



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

Mantas Lenartavičius

BIOKURO KATILINĖS REŽIMINIŲ PARAMETRŲ TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Prof. habil. dr. Stasys Šinkūnas

KAUNAS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

BIOKURO KATILINĖS REŽIMINIŲ PARAMETRŲ TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas
Termoinžinerija (621E30001)

Vadovas

(parašas) Prof. habil. dr. Stasys Šinkūnas
(data)

Recenzentas

(parašas) Prof. dr. Vytautas Dagilis
(data)

Projektą atliko

(parašas) Mantas Lenartavičius
(data)

KAUNAS, 2016



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO

(Fakultetas)

Mantas Lenartavičius

(Studento vardas, pavardė)

Terminžinerija, 621E30001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Biokuro katilinės režiminių parametrų tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

2016 m. gegužės 24 d.

Kaunas

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

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

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

Tvirtinu: _____

Šilumos ir atomo energetikos (parašas, data)
katedros vedėjas

Doc. E. Puida

(vardas, pavardė)

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

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

1. Darbo tema **Biokuro katilinės režiminių parametrų tyrimas**
Study of biomass boiler house operating parameters

Patvirtinta 2016 m. gegužės mėn. 03d. dekanų įsakymu Nr. V25-11-7.

2. Darbo tikslas **Atlikti eksperimentinį tyrimą vidutinės galios biokuro katilinėje, išanalizuoti pagrindinius katilinės įrenginius, ištirti katilinės darbo specifiką ir išsiaiškinti katilinės darbo metu kylančias problemas, nustatyti būdus sumažinti išorinių veiksnių įtaką katilinės darbui.**
.....
.....

3. Darbo struktūra **Vidutinės galios biokuro katilinės struktūra ir veikimo principai; eksperimentinis 5,2 MW biokuro katilo ir tyrimas su sausu, vidutinio drėgnumo ir drėgnu kuru; biokuro katilų eksploatacijos ypatybės ir charakteringos problemos; kondensacinio ekonomizerio analizė; išvados ir rekomendacijos**
.....
.....

4. Reikalavimai ir sąlygos **Ruošiant darbą vadovautis norminiais LR dokumentais, baigiamųjų darbų rengimo reikalavimais.**
.....
.....

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

6. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo darbo dalis.

Išduota studentui..... **Mantui Lenartavičiui**
Užduotį gavau **Mantas Lenartavičius** **2016.02.01**
(studento vardas, pavardė) (parašas) (data)

Vadovas Prof. habil. dr. Stasys Šinkūnas **2016.02.01**
(pareigos, vardas, pavardė) (parašas) (data)

TURINYS

IŽANGA.....	6
1 Eksperimentinio tyrimo objektas.....	7
1.1 Garliavos katilinės aprašymas	7
1.2 Pagrindiniai katilinės įrenginiai	8
1.2.1 Kuro priėmimo ir padavimo į katilą sistema	8
1.2.2 Biokuro pakura DG-6	9
1.2.3 Vandens šildymo katilas Danstoker VP-13	15
1.2.4 Dūmų kondensacinis ekonomizaizeris	17
2 Eksperimentiniai pakuros bandymai	20
2.1 Bandymų tikslas ir pasiruošimas pirmajam bandymų etapui	20
2.2 Pirmasis bandymų etapas. Sauso ir vidutinio drėgnumo kuro deginimas	23
2.3 Pirmo etapo bandymų rezultatų analizė.....	23
2.3.1 Kuras.....	23
2.3.2 Oras.....	24
2.3.3 Degimo produktai	25
2.3.4 Vanduo	26
2.3.5 Šilumos balansas	26
2.4 Pirmojo bandymų etapo apibendrinimas	33
2.5 Galimybių gerinti degimo procesą analizė	37
2.5.1 Pirminio oro pašildymas.....	37
2.5.2 Karštų (>110°C) dūmų recirkuliacija ir jos optimizavimas.....	38
2.5.3 Pirminio oro kiekio didinimas	39
2.5.4 Ardyno judėjimo ciklą keitimas	39
2.6 Antrasis bandymų etapas. Itin drėgno biokuro deginimas.....	39
2.6.1 Bandymų eiga ir metodika.....	40
2.6.2 Antrojo bandymų etapo rezultatai	42
3 Kuro drėgnumo įtaka kondensaciniam ekonomizaizeriui	44
3.1 Parametrai turintys įtaką kondensacinio dūmų ekonomizaizerio darbui.....	48
3.1.1 Kuro drėgnumas	48
3.1.2 Dūmų ataušinimo temperatūra	49
3.1.3 Pradinė dūmų temperatūra.....	50
3.1.4 Oro pertekliaus koeficientas	50
4 Išvados.....	52
5 Literatūra ir duomenų šaltiniai	53

Lenartavičius, Mantas. Biokuro katilinės režiminių parametrų tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas Prof. habil. dr. Stasys Šinkūnas; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: Energijos inžinerija, Termoinžinerija

Reikšminiai žodžiai: *biokuras, katilinė, ardyninė pakura, dūmų kondensacinis ekonomaizeris, degimas.*

Kaunas, 2016. 53 p.

SANTRAUKA

Biokuro katilinės susiduria su tam tikromis charakteringomis problemomis ir šio darbo tikslas yra atpažinti tas problemas, išsiaiškinti jų priežastis ir nustatyti būdus kaip sumažinti jų įtaką katilinės darbui.

Pagrindiniai pirmojo etapo bandymų tikslai buvo atlikti katilinės darbinių parametrų matavimus į pakurą tiekiant vidutinio drėgnumo biokurą ir tiekiant sausą biokurą, apskaičiuoti katilo naudingumo koeficientą bei įvertinti katilo darbą degant skirtingo drėgnumo kuroi.

Buvo pastebėtas skirtingas pakuros ardyno judėjimo ciklų nustatymas. Šis santykis lemia biokuro sluoksnio storį ant pirmos ardyno dalies ir kuo jis didesnis tuo didesnis biokuro sluoksnio storis. Šį reiškinį patvirtina pirminio oro slėgio kitimas priklausomai nuo sluoksnio storio. Dėl skirtingo judėjimo greičio atsiranda biokuro sluoksnio storio „lūžis“. Didėjant kuro drėgnumui būtina didinti ardyno dalių judėjimo santykį.

Buvo pastebėtas biokuro degimas iš apačios į viršų. Ant ardyno paviršiaus susidaro plonas karštos medžio anglies sluoksnis, kuris dega pučiant orą per ardyno apačią. Karšti degimo produktai kyla į viršų garindami ir džiovindami drėgną kurą esantį virš karštos anglies.

Nustatytos galimybės gerinti degimo procesą. Pirminio oro kiekio didinimas, pagreintų kuro džiūvimą. Oro pašildymas veikia kaip katalizatorius ne tik džiūvimo procesui, bet biokuro užsidegimui ir degimo proceso intensyvinimui. Norint kad recirkuliaciniai dūmai džiovintų paduodamą kurą, reikėtų išvengti jų maišymo su pirminiu oru. Sumaišius karštus dūmus su šaltu oru vidutinė mišinio temperatūra nukrenta žemiau vandens garų soties temperatūros ir perteklinė drėgmė susikondensuoja. Padidinus ardyno dalių judėjimo santykį drėgno kuro atveju kuro sudegimas gerėja, tačiau būtina perskirstyti ir pirminio oro padavimą.

Dirbant su 54% drėgnumo kuro, papildomai pakuros reguliuoti nereikėjo ir tiko esama režiminė lentelė.

Pradėjus deginti šlapią kurą pradeda kristi iš katilo išeinančio vandens temperatūra, t.y. mažėja katilo apkrovimas. Siekiant padidinti katilo apkrovimą buvo atliekamas rankinis kuro kiekio į pakurą didinimas.

Padidinus kuro tiekimą į katilą, automatiškai buvo didinamas II ir III oro ventiliatorių dažniai (oro kiekis). Šių orų kiekių padidinimas iššaukia ir didesnę likutinio O₂ koncentraciją dūmuose. Sumažinus tretinio oro užduotį normalizavosi deguonies koncentracija dūmuose. Padidinus pirminio oro pirmojo ventiliatoriaus bei sumažinus pirminio oro trečiojo ventiliatoriaus užduotis, degimas stabilizavosi. Šlapiame kure buvo didelė dalis spygliuočių medžių spyglių, kuriuose būna ~1,8% azoto, todėl bandymų metu dūmuose buvo fiksuojama didesnė azoto oksidų koncentracija.

Ženklią įtaką ekonomazerio našumui turi kuro drėgnumas, be to didėjant kuro drėgnumui stiprėja jo įtaka ekonomazerio našumui. Didelę įtaką ekonomazerio našumui turi ir dūmų ataušinimo temperatūra. Oro pertekliaus koeficientas turi nemažą įtaką kondensacinio ekonomazerio efektyvumui, tai paaiškina dūmų rasos taško temperatūros priklausomybė nuo oro pertekliaus koeficiento, todėl norint efektyviai išnaudoti kondensacinį ekonomazerį reikia stengtis palaikyti kiek įmanoma mažesnę oro pertekliaus koeficientą. Palaikyti mažesnę oro pertekliaus koeficientą leistų nuolatinis CO išmetimų stebėjimas. Į kondensacinį ekonomazerį įtekančių dūmų temperatūra turi nedidelę įtaką ekonomazerio našumui.

Lenartavičius, Mantas. Study of Biomass Boiler House Operating Parameters: Master's final project / supervisor assoc. prof. Stasys Šinkūnas. The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Research area and field: Energy engineering, Thermal engineering

Key words: biomass, boiler house, grate furnace, condensing economizer, combustion.

Kaunas, 2016. 53 p.

SUMMARY

Biomass boiler houses face some typical problems and a task of this work is to recognize these problems, to find out the causes and solutions how to decrease its influence for boiler house operation.

Main tasks of the first tests were to perform operating parameters measurements when feeding furnace with average moisture content fuel and dry fuel, to calculate boiler efficiency and to analyze boiler behavior combusting various moisture content fuel.

Different grate movements cycles ratio values was noticed. This ration influence in fuel layer thickness on grate, and the higher the ratio, the thicker fuel layer is. Primary air pressure dependence on fuel layer thickness confirms this statement. Different movement of first and second grate part causes fuel layer to fracture. As fuel moisture increases, grate movements cycles ratio should be increased as well.

Biomass combustion from bottom to top was noticed. Thin hot coal layer covers the grate and primary air works as catalyst. Hot flue gas dries wet fuel as it flows thru it.

Possibilities to improve combustion process were determined. Increasing primary air amount would speed up fuel drying process. Combustion air-preheating acts as catalyst not only for drying, but also for ignition and intensification of combustion process. Recirculation flue gas flow will dry fuel more quickly if it will not be mixed with primary air. Mixing hot flue gas with cold air, mixture temperature drops below water vapor saturation temperature and excess moisture condensates. Increasing grate movements cycle's ratio improves combustion of wet fuel, however primary air flows has to be redistributed as well.

There was no need to change any settings to combust biomass with 54% moisture content, existing regime card was enough.

Feeding wet fuel causes boiler water outlet temperature to decrease, i.e. boiler load decreases. In order to increase boiler load, fuel feeding was increased manually.

After increasing fuel amount, secondary and tertiary air fans speed increased automatically, causing higher air excess ratio. Tertiary air set value was decreased manually to maintain lower air excess ratio. Combustion process has stabilized after increasing primary air first and second fan load and decreasing third primary air fan load. Wet fuel contained high amount of conifers spikes, which has ~1,8% fuel nitrogen content, therefore higher nitrogen oxides emissions were measured.

Fuel moisture content has a highest influence for thermal capacity of flue gas condensing economizer, moreover the higher moisture content is the more significant effect on economizer capacity it has. Flue gas temperature after economizer and air excess ratio also has significant effect. To increase flue gas condensing economizer efficiency, air excess ratio must be kept as low as possible. Continuously CO measurement would help to decrease air excess ratio. Flue gas inlet temperature has low effect to the thermal capacity of condensing economizer.

IŽANGA

Dėl nuolat statomų naujų biokuro katilinių, Lietuvos šilumos ūkis kasmet mažina iškastinio kuro sunaudojimą. Tačiau visos, t.y. tiek esamos tiek naujai statomos biokuro katilinės susiduria su tam tikromis charakteringomis problemomis, kurios dažnai iškyla dėl ne nuo jų priklausančių išorinių parametrų kitimo ar dėl kitų sunkiai atpažįstamų priežasčių. Šio darbo tikslas ir buvo ištirti realiai veikiančios katilinės darbo ypatumus ir kylančias problemas bei nustatyti būdus kaip būtų galima sumažinti jų įtaką normaliam katilinės darbui ir padidinti katilinės efektyvumą. Eksperimentams atlikti buvo pasirinkta Garliavos biokuro katilinė esanti S. Lozoraičio g. 17A, Garliavoje. Ši katilinė oficialiai pradėjo veikti 2012 m. kovo mėn. Pradėjus eksperimentus 2013 m. pradžioje, katilinė jau buvo eksploatuojama beveik kalendorinius metus. Katilinė yra pakankamai nauja, todėl buvo užtikrinta, kad eksperimentai vykdomi su įrengimais kurie buvo suprojektuoti ir pagaminti pagal naujas technologijas, o katilinės personalas pakankamai įgudęs ir gali susitvarkyti su nenumatytais atvejais, galinčiais iškilti eksperimentų metu.

Siekiant išanalizuoti biokuro vandens šildymo katilinės veikimo dėsningumus, bei ištirti pakuros darbą kintant į katilinę atvežamo biokuro charakteristikoms, laikotarpyje nuo 2013 m. sausio mėn. iki 2014 m. kovo mėn., dviem etapais, buvo vykdomi bandymai, kurių metu į katilinę buvo atvežamas įvairaus drėgnumo biokuras.

Buvo atlikta veikiančios pakuros darbo charakteristikų analizė keliems skirtingiems kuro drėgnumams. Bandymų metu katilui dirbant pastoviu režimu atlikti kuro, oro, vandens bei iš katilo išeinamų dūmų pagrindinių parametrų matavimai. Gauti matavimo rezultatai apdoroti standartinėmis katilų šiluminio balanso skaičiavimo metodikomis.

Naudojantis literatūroje pateikta metodika, atlikti skaičiavimai ir įvertinti parametrai įtakojantys dūmų kondensacinio ekonomizerio efektyvumą, pateiktos rekomendacijos į kurias reikia atsižvelgti katilinės eksploatavimo metu.

