunas-lietuvos-biokuro-ukyje-ivyko-revoliucija>
14. Lietuvos Respublikos ūkio ministerija. Išmetamų teršalų iš kurų deginančių įrenginių normos LAND 43-2013.
15. Buinevičius K. Iš didelių kurų deginančių įrenginių aplinkos oro teršalų mažinimo galimybių studija. Kaunas, 2009.
16. Švenčianas P. Biosferos apsauga šiluminėje energetikoje. – Kaunas: Technologija, 1994. – 4-90 p. UDK 502.55;621.311; 621.928.
17. Informacija imta iš katilo paso, esančio AB „Kauno energija“ archyve.
18. Lietuvos Respublikos aplinkos apsaugos ministerijos. Dujų srauto greičio ir tūrio debito ortakyje matavimas LAND 27-98/M-07
19. Ciklonų efektyvumas skaičiuotas vadovaujantis Lietuvos Respublikos aplinkos ministro 2004 m. vasario 11 d. įsakymu Nr. D1-68 patvirtintų Stacionarių taršos šaltinių išmetamų į aplinkos orą teršalų laboratorinės kontrolės metodinių rekomendacijų 17.5 punktu.

## PRIEDAI

### Dūmų analizatoriaus techniniai duomenys

#### Testo 350 XL Portable Emissions Analyser



##### Key features

- Touchscreen operation for quick operation and input
- Built-in Printer and Internal Datalogger
- Battery and 240V mains operation
- Analysis unit with datalogging function allows measurement without control unit
- Highly accurate in lower ranges for CO and NO
- Optional outdoor case available on request

##### Applications

- Adjust industrial burners
- Measure concentrations in crude and clean gas over long periods
- Check the atmosphere of all types of process furnace
- Maintain stationary motors such as block-type thermal power stations
- Measure emissions from diesel engines and generators

Now available on rental or hire from Ashtead Technology the Testo 350 XL. With sample conditioning technology and electrochemical sensors, the Testo 350 XL is designed for short-term industrial stack gas monitoring, combustion analysis and Flue Gas Monitoring. The analyser measures Oxygen (0 to 25%), Carbon Monoxide (0 to 10,000 ppm), Nitric Oxide (0 to 3,000 ppm), Nitrogen Dioxide (0 to 500 ppm), Sulphur Dioxide (0 to 5,000 ppm) and Temperature (-40 to 2,192 F) and calculates Carbon Dioxide (0 to CO<sub>2</sub> max. volume %) and Efficiency (0 to 100%). The readings can be printed on board or saved by PC downloading. A complete Peltier gas preparation unit for controlled condensate removal is also standard.

The Testo 350 XL Combustion Analyser rents with 12-inch heated probe with 7-foot hose, spare filters, software, certificate of calibration, operating manual and carrying case.

##### Technical specification

Power	Rechargeable NiMH battery, up to 2 hours continuous operation or 115 VAC
Oxygen:	Range: 0 to 21% volume Resolution: 0.1% volume Accuracy: 2% of m.v
Carbon Monoxide:	Range: 0 to 10,000ppm (H <sub>2</sub> S compensated Resolution: 1ppm Accuracy: 5ppm (0 - 99ppm), 5% m.v (100 - 2,000ppm), 10% m.v (2,001 - 10,000ppm)
Nitrogen Oxide:	Range: 0 to 3,000ppm Resolution: 1ppm Accuracy: 5ppm (0 - 99ppm), 5% m.v (100 - 2,000ppm), 10% m.v (2,001 - 10,000ppm)
Nitrogen Dioxide:	Range: 0 to 500ppm Resolution: 0.1ppm Accuracy: 5ppm (0 - 99ppm), 5% m.v (100 - 500ppm)
Sulphur Dioxide:	Range: 0 to 500ppm Resolution: 0.1ppm Accuracy: 5ppm (0 - 99ppm), 5% m.v (100 - 500ppm)
Temperature:	Range: -40°C to +1,200°C Accuracy: 0.5°C (-40°C to +99°C), 0.5% m.v (+100°C to +1,200°C)
Carbon Dioxide:	Range: 0 to CO <sub>2</sub> max volume % Resolution: 0.1% volume Accuracy: Calculated from Oxygen
Efficiency:	Range: 0 to 100%
Power:	Rechargeable NiMH (2hours operation) or 240V AC mains