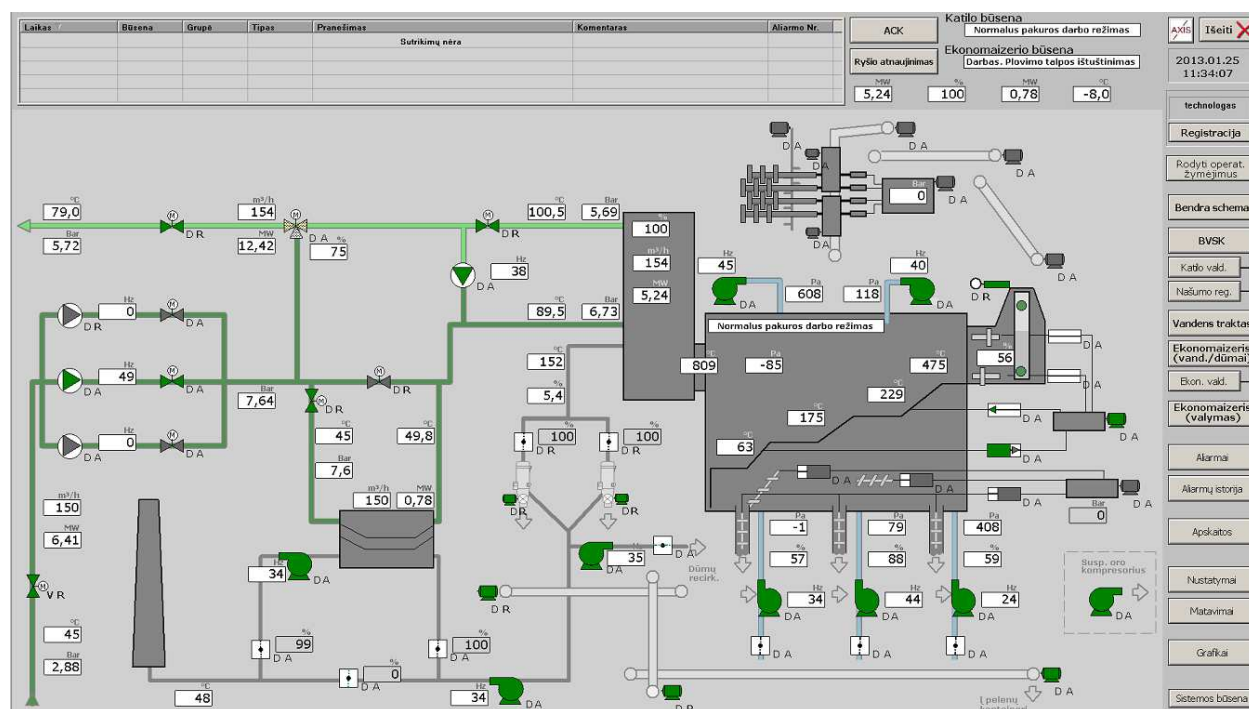
1 Eksperimentinio tyrimo objektas

1.1 Garliavos katilinės veikimo schema

Garliavos katilinės paskirtis – šilumos gamyba ir tiekiamas Garliavos miestui. Pagal šilumos naudojimo paskirtį katilinė priskiriama komunalinei, o pagal šilumos tiekimo patikimumą – pirmai kategorijai. Šilumos vartotojų, prijungtų prie Garliavos katilinės, maksimalus šilumos poreikis šildymo sezono metu – 13,1 MW, o nešildymo sezono metu iki 1,2 MW.

Šiluma Garliavos miesto vartotojams tiekama dviejų vamzdžių šilumos tiekimo tinklais pagal patvirtintą temperatūrinį grafiką. Kai išorės temperatūra mažiau -5°C , biokuro katilinė dirba nominalia 6,52 MW galia, o šilumos trūkumas padengiamas dujiniais katilais. Kai išorės temperatūra daugiau kaip -5°C , biokuro katilinės apkrovimas reguliuojamas automatiškai pagal Garliavos miesto šilumos poreikį šildymui ir karšto vandens ruošimui.

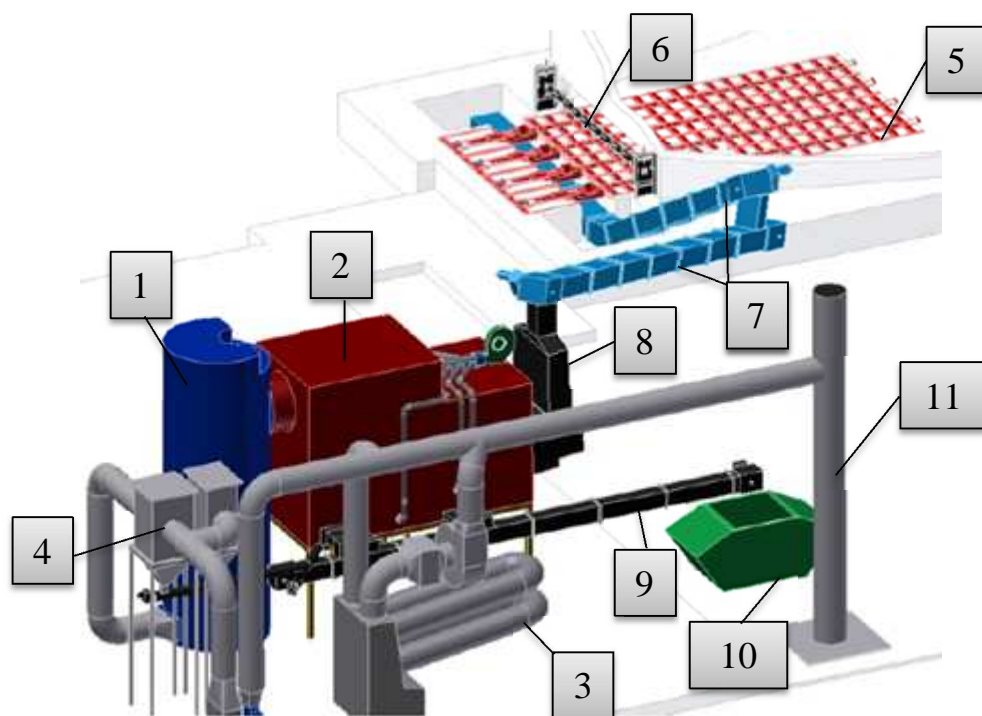
Katilinėje veikia automatinio valdymo sistema „SCADA“ (žr. 1.1 pav.). Iš tinklų grįžtančio vandens slėgis pakeliamas trimis lygiagrečiai sujungtais tinklo siurbliais. Vanduo pirmiausiai pašildomas dūmų kondensaciniame ekonomizeryje, tada paduodamas į katilą. Maksimali katilo darbinė temperatūra 110°C . Dalis katile pašildyto vandens, katilo recirkuliaciniu siurbliu, paduodamas į katilo grįžtančią liniją, taip pakeliant termofikacinio vandens temperatūrą prieš katilą, sumažinant temperatūrų skirtumus katile ir apsisaugant nuo galimos korozijos. Likusi dalis termofikacinio vandens teka pro triegį srautų sumaišymo vožtuvą, kuriame sumažinama į tinklus tiekiamo vandens temperatūra iki nustatytos pagal tinklų temperatūrinį grafiką.



1.1 pav. Biokuro katilinės valdymo sistemos „SCADA“ darbo langas

1.2 Pagrindiniai katilinės įrenginiai

Pagrindiniai katilinės įrenginiai pavaizduoti 1.2 pav.



1.2 pav. Garliavos katilinės pagrindinių įrengimų išdėstymas. 1 – dūmavamzdis vandens šildymo katilas; 2 – ardyninė biokuro pakura; 3 – dūmų kondensacinis ekonomaizeris; 4 – multiciklonai; 5 – kuro sandėlio platformos; 6 – kuro sluoksnio lygintuvas – sušalusio kuro trupintuvas; 7 – grandikliniai kuro transporteriai; 8 – pakuros kuro bunkeris; 9 – grandiklinis pelenų šalinimo transporteris; 10 – pelenų konteineris; 11 – kaminas. [1]

1.2.1 Kuro priėmimo ir padavimo į katilą sistema

Paprasta kuro ūkio konstrukcija nekelia ypatingų reikalavimų kurą atvežančiam transportui, biokuras į katilinę pristatomas autotransportu su šoniniu arba galiniu kuro išvertimu.

Įvažiuavęs į katilinės teritoriją, kurą atvežęs vairuotojas sustoja ant automobilių svarstyklių. Išpylęs kurą, prieš paliekant katilinės teritoriją, vairuotojas dar kartą sustoja ant automobilių svarstyklių. Tokiu būdu, atmetus transporto priemonės svorį be krovinio, yra apskaitomas į katilinę atvežto kuro kiekis, o duomenys perduodami į katilinės valdymo ir apskaitos sistemą. Kuro kokybės kontrolei imami kuro mėginiai, kurie vėliau vežami į kuro tyrimo laboratoriją.

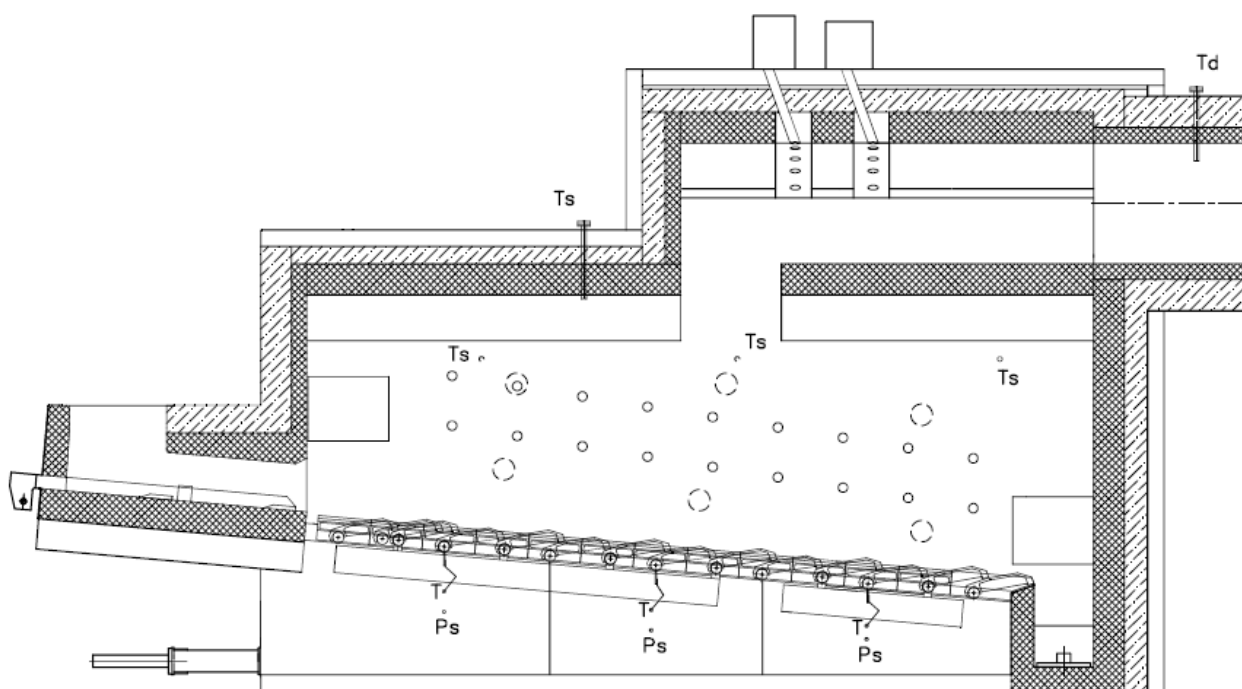
Šalia biokuro sandėlio įrengta atvira kuro saugojimo aikštelė, kurioje sukaupiamas kelių parų kuro rezervas, kuris naudojamas savaitgalį, kai į katilinę nevežamas biokuras. Dirbant įprastu režimu, atvežtas kuras pilamas tiesiai į kuro sandėlį, kuriame sustumiamas toliau ant

hidraulinių platformų naudojantis frontalinio krautuvu, bei darbo savaitės bėgyje sukaupiamas kuro rezervas atviroje aikštelėje.

Vandens šildymo biokuro katilinėje įrengtas mechanizuotas, pusiau uždaro tipo, biokuro sandėlis su viena atvira siena biokurą atvežančio autotransporto ir katilinės frontalinio krautuvo įvažiavimui. Biokuro sandėlio viduje sumontuotos keturios 12 m. ilgio ir 1,35 m. pločio judančios hidraulinės kuro platformos. Už biokuro sandėlio esančioje hidrocilindrų patalpoje sumontuotos hidrostotys, hidrocilindrai, vibrosietai, kuro sluoksnio lygintuvas ir sandėlio grandiklinis transporteris. Vibrosietai neleidžia dideliems medienos gabalams ar kitiems pašaliniam objektams, tokiems kaip betono luitai, dideli sušalusio kuro gabalai ir t.t., patekti į grandiklinį transporterį. Katilinės personalas turi reguliariai, rankiniu būdu pašalinti ant vibrosietų susikaupusius pašalinius objektus. Iš sandėlio biokuras sandėlio, tarpiniu bei katilinės grandikliniais transporteriais tiekiamas į pakuros kuro bunkerį.

1.2.2 Biokuro pakura DG-6

Biokuro pakura (žr. 1.3 pav.) suprojektuota ir pagaminta Lietuvoje, įmonėje AB „Axis Industries“. Tai yra nuožulnaus judančio ardyno tipo biokuro deginimo pakura.



1.3 pav. AB „Axis Industries“ biokuro pakuros supaprastintas brėžinys [1]

Pagrindinės pakuros sudedamosios dalys:

- Metalinis pakuros rėmas ir plieninis korpusas su apžiūros durelėmis;
- Mūras, sudarantis pakuros sienas ir skliautą bei izoliacinis sluoksnis;
- Kuro padavimo ant ardyno žertuvai;
- Judančio ardyno rėmas su ardelėmis;

- Oro padavimo sistema, susidedanti iš pirminio, antrinio ir tretinio oro kanalų su ventiliatoriais;
- Kuro bunkeris su lygio davikliais;
- Kuro bunkerio priešgaisrinė sistema;
- Pagrindinis pelenų šalinimo kanalas su žertuvu;
- Pelenų iš po pakuros šalinimo žertuvai ir angos pakuros šonuose;
- Pakuros degimo valdymo ir kontrolės sistemos matavimo davikliai.

Prie pakuros sumontuotas 2,5 m³ tūrio pakuros kuro bunkeris, į kurį iš kuro sandėlio grandikliniais transporteriais tiekiamas biokuras. Kuro bunkeryje sumontuotas optinis kuro lygio daviklis. Kuro lygiui nukritus iki 30% paeiliui paleidžiami grandikliniai transporteriai, viebrosietai, kuro sluoksnio lygintuvas ir kuro sandėlio platformos. Kuras tiekiamas tol kol pasiekiamas viršutinis kuro bunkerio lygis. Kuro bunkerio apačioje sumontuoti žertuviniai kuro maitintuvai, kurių veikimo intervalai susieti su pakuros apkrovimu.

Pakuros ardyną sudaro 13 eilių ketaus lydinio ardelių, kurių kas antra yra judinama hidrocilindrų, kitos ardelių eilės įtvirtintos stacionariai. Ardyno judinimui naudojami 2 hidrocilindrai, kurie padalina ardyną į dvi dalis. Viršutinė ardyno dalis, ant kurios paduodamas biokuras judinama pirmojo hidrocilindro, o apatinė ardyno dalis, ant kurios daugiausia lieka pelenai, yra judinama antrojo hidrocilindro.

Pakuroje, ant ardyno, vyksta biokuro degimas, kurio metu išsiskyrusi šiluma perduodama katile cirkuliuojančiam vandeniui.

Svarbiausia pakuros šiluminė charakteristika – kūryklos erdvės šiluminis įtempimas, kuris išreiškiamas viename m³ pakuros erdvės per laiko vienetą išsiskiriančiu šilumos kiekiu:

$$q_v = \frac{B \cdot Q_z^n}{V_k}; \frac{kW}{m^3} \quad [2]$$

čia B – kuro kiekis, kg/s ;

Q_z^n – žemutinis naudojamo kuro kaloringumas, kJ/kg ;

V_k – kūryklos tūris, m^3 .

$$q_v = \frac{0,766 \cdot 7852,3}{13,94} = 431,3 \frac{kW}{m^3}$$

Jei q_v būna didesnis už tam tikrą eksperimentiškai nustatomą dydį, sluoksninėje kūrykloje nespėja sudegti iš kuro išsiskyrusios lakiosios medžiagos. Jei q_v būna per mažas – degimas pablogėja dėl sumažėjusios temperatūros.

Dar viena svarbi šiluminė charakteristika sluoksniniam ardynui – paviršiaus šiluminis įtempimas, kuris išreiškiamas ant vieno m^2 ardyno ploto per laiko vienetą išsiskiriančiu šilumos kiekiu:

$$q_R = \frac{B \cdot Q_z^n}{F_k}; \frac{kW}{m^2} \quad [2]$$

čia F_k – ardyno plotas m^2 .

$$q_R = \frac{0,766 \cdot 7852,3}{12,98} = 463,2 \frac{kW}{m^2}$$

q_R didėjant, kartu didėja ir šilumos nuostoliai dėl nevysiško mechaninio sudegimo.

Pakuros orų kanalai pavaizduoti 1.4 pav. Visas biokuro sudeginimui reikalingas oras suskirstytas į pirminį, antrinį bei tretinį orų srautus. Pakuros viršuje sumontuoti atskiri antrinio ir tretinio oro ventiliatoriai, apačioje sumontuoti trys pirminio oro ventiliatoriai.

Pirminio oro srautas paduodamas į kameras po ardynu. Oras pro ardelių plyšius patenka į degimo zoną. Pirminis oras užtikrina reikiamą oro kiekį kurui ant ardyno sudeginti bei tuo pačiu aušina ardyną, kad temperatūra neviršytų leistinų.

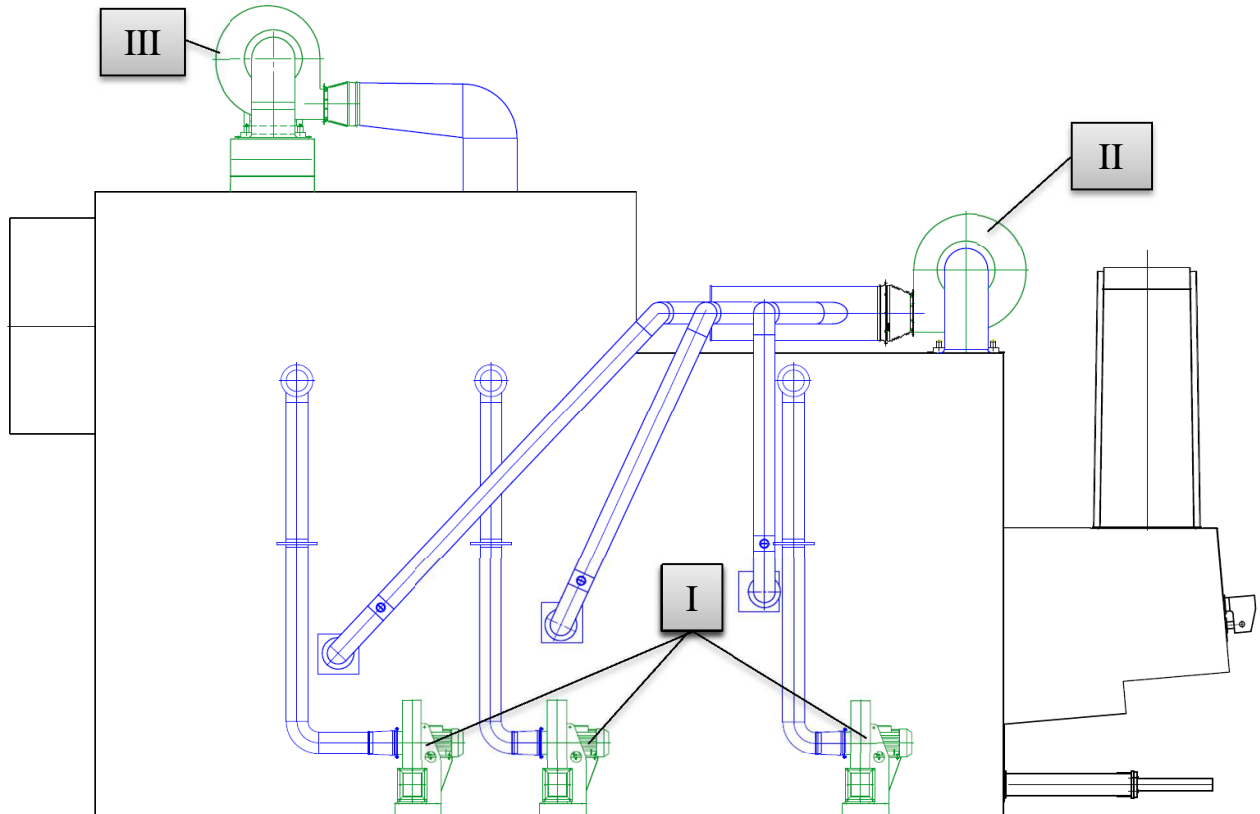
Antrinis oras paduodamas per specialias angas į degimo zoną virš ardyno. Jo paskirtis yra tinkamai sumaišyti ir sudeginti iš biokuro išsiskyrusias lakiąsias medžiagas.

Tretinis oras paduodamas į degimo produktų srautą virš pakuros esančioje kameroje prieš dūmams patenkant į katilo ertmę. Tretinio oro paskirtis – pilnai sudeginti degiuosius komponentus.

Prieš patenkant į pakurą oro srautai sušyla aptekėdami karštus pakuros paviršius šiam tikslui numatytomis ertmėmis tarp pakuros korpuso ir išorinės izoliacijos sluoksnio. Oro srautai aptekėdami išorinius pakuros paviršius juos aušina ir taip pat sumažina šilumos nuostolius į aplinką.

Visuose oro ir recirkuliacinių dūmų kanaluose sumontuos reguliuojančios sklendės, kurių padėtys nustatomos pakuros derinimo metu.

Nustatytą trauką pakuroje palaiko dūmsiurbis, kurio našumas reguliuojamas su dažnio keitikliu. Pakuros galią palaiko pirminio oro ventiliatoriai suderinti su kuro maitintuvo judėjimo ciklais.

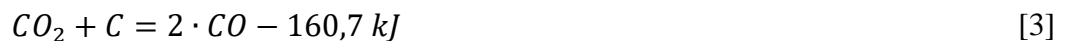


1.4 pav. Pakuros orų paskirstymas

Pagrindinė ant ardyno vykstanti egzoterminė reakcija yra anglies degimas:



Pastarosios reakcijos metu susidaręs anglies dioksidas, gali reaguoti su įkaitusiomis kuro anglies dalelėmis:

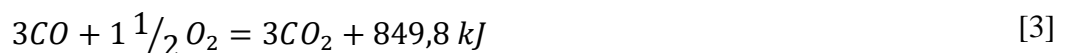


Ši reakcija endoterminė, todėl kuro sluoksnis aušta.

Kita endoterminė reakcija vyksta tarp vandens garų ir įkaitusių kuro anglies dalelių:



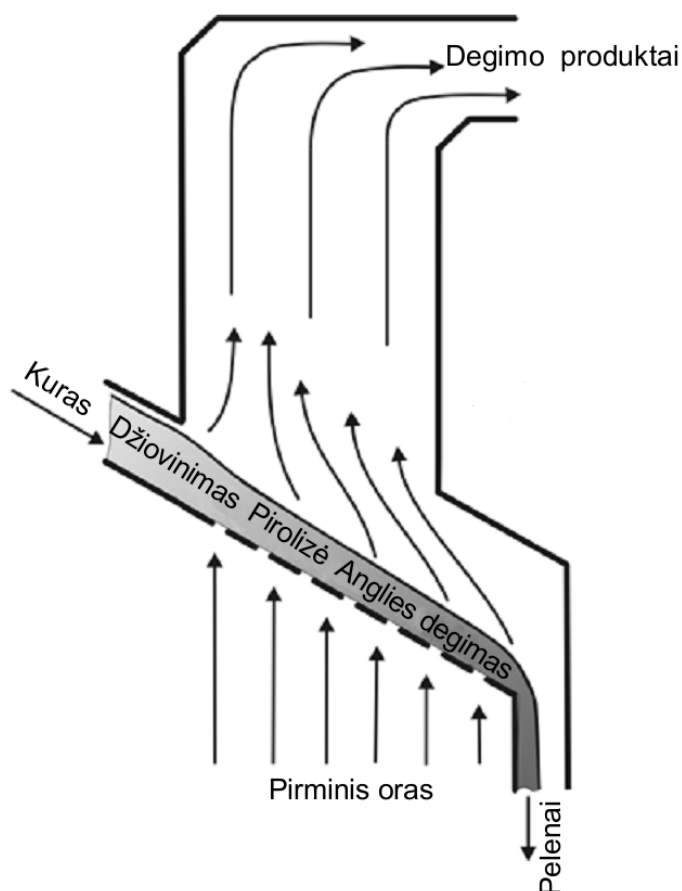
Dveiose paskutinėse reakcijose susidaręs anglies monoksidas ir vandenilis padidina šilumos išsiskirimą pakuros tūryje, nes be kuro lakiųjų komponentų čia dar sudega ir pastarųjų reakcijų produktai:



Endoterminių reakcijų skaičių galima padidinti dalį degimo produktų nukreipiant po ardynu kartu su pirminio oro srautu, t.y. naudojant degimo produktų recirkuliaciją, taip sumažinant kuro sluoksnio temperatūrą. Siekiant išvengti ardyno šlakavimosi ir konvektyvinių paviršių užsiteršimo sunkiai nuvalomomis nuosėdomis reikia kontroliuoti deginimo režimą.

Tam, be oro, papildomai į pirminio ir antrinio oro zonas paduodami recirkuliaciniai degimo produktai, kurie atvedami iš dūmų trakto po katilo. Šios dujos padeda stabilizuoti degimą ant ardyno bei sumažina degimo temperatūrą antrinėje zonoje. Tinkamas visų srautų suregulavimas leidžia kokybiškai sudeginti kurą su galimai mažesniais kenksmingais išmetimais. Derinimas atliekamas pakuros paleidimo metu. Visas degimo procesas visame apkrovimo diapazone valdomas automatiškai, pagal užduotus katilo parametrus. Pakuros ardynas susideda iš judamų ir nejudamų ardelių eilių, sudarydamos žemėjančią laiptuotą sistemą. Kas antros ardelių eilės judėdamos slenkamuojų-grįžtamą judesiu palaipsniui stumia kurą žemyn.

Degimo plotas sąlyginai suskirstytas į tris zonas: džiovinimo, pirolizės ir degimo (žr. 1.5 pav.).



1.5 pav. Drėgno kuro degimo zonos ant ardyno [3]

Džiovinimo ir pirolizės zonose vyksta endoterminiai, t.y. sugeriantys šilumą, procesai, o anglies degimo zonoje – egzoterminiai procesai, kuriems vykstant išsiskiria šiluma.

Poardyninė pakuros erdvė padalinta į tris kameras, tai leidžia palaikyti skirtingą slėgį po ardynu skirtingose degimo zonose.

Kuras maitintuvu, paduodamas į pirmąją zoną. Čia kuras slinkdamas ardynu žemyn džiovinamas karštu oro ir recirkuliacinių dūmų mišiniu bei spinduliuojančia nuo pakuros sienų šiluma. Išdžiuvęs kuras patenka į antrąją degimo zoną. Čia jis, veikiant aukštai temperatūrai ir

viršijus 100°C dujofikuoja ir susidariusios dujos susimaišiusios su antriniu oru dega virš kuro sluoksnio. Trečioje zonoje, priklausomai nuo kuro rūšies, kuras užsidega prie $220 - 300^{\circ}\text{C}$ [3]. Šioje zonoje sudega kuro koksas ir lieka tik nesudegę komponentai – pelenai.

Po ardynu yra įrengtas pelenų šalinimo kanalas su pelenų žertuvu, kuris pagal užduotą režimą išstumia pelenus iš pakuros į išorinį pelenų grandiklinį transporterį.

Nedidelis pelenų kiekis, kuris prabyra pro ardyno tarpelius poardyninių žertuvų pagalba yra išstumiamas iš pakuros per šonuose įrengtas angas į išorinį pelenų grandiklinį transporterį, kuris transportuoja pelenus į lauke esantį sausų pelenų konteinerį.

Aukštos temperatūros degimo produktai išeina iš pakuros ir patenka į katilo degimo kamerą ir toliau į konvektyvinius vamzdelius.

Kuro kiekis į pakurą, ir atitinkamai oro kiekis, reguliuojamas priklausomai nuo katilo tiekiamo vandens temperatūros. Degant sausesniam kurui (mažiau 40% drėgmės) didėja ardyno, pakuros mūro temperatūra, kuri mažinama naudojant dūmų recirkuliaciją. Dūmų recirkuliacija veikia automatinio režimu priklausomai nuo dūmų temperatūros prieš katilą.

Žemiau pateikiami pakuros techniniai duomenys (žr. 1.1 lentelę).

1.1 lentelė. Pakuros projektiniai techniniai duomenys

Parametras	Matavimo vnt.	Vertė
Projektinė galia	MW	6
Kuro matmenys	mm	5x20x50
Kuro drėgnumas	%	30 - 55
Apkrovimo diapazonas	%	30 - 100
Oro pertekliaus koeficientas	%	1,4
Katilo su pakura efektyvumas	%	> 0,85
Kuro peleningumas	%	< 5,5
I oro ventiliatoriaus našumas (3 vnt.)	m ³ /h	3550
II oro ventiliatoriaus našumas (1 vnt.)	m ³ /h	7500
III oro ventiliatoriaus našumas (1 vnt.)	m ³ /h	7500
Recirkuliacinio dūmsiurbio našumas	m ³ /h	3010
Dūmsiurbio našumas	m ³ /h	22750

1.2.3 Vandens šildymo katilas Danstoker VP-13

Katilinėje sumontuotas 5,2 MW galios, Danijoje pagamintas, vandens šildymo katilas Danstoker VP-13. Tai trijų eigių, vertikalus dūmavamzdis katilas (žr. 1.6 pav.).

Pirmoji katilo eiga – katilo degimo kamera sudaryta iš 6,4 m ilgio mažėjančio diametro vamzdžio. Pirmoji degimo kameros dalis pagaminta iš 3,4 m ilgio ir 1,1 m skersmens vamzdžio, antroji iš 3 m ilgio ir 0,9 m skersmens vamzdžio. Dūmai iš pakuros į katilą įteka viršutinėje katilo dalyje per katilo šone esantį įtekėjimo kanalą, kuris, iš šono, įsikerta į katilo degimo kamerą.

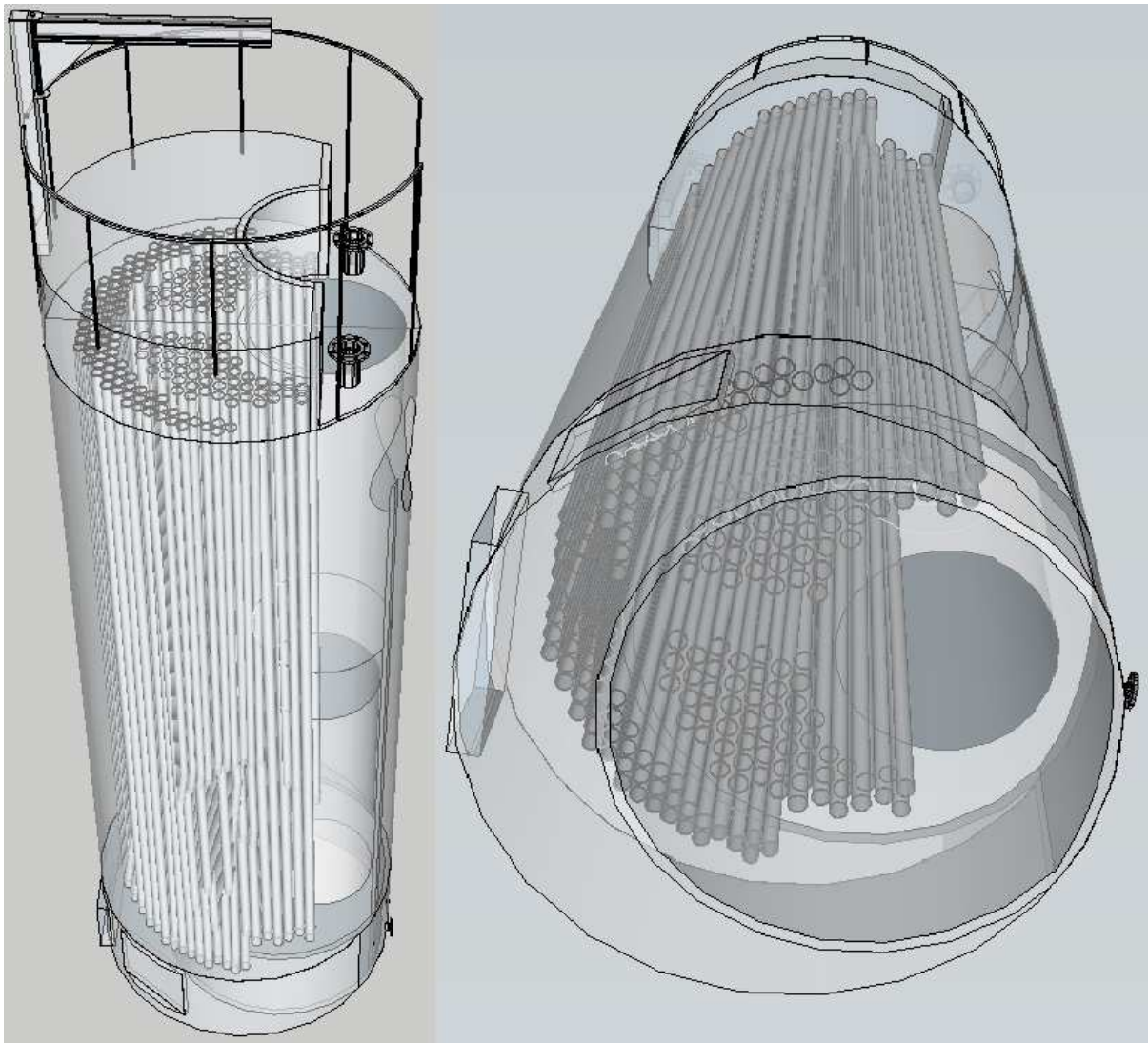
Pratekėję pirmąją eigą, dūmai patenka į katilo apatinę posūkio kamerą, kurioje verčiasi į viršų ir patenka į pirmąjį konvektyvinių vamzdžių pluoštą. Šį pluoštą sudaro 110 vnt. vertikalių, šiek tiek pasvirusių, nedidelio diametro vamzdelių.

Toliau dūmai patenka į viršutinę posūkio kamerą, kurioje verčiasi žemyn ir teka per trečiąją katilo eigą – antrąjį konvektyvinių vamzdžių pluoštą, kurį sudaro 100 vnt. nedidelio diametro vamzdelių. Apačioje dūmai išteka iš katilo per stačiakampę dūmų ištekėjimo angą.

Katilas sukomplektuotas su recirkuliaciniu katilo kontūro vandens siurbliu skirtu palaikyti nustatytą į katilą paduodamo vandens temperatūrą, kurią nurodo katilo gamintojas (žr. 1.2 lentelę). Katilo viršuje sumontuota pneumatinė suodžių nupūtimo sistema, kurią sudaro elektromagnetiniai vožtuvai suskirstyti į atskiras grupes ir prijunti prie nedidelio tūrio suspausto oro rinktuvų. Suspaustas oras tiekiamas iš bendro katilinės suspausto oro kompresoriaus.

1.2 lentelė. Danstoker rekomenduojamos į katilą paduodamo vandens temperatūros [4]

	Oro perteklius 1,9	Oro perteklius 1,6	Oro perteklius 1,3
Medienos drėgnumas	Minimali į katilą grįžtančio vandens temperatūra		
15 %	76°C	80°C	84°C
25 %	80°C	84°C	88°C
35 %	84°C	88°C	93°C
45 %	88°C	93°C	98°C
55 %	93°C	98°C	104°C
65 %	100°C	104°C	108°C
Minimali dūmų temperatūra po katilo, neatsižvelgiant į kuro drėgnumą	120°C	120°C	120°C



1.6 pav. Vertikalus trijų eigų dūmavamzdžio vandens šildymo katilo eskizas

Anksčiau Danstoker reikalavimai katilams, deginant medienos skiedras, buvo žymiai mažesni. Tačiau per pastaruosius metus pasikeitė medienos skiedrų kokybė, taip pat patobulėjo kūryklų technologijos, kas lėmė mažesnę O_2 kiekį ir galimybę deginti didesnio drėgnumo medienos skiedras. Šis vystymasis pradėjo kelti rimtas problemas katilų korozijos atžvilgiu. Todėl buvo sudaryta minimalaus grįžtančio vandens temperatūros lentelė, kaip kuro drėgmės ir oro pertekliaus funkcija (žr. 1.2 lentelę). Taigi grįžtančio vandens temperatūros paremtos ilgamete patirtimi ir skaičiavimais. Nors kiti katilų gamintojai kelia mažesnius reikalavimus grįžtančiai temperatūrai, Danstoker katilai nėra labiau pažeidžiami korozijos atžvilgiu nei kiti. Galima sumažinti į katilą paduodamo vandens temperatūrą, tačiau tada atsiranda didelis pavojus, kad prasidės katilo vidaus korozija.

Leif Lindau ir Barbara Goldschmidt studijoje [5] apie koroziją, iš gautų rezultatų keliami hipotezė, kad korozijos sukėlime dalyvauja vandens fazė nuosėdose, šią fazę stabilizuoja ištirpusios druskos. Iš to seka, kad kiekviena druska turi kritinį santykinį drėgnumą

(apskaičiuojamą pagal dūmuose esančio vandens parcialinį slėgį ir aušinančio paviršiaus temperatūrą). Buvo nustatytos $ZnCl_2$ ir $CaCl_2$ druskos, kurių kritinis santykinis drėgnumas atitinkamai 5% ir 18%. Atitinkami procentiniai dydžiai gauti iš praktinės patirties yra tarp 20 ir 30%.

Korozijos bandymai atlikti naudojant oru aušinamą zondą, kuris buvo veikiamas degimo produktu. Esant dideliame santykiniam drėgnumui nustatytas didelis korozijos laipsnis. Esant santykiniam drėgnumui $<22\%$ korozija buvo maža t.y. mažiau 0,1 mm/metus.

Praktinė šios studijos išvada yra ta, kad tokio tipo katiluose santykinis drėgnumas turi būti mažesnis nei 22%.

Kitas reiškiny, sukeliantis katilo pažeidimus yra katilo erozija. Lakieji pelenai nesukelia žymios erozijos. Eroziją sukelia didelės dalelės, tokios kaip smėlis. Jeigu jos išnešamos kartu su pelenais – pasireiškia katilo erozija.

Suodžių nupūtimo intervalai taip pat įtakoja katilo eroziją. Jeigu dalelės iš pakuros patenka į katilą ir kaupiasi apipūtimo vamzdeliuose, apipūtimo metu jos gali pažeisti suvirinimo siūles ir/ar vamzdelių rėtinę – priklausomai nuo to, kur dalelės atsimuša. Pastebėjus erozijos požymius, reikia imtis sekančių veikslių:

1. Suderinti degimo procesą taip, kad abrazyvios dalelės nebūtų išnešamos į katilą;
2. Pažeidžiamas vietas uždengti apsaugine plokšte ir reguliariai ją keisti priklausomai nuo susidėvėjimo.

1.2.4 Dūmų kondensacinis ekonomizeris

Katilinėje sumontuotas dūmų kondensacinis ekonomizeris yra tiesioginio kontakto, t.y. dūmai yra aušinami išpurškiamu kondensatu. Pagrindiniai kondensacinio ekonomizerio komponentai (žr. schemą 1.7 pav.) yra: „U“ formos dūmų kanalai (2 vnt.) su juose sumontuotomis kondensato purkštukų eilėmis; kondensato bakai (2 vnt.); kompensacinė lygio talpa; kondensato proceso siurbliai GK1-P1 ir GK1-P2; dviejų kontūrų plokštelinis šilumokaitis GK1-WX1; chemikalų dozatorius GK1-P3; lašelių gaudytuvas GK1-DS1; dūmsiurbis GK1-F1; valdymo sistemos matavimo prietaisai.

Į per kondensacinį ekonomizerį tekančius dūmus, „U“ formos kanaluose sumontuotomis purkštukų eilėmis, yra purškiamas ataušintas kondensatas. Maži išpurkšto kondensato lašeliai sukuria didelį šilumos mainų plotą. „U“ formos kanalai atskirti į du kontūrus – šiltasis ir šaltasis. Vienoje pusėje iš pradžių dūmai yra apipurškiami šiltu kondensatu, tada dūmai verčiasi 180° kampu ir patekę į šaltąjį kontūrą yra apipurškiami šaltu kondensatu, taip dūmai yra ataušinami iki temperatūros, kuri yra $\sim 3^\circ C$ aukštesnė nei iš tinklų grįžtančio termofikato temperatūra. Jeigu iš tinklų grįžtančio termofikato temperatūra yra sąlyginai maža, dūmai yra ataušinami žemiau rasos taško, todėl kondensaciniame ekonomizeryje yra gaunama ne tik savitoji šiluminė

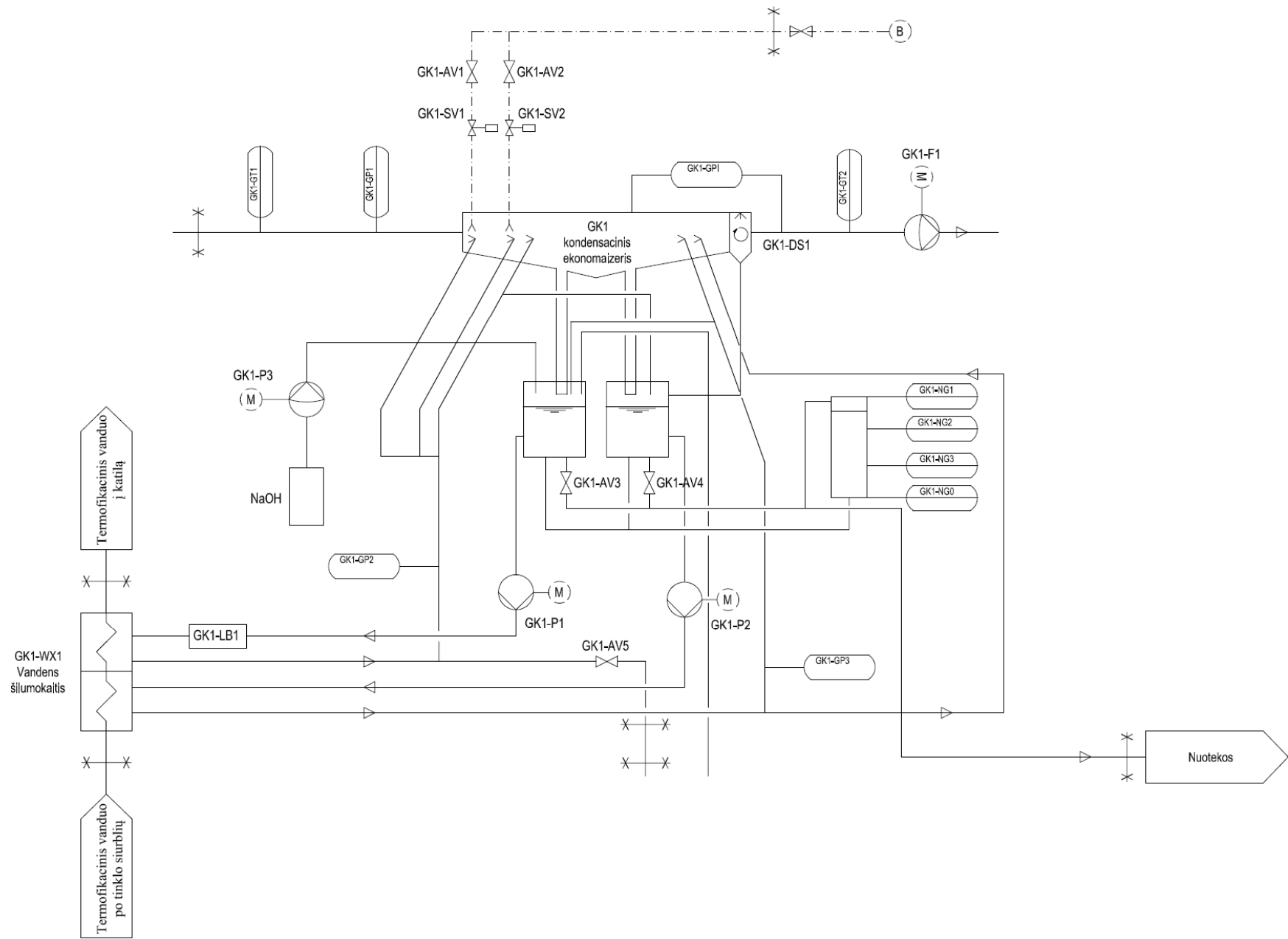
energija ataušinus dūmus, tačiau ir slaptoji garavimo šiluma, kuri gaunama sukondensavus dūmuose esantį vandens garą.

Nuo dūmų išilęs kondensatas, dėka pasvirusių „U“ formos dūmų kanalų, subėga į dvi atskiras kondensato talpas, iš kurių šiltesnis kondensatas, siurbliu GK1-P1 paduodamas į antrąjį šilumokaičio kontūrą, o šaltesnis kondensatas siurbliu GK1-P2 paduodamas į pirmąjį. Per dviejų kontūrų šilumokaitį teka grįžtantis iš tinklų vanduo, kuris ataušina kondensatą. Ataušintas kondensatas vėl išpurškiamas į dūmus ir taip ciklas yra kartojamas.

Chemikalų dozatorius GK1-P3 palaiko nustatytą kondensato pH vertę ~7. Dėl kondensacijos, kondensato kiekis cikle pastoviai didėja, todėl dalis kondensato nuolat persipila lygio talpoje ir yra nuvedamas į kondensato valymo įrenginius.

Siekiant apsaugoti plastikinius kondensato purkštukus nuo jų sugadinimo dėl aukštos temperatūros, dūmų temperatūrai po dūmų kondensacinio ekonomaizerio pakilus aukščiau užduotos maksimalios vertės, atsidaro elektromagnetiniai vožtuvai GK1-SV1 ir GK1-SV2 ir per avarinius purkštukus yra purškiamas šaltas vandentiekio vanduo, kuris ataušina dūmus iki saugios ribos.

Intensyviai apipurškiant dūmus kondensatu yra sugaudoma ir didžioji dalis kietųjų dalelių, todėl tokio tipo kondensacinis ekonomaizeris taip pat atlieka ir dūmų valymo nuo kietųjų dalelių funkciją. Jeigu dūmų valymui, prieš jiems patenkant į dūmų kondensacinį ekonomaizerį, yra naudojami multiciklonai, tokiu atveju prieš išleidžiant kondensato perteklių į nuotekas, jį reikia išvalyti kondensato valymo įrenginiuose, kad kondensato užterštumas neviršytų normatyvuose nustatytų ribinių verčių. Paprastai kondensato valymas nuo kietųjų dalelių vykdomas nusodintuve, po kurio dalinai išvalytas kondensatas dar perleidžiamas per smėlio filtrą. Jeigu dūmų valymui naudojamos efektyvesnės technologijos, pvz. elektrostatiniai ar rankoviniai filtrai, tokiu atveju kondensato papildomai valyti nereikia.

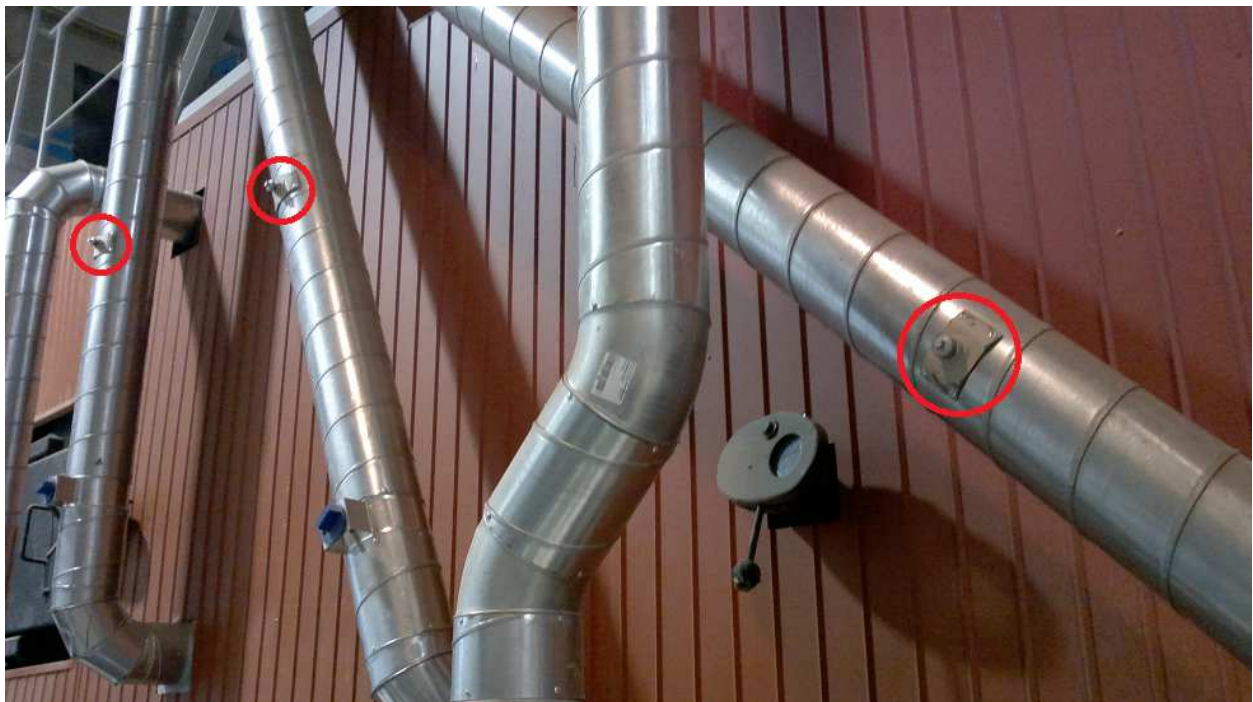


1.7 pav. Dūmų kondensacinio ekonomizerio schema [6]

2 Eksperimentiniai pakuros bandymai

2.1 Bandymų tikslas ir pasiruošimas pirmajam bandymų etapui

Pagrindiniai pirmojo etapo bandymų tikslai – dirbant vandens šildymo katilui su pakura atlikti pakuros darbinių parametrų matavimus į pakurą tiekiant vidutinio drėgnumo biokurą ir tiekiant sausą biokurą, apskaičiuoti katilo naudingumo koeficientą bei įvertinti katilo darbą degant skirtingo drėgnumo kurui. Prieš atliekant katilo balansiniams skaičiavimams reikiamų duomenų stebėjimą, matavimus ir nurašymą, išanalizuota katilo techninė dokumentacija, apžiūrėtas katilas išoriškai, apžiūrėti katilo kontroliniai matavimo prietaisai, numatytos papildomos matavimo vietos (žr. 2.1 pav.), sudaryta katilo matavimų schema (žr. 2.2 pav.).



2.1 pav. Papildomos matavimo vietos antrinio oro kanaluose

Katilo naudingo veikimo koeficientu (n.v.k) arba tiesiog naudingumo koeficientu, vadinamas naudingai sunaudotos šilumos ir suteiktos šilumos santykis. n.v.k gali būti nustatomas dviem būdais:

1. Žinant naudingai panaudotą šilumą, t.y. žinant katile pašildyto vandens kiekį, vandens entalpiją prieš katilą ir už katilo, sudeginto kuro kiekį ir tikslią jo degimo šilumą:

$$n.v.k = 100 \cdot \frac{Q}{B_d \cdot Q_{\text{ž}}}; \%$$

kur:

Q – katilo galia, kW;

B_d – sunaudoto kuro kiekis, kg/h;

Q^z – žemutinis kuro šilumingumas, kJ/kg;

2. Apskaičiavus visus šilumos nuostolius:

$$n. v. k = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6); \%$$

kur:

q_2 – nuostoliai su iš katilo išeinančių dūmų išnešama šiluma, %;

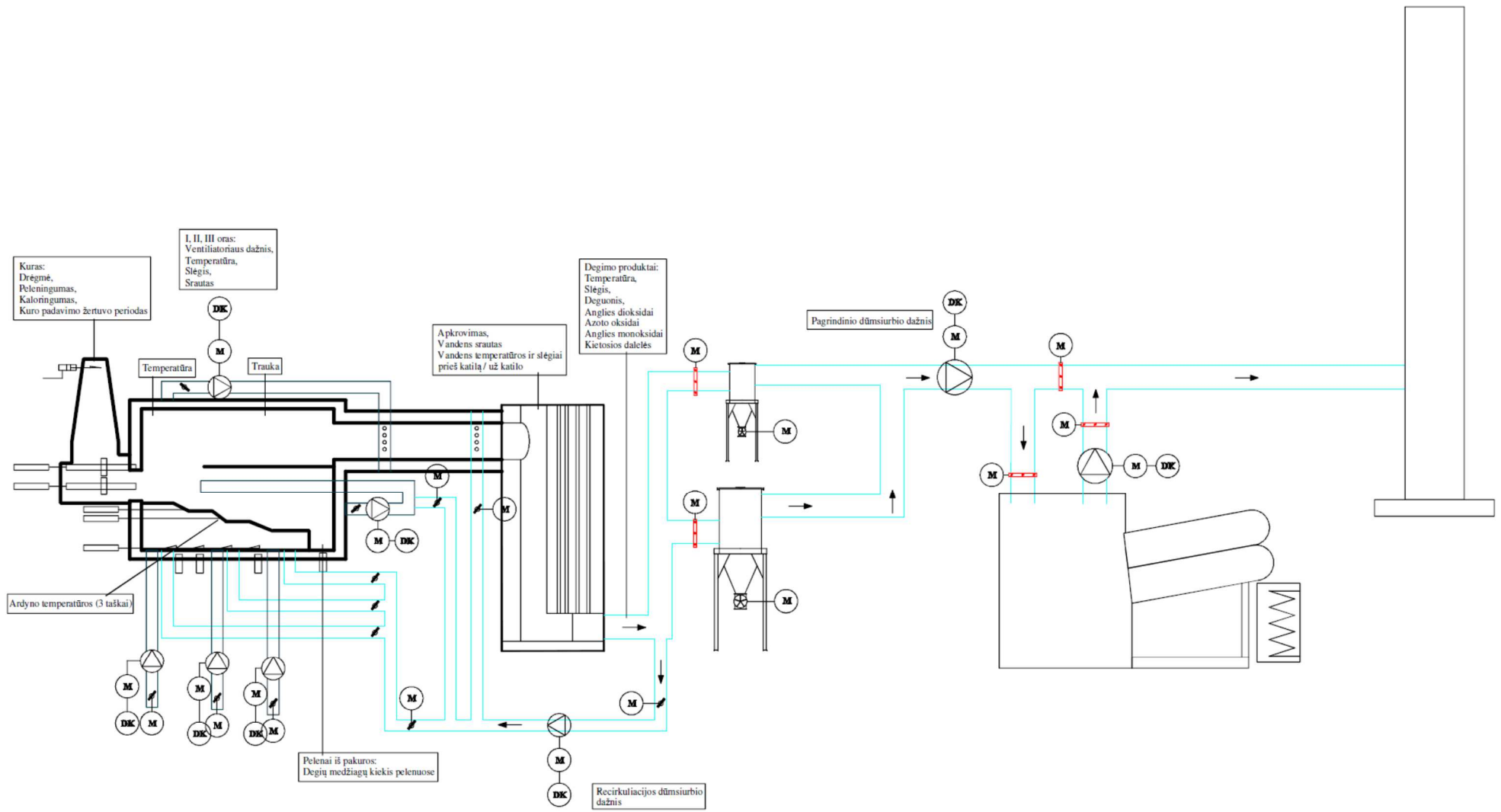
q_3 – nuostoliai dėl nevisiško cheminio sudegimo, %;

q_4 – mechaniniai nevisiško sudegimo nuostoliai, %;

q_5 – šilumos nuostoliai į aplinką, %;

q_6 – šilumos nuostoliai su pelenais, %.

Vandens šildymo katilo su pakura naudingo veiksmo koeficientas buvo skaičiuojamas dviem būdais, t.y. tiesioginio balanso metodu bei atvirkštinio balanso metodu: pagal literatūroje [7] pateikiamas empirines formules, bei pagal standartines termodinamines išraiškas, kuriose įvertinami papildomai atliktų matavimų duomenys.



2.2 pav. Principinė matavimų schema

2.2 Pirmasis bandymų etapas. Sauso ir vidutinio drėgnumo kuro deginimas

Dirbant vandens šildymo katilui nustatyti pagrindiniai katilo techniniai ir ekologiniai parametrai. Atlikti katilo ir pakuros darbo parametrų matavimai prie skirtingo kuro drėgnumo: 2013 m. sausio 15-ą dieną kuro drėgnumas 49,0%, sausio 25-ą dieną – 36,9%, ir vasario 15-ą dieną – 46,1%. Vandens šildymo katilas dirbo automatiniu režimu pagal esamą šilumos poreikį.

Oro srautams apskaičiuoti antrinio ir tretinio oro tiekimo kanaluose buvo išmatuotas oro greitis (prietaisu Testo 454) už ventiliatorių papildomai įrengtose matavimo vietose. Pirminio oro kanaluose buvo matuojamas slėgių skirtumas tarp diafragmos SPI 160 prieš ventiliatorius naudojant slėgio matuoklį. Dūmų temperatūra ir dūmų dujų koncentracijų matavimai atlikti už katilo išeinančių dūmų kanale naudojant prietaisą Testo 350XL. Išmatuoti dūmų greičiai recirkuliacijos kanaluose: pagrindiniame kanale, kanale nuvestam po ardynu ir kanale virš ardyno. Kanale už katilo nustatytos kietųjų dalelių koncentracijos išmetamuose dūmuose išorinio filtravimo metodu pagal LAND 28-98/M-08 [8]: kietąsias daleles nusodinant filtravimo patrone. Kietųjų dalelių koncentracija išmetamuose dūmuose nustatyta pagal filtro masių skirtumą.

Kuro analizei buvo imami kuro mėginiai iš kuro sandėlio ir grandiklinio transporterio. Pagrindinėms kuro savybėms nustatyti laboratorijoje buvo atliekamos kuro analizės vadovaujantis Lietuvos Respublikoje galiojančiais standartais: drėgmės matavimas pagal LST EN 14774-1, peleningumo matavimas pagal LST EN 14775, šilumingumo matavimas pagal LST EN 14918.

Likutinių pelenų analizei, pelenų mėginiai buvo imami iš lauke esančio sausų pelenų konteinerio. Pelenų kokybiniam įvertinimui atliktas organinio likučio nustatymas. Atliekant papildomus bandymų matavimus, lygiagrečiai, kas 10 – 20 min., buvo fiksuojami katilo valdymo sistemos parodymai (ardyno, pakuros, dūmų prieš ir už katilo temperatūros; pirminio, antrinio ir tretinio oro ventiliatorių dažnio keitiklių parametro reikšmės, slėgis; trauka pakuroje; vandens temperatūra už ir prieš katilą; vandens slėgis iš tinklų, vandens slėgis už katilo ir prieš katilą; vandens srautai; dūmų recirkuliacijos dūmsiurbio ir pagrindinio dūmsiurbio dažniai; dūmų temperatūra už katilo; deguonies kiekis dūmuose; katilo apkrovimas, bei registruojami matavimo dienos katilo darbo grafikai siekiant įvertinti katilo darbo specifiką.

2.3 Pirmo etapo bandymų rezultatų analizė

2.3.1 Kuras

Matavimai buvo atliekami deginant skirtingo drėgnumo medienos skiedras. Pagrindinės medienos skiedrų charakteristikos pateikiamos 2.1 lentelėje. Nustatytas medienos skiedrų drėgnumas buvo 49,0%, 36,9% bei 46,1%. Didžiausias kuro peleningumas nustatytas esant sausiausiam kurui ir buvo lygus 1,7 proc. Siekiant kuo tiksliau įvertinti pakuros darbą, bandymų

metu buvo imami pakuros dugno pelenų mėginiai ir nustatoma juose esančio organinio likučio dalis. Deginant sausą kurą buvo nustatyta didžiausia nesudegusio kuro dalis pelenuose (žr. 2.1 lentelę).

2.1 lentelė. Kuro analizės duomenys

Parametras	Matavimo vienetai	Vertė		
		2013.01.11	2013.01.25	2013.02.15
Drėgmės kiekis	%	49,0	36,9	46,1
Kuro apatinis šilumingumas	kJ/kg	8218	10799	9018
Peleningumas	%	1	1,7	0,74
Degiosios masės dalis pelenuose po pakuros	%	5,5	10,4	1,21

2013.01.11 matavimų metu nustatytas didžiausias kuro suvartojimas 1 MW šilumos pagaminti. Vienas iš faktorių įtakojančių kuro kiekio padidėjimą yra kuro drėgnumas, pastarajam mažėjant mažėja ir kuro kiekis šilumos energijos vienetui pagaminti.

2.3.2 Degimo oras

Degimui reikalingas oras į pakurą tiekiamas trimis laipsniais, sumontuotais penkiais oro pūtimo ventiliatoriais. Oras prieš patenkant į pakurą aptekėdamas karštus pakuros paviršius pašyla iki 27 – 32°C. Atliekant matavimus nustatyti pirminio, antrinio, tretinio oro kiekiai. Gautų rezultatų palyginimui sudaryta 2.4 lentelė. Kaip matyti iš pateiktų duomenų sausio 11-ą dieną išmatuotas bendras oro kiekis 9770 m³/h esant 49 % kuro drėgnumui buvo didžiausias, kiek mažesnis buvo 2013.02.15 – 9460 m³/h esant 46,1 % kuro drėgnumui bei mažiausias oro kiekis nustatytas dirbant su sausiausiu kuru ir buvo lygus – 7780 m³/h. Rezultatai rodo, kad deginant drėgną kurą reikalingas didesnis oro kiekis nei sauso kuro atveju. Lyginant oro pertekliaus koeficientus matoma, kad prietaisu, sumontuotu dūmų kanale po katilo, išmatuotas perteklinis deguonies kiekis tik nežymiai kinta visų matavimų atvejais. Tuo tarpu dūmų dujų analizatoriaus parodymai išsiskiria, ir dirbant sausu kuru oro pertekliaus koeficientas yra mažiausias. Šį skirtumą tarp prietaisų iššaukė skirtingas prietaisų veikimo principas: deguonies analizatorius sumontuotas kanale po katilo matuoja deguonies kiekį drėgnuose dūmuose, tuo tarpu nešiojamas dujų analizatorius, prieš atliekant matavimą, dūmuose esančius vandens garus sukondensuoja, todėl parodymai yra sausuose dūmuose. Didėjant kuro drėgmei didėja vandens kiekis dūmuose bei dūmų tūris, o deguonies koncentracija mažėja. Mažėjant deguonies kiekiui katilo automatika

reaguoja ir koreguoja tiekiamo oro kiekį pagal užduotą deguonies kiekį dūmuose iki nustatytos reikšmės, taip padidindama realų (pagal sausus dūmus) deguonies kiekį. Galiausiai esant drėgnam kurui prie maksimalių apkrovimų gali pritrūkti degimui oro, nors ir oro pūtimo įrenginiai parinkti su tam tikra atsarga. Taip pat išaugus oro pertekliui didėja ir šilumos nuostoliai su dūmais bei mažėja katilo naudingumo koeficientas.

2.3.3 Degimo produktai

Pagrindiniai degimo produktų parametrai pateikiami 2.2 lentelėje. Kaip jau buvo minėta anksčiau, didėjant kuro drėgnumui didėja oro kiekis, tai atitinkamai nustatytas ir dūmų kiekio didėjimas. Kaip matyti iš pateiktų rezultatų išmetamų dujinių teršalų koncentracijos neviršija Lietuvos respublikos teisės aktuose nurodytų ribinių verčių. Tuo tarpu kietųjų dalelių koncentracija už katilo prieš valymo įrenginius siekė 600 mg/Nm³ prie 49% drėgnumo bei 900 mg/Nm³ prie 46,1%. Nustatyta, kad kietųjų dalelių sudėtyje likę apie 8 procentus degiosios masės. Kuo didesnė kietųjų dalelių koncentracija dūmuose tuo didesni šilumos nuostoliai dėl nepilno kuro mechaninio sudegimo.

2.2 lentelė. Dūmų tyrimų duomenys

Parametras	Matavimo vienetai	Vertė		
		2013.01.11	2013.01.25	2013.02.15
Drėgmės kiekis	%	49,0	36,9	46,1
Dūmų kiekis	m ³ /h	11170	8850	9915
Dūmų recirkuliacijos kiekis:				
I recirkuliacija	m ³ /h	370	1220	704
II recirkuliacija		90	152	232
III recirkuliacija		150	398	332
		130	600	140
Dūmų temperatūra už katilo	°C	176	156	178
Pakuros temperatūra virš II oro	°C	409	474	517
Pakuros temperatūra už III oro	°C	780	820	850
O₂ kiekis¹	%	5,7 / 6,9	5,7 / 4,8	6,0 / 7,0
CO kiekis	mg/Nm ³	7	16	7
CO₂ kiekis	%	13,6	14,9	13,1
NO_x kiekis	mg/Nm ³	300	217	287
Kietųjų dalelių kiekis	mg/Nm ³	600	-	900

Pelenų kiekis kietosiose dalelėse	%	92,1	-	91,8
Degiosios dalies likusis kietosiose dalelėse	%	7,9	-	8,2

¹ – katilinės valdymo sistemos ir Testo prietaiso parodymai

Analizuojant dūmų recirkuliacijos kiekio priklausomybę nuo kuro drėgnumo, matyti, kad drėgnumui mažėjant recirkuliacinių dūmų kiekis didėja. Pagrindinė didėjimo priežastis, pakuros automatinis valdymas. Pakilus pakuros temperatūrai, už tretinio oro įpūtimo, aukščiau 800°C pradeda didėti dūmų recirkuliacijos ventiliatoriaus sukimosi dažnis ir grąžinamas didesnis dūmų kiekis. Analizuojant recirkuliacinių dūmų pasiskirstymą, matyti, kad didžioji dūmų recirkuliacijos kiekio dalis patenka kartu su tretiniu oru, po to seka II recirkuliacija, bei mažiausiai recirkuliacinių dūmų paduodama po ardynu. Esant degimo temperatūrai 800 – 1100 °C ribose azoto oksidai daugiausia formuojasi iš kuro azoto. Taip pat žinoma, kad kuro gazifikacijos metu kartu su lakiosiomis kuro medžiagomis išsiskiria ~50 procentų kuro azoto, o kita dalis lieka anglyje. Vadinasi didžiausias efektas recirkuliuojant dūmus turėtų būti pasiektas toje vietoje kur yra didžiausia kuro degimo temperatūra ant ardyno, t.y. anglies oksidacijos zonoje, bei pakuroje, kur yra didžiausia temperatūra.

2.3.4 Vanduo

Bandymų metu iš tinklų grįžtamo termofikacinio vandens temperatūra svyravo nuo 41 iki 45°C tinklų vandens debitas svyravo atitinkamai 149 – 163 m³/h). Temperatūra į katilą vidutiniškai siekė 90°C, o iš katilo - 102°C. Pagal pulto rodmenis vandens debitas per katilą (sausio 11-ą 161 m³/h; sausio 25-ą 152 m³/h; vasario 15-ą 163 m³/h).

2.3.5 Šilumos balansas

Po pirmojo bandymų etapo atlikti vandens šildymo katilo su pakura šiluminio balanso skaičiavimai. SCADA duomenys, papildomų matavimų rezultatai ir skaičiavimai pateikiami 2.3 lentelėje:

2.3 lentelė. SCADA duomenys, matavimai bei skaičiavimai

Eil. Nr.	Parametro pavadinimas	Žymėjimas	Matavimo vienetai	Nustatymo būdas arba formulė	Matavimai		
					1	2	3
KURAS							
1	Drėgnumas	w	%	Kuro analizė	49,0	36,9	46,1
2	Šilumingumas	Q_z^n	kJ/kg	Kuro analizė	8482	10799	9018
3	Kuro kiekis į katilą	B_d	kg/h	SCADA	2260	1900	1950
4	Peleningumas	A	%	Kuro analizė	1	1,7	0,74
5	Degiosios masės dalis pelenuose	A_c	%	Pelenų analizė	5,6	10,4	1,21
6	Pelenų kiekis	B_p	kg/h	$\frac{B_d \cdot A_c}{100} \cdot \frac{A_c}{100} + \frac{B_d \cdot A_c}{100}$	23,9	35,7	14,6
7	Katilo našumas pagal kurą	$Q_{k(k)}$	kW	$\frac{B_d \cdot Q_z^n}{100}$	5325	5700	4885
ORAS							
1	Lauko oro temperatūra	t_o	°C	SCADA	-4,7	-8,2	0
2	Oro temperatūra prieš ventiliatorius	t_{vo}	°C	SCADA	27,3	26,6	32,0
3	Pirminio oro ventiliatoriaus Nr.1 sukimosi dažnis	n_{v11}	Hz	SCADA	23,2	18,9	29,0
4	Pirminio oro ventiliatoriaus Nr.1 našumas	Q_{v11}	m^3/h	Matavimai	867,1	70,9	995,7
5	Pirminio oro ventiliatoriaus Nr.2 sukimosi dažnis	n_{v12}	Hz	SCADA	45,8	34,6	34,5
6	Pirminio oro ventiliatoriaus Nr.2 našumas	Q_{v12}	m^3/h	Matavimai	1323,4	998,9	1251,6

Eil. Nr.	Parametro pavadinimas	Žymėjimas	Matavimo vienetai	Nustatymo būdas arba formulė	Matavimai		
					1	2	3
7	Pirminio oro ventiliatoriaus Nr.3 sukimosi dažnis	n_{v13}	Hz	SCADA	36,2	27,9	11,3
8	Pirminio oro ventiliatoriaus Nr.3 našumas	Q_{v13}	m^3/h	Matavimai	526,5	405,8	284,2
9	Antrinio oro ventiliatoriaus sukimosi dažnis	n_{v2}	Hz	SCADA	42,7	38,6	45,7
10	Antrinio oro greitis Nr.1	w_{21}	m/s	Matavimai	1,0	1,0	3,3
11	Antrinio oro greitis Nr.2	w_{22}	m/s	Matavimai	3,5	3,5	2,9
12	Antrinio oro greitis Nr.3	w_{23}	m/s	Matavimai	2,5	1,5	2,8
13	Antrinio oro greitis Nr.4	w_{24}	m/s	Matavimai	2,0	3,5	2,8
14	Antrinio oro greitis Nr.5	w_{25}	m/s	Matavimai	0,0	0,0	2,9
15	Antrinio oro greitis Nr.6	w_{26}	m/s	Matavimai	3,2	1,0	1,6
16	Antrinio oro kiekis Nr.1	Q_{v21}	m^3/h	$w_{21} \cdot 0,02 \cdot 3600$	72,0	72,0	237,6
17	Antrinio oro kiekis Nr.2	Q_{v22}	m^3/h	$w_{22} \cdot 0,02 \cdot 3600$	72,0	72,0	237,6
18	Antrinio oro kiekis Nr.3	Q_{v23}	m^3/h	$w_{23} \cdot 0,02 \cdot 3600$	252,0	252,0	208,8
19	Antrinio oro kiekis Nr.4	Q_{v24}	m^3/h	$w_{24} \cdot 0,02 \cdot 3600$	180,0	108,0	201,6
20	Antrinio oro kiekis Nr.5	Q_{v25}	m^3/h	$w_{25} \cdot 0,02 \cdot 3600$	144,0	252,0	201,6
21	Antrinio oro kiekis Nr.6	Q_{v26}	m^3/h	$w_{26} \cdot 0,02 \cdot 3600$	0,0	0,0	208,8
22	Bendras antrinio oro kiekis	Q_{v2}	m^3/h	$\sum Q_{v21} \dots Q_{v26}$	878,4	756,0	1173,6
23	Tretinio oro ventiliatoriaus sukimosi dažnis	n_{v3}	Hz	SCADA	45,0	45,0	37,5
24	Tretinio oro greitis	w_3	m/s	Matavimai	22,0	17,5	20,5

Eil. Nr.	Parametro pavadinimas	Žymėjimas	Matavimo vienetai	Nustatymo būdas arba formulė	Matavimai		
					1	2	3
25	Tretinio oro kiekis	Q_{v3}	m^3/h	$w_3 \cdot 0,078 \cdot 3600$	6177,6	4914,0	5756,4
26	Bendras oro kiekis pagal matavimus	Q_v	m^3/h	$Q_{v1} + Q_{v2} + Q_{v3}$	9773,0	7779,6	9461,5
27	Pirminio oro slėgis po ardynu Nr.1	P_{o11}	Pa	SCADA	310,2	370,7	415,3
29	Pirminio oro slėgis po ardynu Nr.2	P_{o12}	Pa	SCADA	2,3	38,9	-2,0
30	Pirminio oro slėgis po ardynu Nr.3	P_{o13}	Pa	SCADA	-25,0	-29,9	-76,3
31	Antrinio oro slėgis	P_{o2}	Pa	SCADA	128,3	101,7	140,0
32	Tretinio oro slėgis	P_{o3}	Pa	SCADA	725,0	607,9	843,3
DEGIMO PRODUKTAI							
1	Trauka kūrykloje	P_k	Pa	SCADA	-92,3	-88,9	-107,5
2	Dūmsiurbio sukimosi dažnis	n_d	Hz	SCADA	39,3	30,3	36
3	Dūmų greitis	w_d	m/s	Matavimai	9,2	7,0	9,5
4	Dūmsiurbio našumas pagal greitį	Q_d	m^3/h	$w_d \cdot 0,396 \cdot 3600$	13115,5	9979,2	13543,2
5	Dūmų temperatūra už katilo	t_{dm1}	°C	Matavimai	170	156,5	178,4
6	Dūmų temperatūra už katilo	t_{d1}	°C	SCADA	175	152,4	178
7	Dūmų temperatūra už kondensacinio ekonomizerio	t_{d2}	°C	SCADA	47	48	44,5
8	Deguonies koncentracija po katilo	O_2	%	SCADA	5,8	5,77	6
9	Oro pertekliaus koeficientas	α	—	SCADA	1,38	1,38	1,4
10	Deguonies koncentracija po katilo	O_2	%	Matavimai	6,88	4,83	7

Eil. Nr.	Parametro pavadinimas	Žymėjimas	Matavimo vienetai	Nustatymo būdas arba formulė	Matavimai		
					1	2	3
11	Oro pertekliaus koeficientas	α	—	$\frac{21}{21 - O_2}$	1,49	1,29	1,5
12	CO ₂ koncentracija už katilo	CO ₂	%	Matavimai	12,8	14,88	13,07
13	SO ₂ koncentracija už katilo	SO ₂	%	Matavimai	0	0	0
14	NO _x koncentracija už katilo	NO _x	%	Matavimai	291	217	287
15	CO koncentracija už katilo	CO	%	Matavimai	7	16	7
16	Kietosios dalelės dūmuose	c_d	mg/Nm ³	LAND 26-98/M-06 [6]	619,6	820,0	901,6
17	Degioji masė kietosiose dalelėse	D _{cd}	%	Dalelių analizė	7,4	10	8,18
18	Dūmų entalpija pagal oro temperatūrą matavimų metu	h_{d1}	kJ/kg	Lentelės	181,4	166,9	190,5
19	Dūmų tankis	ρ_{d1}	kg/m ³	Lentelės	0,81	0,84	0,79
20	Šilumos kiekis išeinantis su dūmais, pagal oro temperatūrą matvimų metu	Q_{d1}	kW	$Q_d \cdot \rho_{d1} \cdot h_{d1}$	444,8	344,5	414,5
VANDUO							
1	Vandens temperatūra iš tinklų	t_v	°C	SCADA	43	45	41,3
2	Vandens temperatūra prieš katilą	t'_{mv}	°C	SCADA	89,9	89,9	90,1
3	Vandens temperatūra už katilo	t''_{mv}	°C	SCADA	101,4	101,9	102,4
4	Vandens slėgis iš tinklų	P_v	bar	SCADA	2,9	2,9	3,1
5	Vandens slėgis prieš katilą	P'_v	bar	SCADA	6,2	6,7	6,1

Eil. Nr.	Parametro pavadinimas	Žymėjimas	Matavimo vienetai	Nustatymo būdas arba formulė	Matavimai		
					1	2	3
6	Vandens slėgis už katilo	P''_v	bar	SCADA	5,2	5,7	5,2
7	Katilo hidraulinis pasipriešinimas	P	bar	$P'_v - P''_v$	0,95	0,99	0,88
8	Vandens kiekis iš tinklų	G_{vt}	m^3/h	SCADA	157,0	149,9	162,3
9	Vandens entalpija iš tinklų	h_v	kJ/kg	Lentelės	180,0	188,7	173,0
10	Vandens entalpija prieš katilą	h'_v	kJ/kg	Lentelės	376,9	377,4	377,9
11	Vandens entalpija už katilo	h''_v	kJ/kg	Lentelės	425,3	427,5	429,3
12	Vandens tankis iš tinklų	ρ_{mv}	kg/m^3	Lentelės	991,1	990,3	991,8
13	Vandens tankis prieš katilą	ρ'_{mv}	kg/m^3	Lentelės	965,6	965,6	965,5
14	Vandens tankis už katilo	ρ''_{mv}	kg/m^3	Lentelės	957,5	957,2	956,9
15	Katilo našumas	Q_S	kW	SCADA	4730	5214	4330
16	Vandens kiekis pamaišymui	G_{vp}	m^3/h	SCADA	210	240	158
17	Vandens kiekis per katilą	G_v	m^3/h	$G_{vt} + G_{vp}$	367	390	320
18	Katilo našumas pagal vandenį	Q_k	kW	$G_v \cdot (h''_v - h'_v)$	4748	5215	4391
TIESIOGINIS KATILO BALANSAS							
1	Naudingo veiksmo koeficientas	η_t	%	$100 \cdot Q_k / (B_d / 3600 / Q_z^n)$	89,2	91,5	89,9

Eil. Nr.	Parametro pavadinimas	Žymėjimas	Matavimo vienetai	Nustatymo būdas arba formulė	Matavimai		
					1	2	3
NETIESIOGINIS KATILO ŠILUMOS BALANSAS APSKAIČIUOJAMAS PAGAL TERMODINAMINES LYGTIS							
1	Šilumos nuostoliai su dūmais pagal dūmų kiekio matavimus (pagal oro temperatūrą bandymų metu)	q_2	%	$100 \cdot Q_{d1}/Q_s$	9,40	6,61	9,57
2	Šilumos nuostoliai dėl nepilno cheminio degimo	q_3	%	$100 \cdot (CO \cdot Q_d \cdot Q_{CO})/Q_s$	0,0055	0,0086	0,0061
3	Šilumos nuostoliai dėl mechaninio nesudegimo	q_4	%	$\frac{B_p \cdot A_c}{3,6 \cdot 10^5} \cdot \frac{Q_c \cdot 100}{Q_s}$	0,257	0,646	0,037
4	Šilumos nuostoliai į supančią aplinką	q_5	%	Katilo dokumentacija	1,65	1,50	1,80
5	Šilumos nuostoliai su kietosiomis dalelėmis dūmuose	q_6	%	$\left(\frac{C_d \cdot D_{cd}}{10^8} \cdot \frac{Q_d}{3600} \cdot \frac{Q_{CO}}{Q_s}\right) \cdot 100$	0,0357	0,0441	0,0648
6	Katilo n.v.k. "brutto" (pagal oro temperatūrą bandymo metu)	η_{br}	%	$100 - (q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6)$	88,65	91,20	88,52
7	Kuro sunaudojimas	B	kg/h	$\frac{Q_s}{Q_z^n \cdot \eta_{br}}$	2265	1905,9	1952,7

Tiesioginio katilo balanso įvertinimo ir naudingo veiksmo koeficiento skaičiavimui didžiulės įtakos turėjo kuro kiekio įvertinimas. Dėl šios priežasties n.v.k. skaičiuojant šiuo metodu 2013.01.11 buvo 89,2%, 2013.01.25 – 91,5%, 2013.02.15 – 89,9%.

Eksperimentinių bandymų metu buvo išmatuoti visi iš katilo išeinantys srautai ir jų pagrindiniai parametrai. Taikant termodinamines lygtis apskaičiuoti pagrindiniai šilumos nuostoliai. Kaip matyti iš gautų rezultatų, nustatytas vandens šildymo katilo naudingo veiksmo koeficientas „bruto“ buvo: 2013.01.11 – 88,6%, 2013.01.25 – 91,2%, 2013.02.15 – 88,5%.

Didžiausias katilo efektyvumas pasiekiamas esant sausiausiam kurui, kurio metu mažiausias oro pertekliaus koeficientas, dūmų kiekis ir temperatūra. Priklausomai nuo katilo apkrovimo keičiasi ir šilumos nuostoliai į supančią aplinką nuo katilo sienelių. Mažėjant našumui šie nuostoliai santykinai padidėja. Didžiausias mechaninis nesudegimas (degi masė pašalinama su pelenais) nustatytas dirbant su sausiausiu kuru, mažiausi su 46,1% drėgnumo kuru.

2.4 Pirmojo bandymų etapo rezultatai

2013 m. sausio mėn. 11 d., sausio mėn. 25 d., vasario mėn. 15 d. UAB „ENG,, Garliavos katilinėje (Lozoraičio g.17A, Garliava) buvo atlikti biokuro pakuros DG-6 su vandens šildymo katilu Danstoker VP-13 balansiniai bandymai. Atlikus bandymus nustatyta, kad:

1. Dirbant katilui sausio 11 d., kuro kaloringumas buvo 8482 kJ/kg, drėgnumas 49,0%, prie vidutinio katilo apkrovimo 4730 kW, naudingo veiksmo koeficientas lygus 88,65%;
Sausio 25 d., kuro kaloringumas buvo 10799 kJ/kg, drėgnumas 36,9%, prie vidutinio katilo apkrovimo 5214 kW, katilo naudingo veiksmo koeficientas lygus 91,2%;
Vasario 15 d., kuro kaloringumas buvo 9018 kJ/kg, drėgnumas 46,1 % prie vidutinio katilo apkrovimo 4330 kW, katilo naudingo veiksmo koeficientas lygus 88,52%.
Pagrindinė šilumos nuostolių dedamoji yra šilumos nuostoliai su išeinančiais dūmais, kurie siekia net 9,57% vasario 15 dieną. Šie nuostoliai susidaro dėl per didelio perteklinio deguonies kiekio. Kita dedamoji – šilumos nuostoliai atsirandantys dėl nesudegusio kuro, kurie buvo didžiausi sausio 25 dieną ir siekė 0,065 %. Šiuos nuostolius įtakoja ardyno judėjimo intensyvumas, bei pirminio oro kiekis.
2. Bandymų metu iš katilo išmetamų teršalų koncentracijos neviršijo iš stacionarių šaltinių išmetamų teršalų normų, nurodytų normatyviniame dokumente LAND 43-2013.
3. Drėgnumui mažėjant recirkuliacinių dūmų kiekis didėja. Pagrindinė didėjimo priežastis, pakuros automatinis valdymas. Pakilus pakuros temperatūrai, už tretinio oro įpūtimo, aukščiau 800°C pradeda didėti dūmų recirkuliacijos ventiliatoriaus sukimosi dažnis ir grąžinamas didesnis dūmų kiekis, kad palaikyti užduotą dūmų temperatūrą į katilą.

Didžioji recirkuliacinių dūmų dalis patenka kartu su tretiniu oru, po to seka antrinė recirkuliacija, bei mažiausiai recirkuliacinių dūmų paduodama po ardynu;

4. Pakuroje įdiegtas trijų laipsnių oro padavimas, kurių kiekių pasiskirstymas vieneto dalimis yra sekantis: didžioji dalis viso oro tenka tretinio oro srautui ~0,6, toliau seka pirminis oras ~0,3 bei antrinis oras ~0,1.

Analizuojant balansinių bandymų metu surinktus duomenis buvo pastebėtas skirtingas pakuros ardyno judėjimo ciklą nustatymas:

- I-ąją bandymų dieną abi ardyno dalys sujuda iškart po kuro įstūmimo (1:1), t.y. kuro judėjimo greitis per visą pakuros ilgį yra pastovus;

- II-ąją bandymų dieną antra ardyno dalis juda iškart po kuro įstūmimo, bet pirma ardyno dalis sujuda tik kai antrą kartą suveikia kuro įstūmimo hidrocilindras (2:1). Tokiu būdu kuro judėjimo greitis ant antros ardyno dalies yra du kartus didesnis negu ant pirmos;

- III-ąją bandymų dieną antra ardyno dalis juda iškart po kuro įstūmimo, bet pirma ardyno dalis sujuda tik kai šeštą kartą suveikia kuro įstūmimo hidrocilindras (6:1). Taigi kuro judėjimas ant pirmojo ardyno yra šešis kartus lėtesnis.

Šis santykis lemia biokuro sluoksnio storį ant pirmos ardyno dalies ir kuo jis didesnis tuo didesnis biokuro sluoksnio storis. Šį reiškinį patvirtina pirminio oro slėgio kitimas priklausomai nuo sluoksnio storio (žr. 2.4 lentelę).

2.4 lentelė. Pakuros parametrų suvestinė

Parametras	I-oji bandymų diena			II-oji bandymų diena			III-oji bandymų diena		
	Katilo našumas / kuro drėgnumas / Ardynų judėjimo santykis								
	4,7 MW / 49,0 % / 1:1			5,2 MW / 36,9 % / 2:1			4,4 MW / 46,1 % / 6:1		
	Oro kiekis, m ³ /h	Slėgis, Pa	Ardyno ir pakuros t- ra, °C	Oro kiekis, m ³ /h	Slėgis, Pa	Ardyno ir pakuros t- ra, °C	Oro kiekis, m ³ /h	Slėgis, Pa	Ardyno ir pakuros t- ra, °C
Viso oro	9770			7780			9460		
I oras:	2719			2108			2530		
1.	870	310	230	700	370	228	995	415	231
2.	1320	200	221	1000	38	175	1250	-2	216
3.	526	-25	42	406	-29	64	284	-76	158
II oras	878		409	756		474	1173		517
III oras	6177		780	4914		820	5756		850

Pirminio oro pirmoje kameroje virš pirmos ardyno dalies slėgis didėja didėjant sluoksnio storii, t.y. atsiradus papildomam pasipriešinimui, prapūsti tą patį oro kiekį reikalingas papildomas slėgis. Stebint pirminio oro antros kameros slėgio kitimą, matyti, kad didėjant ardyno judėjimo santykiui slėgis ima mažėti. Pagrindinė mažėjimo priežastis yra ta, kad šioje oro padavimo kameroje susijungia abi pakuros ardyno dalys.

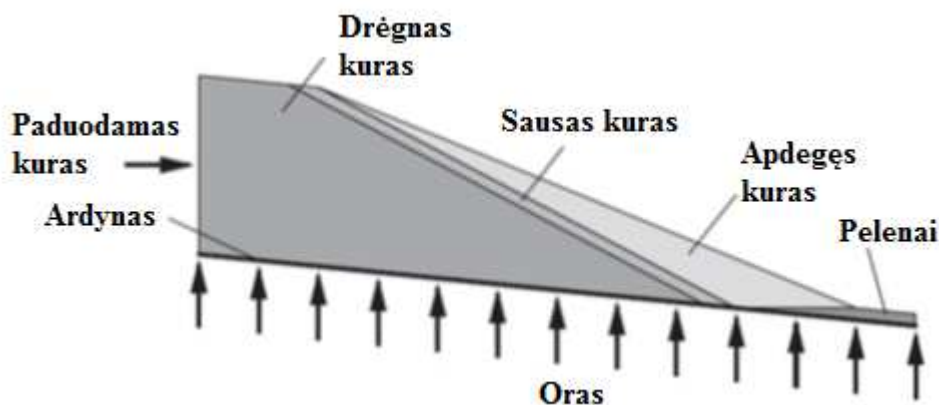
Dėl skirtingo judėjimo greičio atsiranda biokuro sluoksnio storio „lūžis“. Pusę kameros dengia storas biokuro sluoksnis su dideliu pasipriešinimo koeficientu, kita pusė plona, kurios pasipriešinimas ganėtinai mažas. Tokiu būdu akivaizdu, kad oras kameroje skverbiasi pro plonąją biokuro sluoksnį su mažu pasipriešinimu, pasiskirsto netolygiai, padidina greitį per sluoksnį. Padidėjęs greitis per sluoksnį gali sukelti sluoksnio „virimą“, arkas, tunelius ir panašius efektus. Dėl šios priežasties galimas ir lengvųjų kuro dalelių išnešimas į katilo dūmų traktą. Pažymėtina, kad padidėjus ardyno dalių judėjimo santykiui nustatytas ir didesnis kietųjų dalelių kiekis išeinančiuose dūmuose.

Pirminio oro trečioje kameroje visais atvejais nustatyta trauka, kuri dėl plono anglies – pelenų sluoksnio persiduoda iš pakuros (~ -90 Pa). Prie ardyno dalių judėjimo santykio 6:1 slėgis oro kameroje (-76 Pa) artimas pakuros slėgiui. Vadinasi biokuro degimo likučio sluoksnis tampa mažiausias iš visų tirtų atvejų. Tai įrodo ir pelenuose nustatyta mažiausia nesudegusio kuro organinio likučio dalis. Iš šių pastebėjimų galima daryti išvadą, kad didėjant kuro drėgnumui būtina didinti ardyno dalių judėjimo santykį, taip pat reikia padidinti užduotą vertę, kas kiek kuro maitintuvo ciklą turi suveikti antroji ardyno dalis bei tai suderinti su pirminio oro kiekiu trečiojoje kameroje, kad pelenų sluoksnio neprapūstų pirminis oras, kas lemia didelį kietųjų dalelių išnešimą iš pakuros.

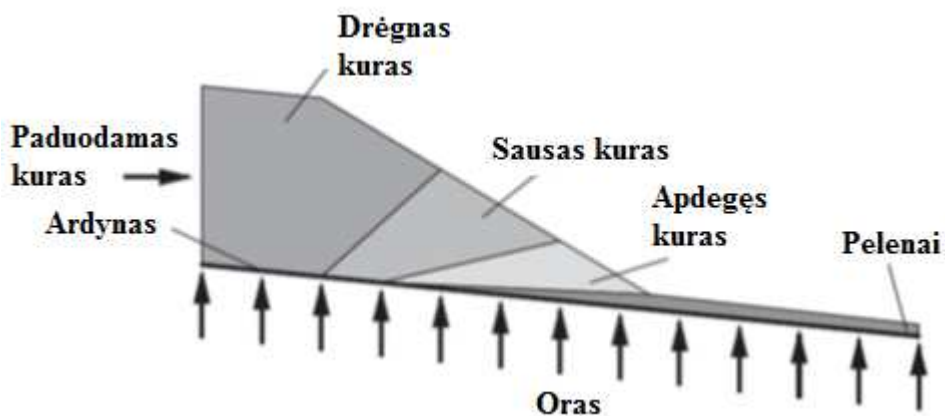
2.5 lentelė. Kuro tyrimų suvestinė

Parametras	Matavimo vienetai	Vertė		
		2013.01.11	2013.01.25	2013.02.15
Kuro drėgnumas	%	49,0	36,9	46,1
Kuro žemutinis šilumingumas	kJ/kg	8218	10799	9018
Kuro peleningumas	%	1	1,7	0,74

Atlikus biokuro pakuros darbinųjų parametrų stebėjimą, buvo pastebėtas biokuro degimas iš apačios į viršų. Iki šiol buvo plačiai paplitusi teorija, kad biokuras dėl spinduliavimo nuo liepsnos ir pakuros sienelių užsidega ant viršutinio kuro sluoksnio paviršiaus ir dalis išsiskyrusios šilumos pereina žemyn prieš oro srautą, kur toliau džiovina ir garina drėgną kurą. Dėl skirtingų šilumos ir oro tekėjimo krypčių, degimo reakcijos frontas tampa labai siauras, o degimas lėtai plinta iš viršaus į apačią (žr. 2.3 pav.). Kai degimo frontas pasiekia ardyną, turėtų atsirasti atvirkštinis degimas iš apačios į viršų. Tačiau šis tradicinis biokuro degimo modelis buvo paneigtas kai kuriuose užsienio mokslininkų darbuose [9, 10, 11]. Didėjant kuro drėgnumui, degimo reakcijos fronto plitimas turėtų sunkiai persiduoti iš viršaus į apačią ir užgesti. Šiuose darbuose nustatyta, kad degimo fronto plitimas priklauso nuo oro srauto greičio ir kuro drėgnumo. Norint, kad vyktų intensyvus degimas būtina išlaikyti oro greitį $0,1 - 0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ ir šiam oro greičiui ribinis kuro drėgnumas yra nuo 35 iki 45%. Taigi esant drėgnesniam kurui visuotinai priimtas biokuro degimo modelis yra netinkamas. Šiuose darbuose buvo pasiūlytas kitas degimo modelis – degimo reakcijos frontas plinta iš apačios į viršų (žr. 2.4 pav.). Anot užsienio mokslininkų ant ardyno paviršiaus susidaro plonas karštos medžio anglies sluoksnis, kuris dega pučiant orą per ardyno apačią. Gauta šiluma pernešama tiek konvekcija tiek laidumu. Karšti degimo produktai kyla į viršų garindami ir džiovindami drėgną kurą.



2.3 pav. Biokuro degimas iš viršaus [11]



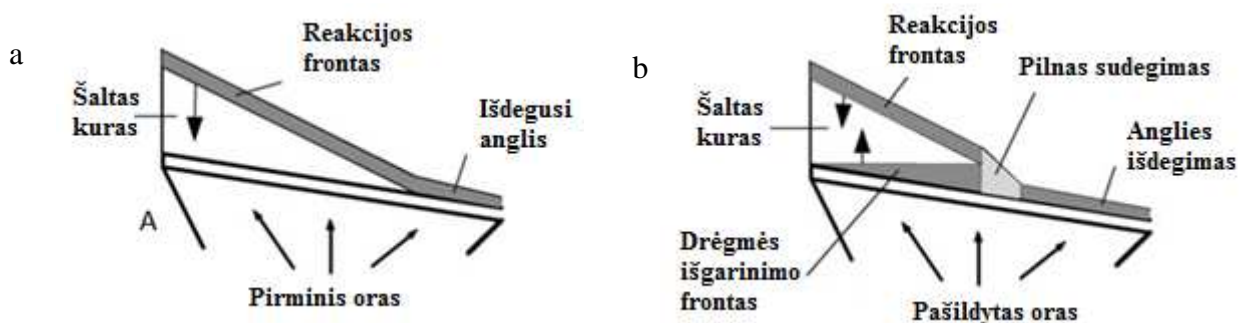
2.4 pav. Biokuro degimas iš apačios [11]

Kad degimas vyksta iš apačios į viršų įrodo pirminės ardyno temperatūros matavimai (žr. 2.3 lentelę). Nors ardynas ir aušinamas pirminiu oru, tačiau visais bandymų atvejais nustatyta, kad pirmos bei antros ardyno termoporos parodymai svyravo $\sim 200^{\circ}\text{C}$, t. y. keičiantis kuro drėgnumui bei ardyno dalių judėjimo santykiui ši temperatūra išlieka panaši. Mažiausias temperatūrų skirtumas užfiksuojamas tik trečią bandymų dieną, tačiau tai galėjo lemti plonas pelenų sluoksnis ant antros ardyno dalies, kuris buvo per mažas, kad sulaikytų nuo liepsnos ir pakuros sienelių spinduliuojančią šilumą. Taip pat ant antros ardyno dalies paviršiaus dėl dažno ardelių judėjimo (6:1) susidaręs plonas karštos medžio anglies ir pelenų sluoksnis, intensyviai dega paduodant I orą į trečią kamerą po ardynu. Šis sluoksnis degdamas taip pat kaitina ardyną, todėl ardyno temperatūra siekia net iki 158°C . Reikia atkreipti dėmesį, kad skirtingi ardyno dalių judėjimo ciklai iššaukia ir skirtingas pirmojo ardyno temperatūras. Antrai ardyno daliai judant tokiu pat ciklišku kaip ir pirmai, biokuro sluoksnis pasiskirsto tolygiai. Tokiu atveju antrojo ardyno temperatūra siekia 42°C , kas rodo, kad susidaręs plonas karštos medžio anglies sluoksnis dalį šilumos atiduoda ir viršutiniam kuro sluoksniui. Pakeitus ardyno dalių judėjimo ciklus (2:1), degimo reakcijos frontas pasislenka atgal, pelenų sluoksnis sumažėja ir temperatūra pakyla vidutiniškai iki 64°C .

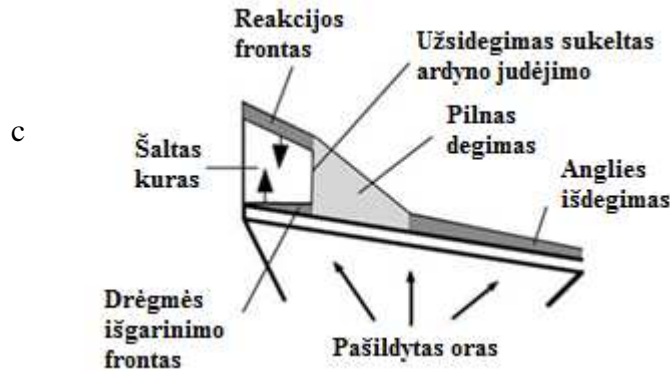
2.5 Galimybių gerinti degimo procesą analizė

2.5.1 Pirminio oro pašildymas

Žinoma, kad oro pašildymas veikia kaip katalizatorius ne tik džiuvimo procesui, bet biokuro užsidegimui ir degimo proceso intensyviniui [9]. 2.5 pav. pateiktose schemose vaizduojamos trys skirtingos kuro degimo schemos ant ardyno, esant skirtingiems pirminio oro atvejams: degimas su nepašildytu pirminiu oru, degimas su pašildytu pirminiu oru ir nejudančiu ardynu bei degimas su pašildytu pirminiu oru ir judamu ardynu.



2.5 pav. Skirtingi kuro degimo režimai ant ardyno [7]: a – degimas su nepašildytu pirminiu oru; b – degimas su pašildytu pirminiu oru ir nejudančiu ardynu;



2.5 pav. Skirtingi kuro degimo režimai ant ardyno [7]: c – degimas su pašildytu pirminiu oru ir judamu ardynu.

Kaip matyti iš pateiktų schemų, įvedus pašildytą orą galima greičiau išdžiovinti į pakurą patenkančią drėgną biokurą. Dėl pašildyto oro pagreitėja kuro džiūvimas, kas lemia greitesnį kuro užsidegimą, pilną jo sudegimą ant ardyno ir mažesnius šilumos nuostolius.

2.5.2 Karštų (>110°C) dūmų recirkuliacija ir jos optimizavimas

Pirminio oro pašildymas siekiant pakuroje greitesnio biokuro džiūvimo yra naudingas tik pasiekus >100°C temperatūrą. Iš praktikos žinoma, kad degimo produktai (dūmai) taip pat plačiai naudojami kuro džiūvinimui, tačiau jų temperatūra turėtų būti taip pat >110°C. Šioje dūmų temperatūroje esantis vandens garas yra perkaitintoje būsenoje ir dūmų sausumas pakankamas siekiant išdžiovinti į pakurą paduodamą drėgną biokurą.

Norint kad recirkuliaciniai dūmai džiovintų paduodamą kurą, reikėtų išvengti jų maišymo su pirminiu oru. Sumaišius karštus dūmus su šaltu oru vidutinė mišinio temperatūra nukrenta žemiau vandens garų soties temperatūros ir perteklinė drėgmė susikondensuoja. Patekus tokiam mišiniui atgal į pakurą ant naujai patekusio šalto biokuro drėgmė kondensuojasi, o tolimesniam jos išgarinimui reikalinga papildoma energija. Trečios dienos bandymų metu nustatytas panašus atvejis: esant pakeistam ardyno judėjimo santykiui 6:1 bei padidėjus iš pakuros išeinančių dūmų temperatūrai >800°C, dūmų recirkuliacijos kiekis į pakurą siekė ~700 m³/h. Tokiu būdu dalis grąžinamų dūmų buvo maišoma su pirminiu oru. Įvertinus recirkuliacijos ir orų kiekius bei recirkuliacinių dūmų ir oro temperatūras, vidutinė dūmų ir oro mišinio temperatūra šiuo atveju yra ~35°C. Vadinasi į pakurą patenka jau sukondensuotas dūmuose esantis vanduo, kurį pakuroje reikia papildomai išgarinti degimo metu. Pažymėtina, kad šių bandymų metu kuro drėgnumas siekė 46,1%.

Siekiant optimalaus dūmų recirkuliacijos veikimo su esančia sistema, reikėtų vengti jo padavimo į pirminę pakuros dalį kur tiekiamas pirminis oras ir drėgnas kuras. Atvirkščiai, kuro džiūvinimui su degimo produktais reikėtų papildomos kameros po ardynu tik dūmų padavimui. Į pakurą padavus drėgno kuro ir prireikūs mažinti išeinančių dūmų temperatūrą iš pakuros, reikėtų

sumažinti dūmų recirkuliaciją į pakuros pirminio oro pirmąją kamerą, paliekant recirkuliacinių dūmų tiekimą į kitas kameras kur būtinas ardyno aušinimas ir NO_x mažinimas.

2.5.3 Pirminio oro kiekio didinimas

Didėjant paduodamo kuro drėgnumui reikia intensyvinti jo degimą, kas atitinkamai intensyvina jo džiuvimą. Pirminio oro kiekio didinimas, pagreitintų kuro džiūvimą ankstesnio kuro užsidegimo atveju, bet iššauktų didesnes ardyno temperatūras. Tokiu atveju pirminio oro didinimą reiktų derinti su ardyno ardelių judėjimo ciklų nustatymais ir ardyno aušinimu vandeniu, bet išvengiant recirkuliacijos, dėl kondensacijos pavojaus pakuroje.

2.5.4 Ardyno judėjimo ciklų keitimas

Iš atliktų bandymų nustatyta, kad padidinus ardyno dalių judėjimo santykį drėgno kuro atveju kuro sudegimas gerėja. Pakeitus ardyno judėjimo santykį būtina perskirstyti ir pirminio oro padavimą.

2.6 Antrasis bandymų etapas. Itin drėgno biokuro deginimas

Pagal projektinę dokumentaciją, pakura suprojektuota deginti biokurą, kurio drėgnumas 30 – 55%. Jeigu kuro tiekėjas į katilinę atveža drėgną kurą, katilinės personalas stengiasi sumaišyti naujai atvežtą drėgną kurą su anksčiau atvežtu sausesniu kuru. Tokiu būdu į pakurą paduodamas tolygesnio drėgnumo biokuras, kuris dažniausiai neviršija projektinių kuro charakteristikos reikšmių. Tačiau, jeigu drėgno kuro atvežama ne viena, o kelis kartus iš eilės, nebelieka galimybės maišyti skirtingo drėgnumo biokurą. Kadangi pakura suderinta prie vidutinio kuro drėgnumo, staigiai pasikeitus į pakurą tiekiamo biokuro drėgnumui galima iššaukti nestabilų pakuros darbą, kuris įtakotų ir mažesnę katilo našumą bei didesnius nuostolius. Jeigu nebūtų užtikrintas reikalingas oro kiekis ir rankiniu būdu nepakoreguotas pakuros ardyno judėjimo dėsnis ar kiti parametrai, galimas nestabilus pakuros darbas ar net užgesimas. Sausėjant kurui mažėja oro perteklius, didėja ardyno temperatūra, intensyviau dega kuras. Suderinus pakuros darbą kurui su vienu drėgnumu, toks pat režimas ne pilnai tinka kitokio drėgnumo kuro deginimui.

Šiame tyrimų etape atlikti pakuros derinimo darbai, kurių metu nustatytos optimalios kuro degimo sąlygos (režimai) ir darbiniai pakuros bei katilo parametrai esant didelio (~60%) drėgnumo kurui. Buvo atliktos pakuros darbo korekcijos siekiant pritaikyti nustatytų režimų parametrus, stebėti katilo aplinkosauginiai ir ekonominiai parametrai.

2.6.1 Bandymų eiga ir metodika

Matavimų tikslas – dirbant vandens šildymo katilui su pakura ir kondensaciniu ekonomazeriu tiekti didelio drėgnumo kurą, rankiniu būdu atlikti pakuros darbo korekcijas siekiant nustatyti tinkamus pakuros darbo režimų parametrus, stebėti katilo aplinkosauginius ir ekonominius parametrus.

2014 m. vasario 17 – 18 d. į Garliavos katilinę atvežtas dviejų skirtingos frakcijos ir drėgnumo kuras (žr. 2.6 pav. ir 2.8 lentelę). Pilnai užpildžius pakuros kuro bunkerį, buvo išjungtos dvi iš keturių kuro sandėlyje esančių hidraulinių platformų. Kuras nuo veikiančių platformų, buvo nustumtas ant dviejų neveikiančių platformų. Ant veikiančių platformų buvo sukrautas drėgnas, virš 60% drėgnumo kuras. Tokiu būdu apsidrausta, kad iškilus nenumatytam atvejui būtų galima greitai patiekti į pakurą sausesnio kuro.

Tiekiant drėgną kurą į pakurą stebimi visi pakuros ir katilo parametrai, o esant poreikiui kvalifikuotas inžinierius – derintojas pakoreguoja pakuros nustatymus. Vandens šildymo katilas dirbo automatinio režimu pagal esamą šilumos poreikį. Dirbant katilui kuro drėgmės įvertinimui imami kuro mėginiai prieš kuro transporterius (žr. 2.7 pav.). Pagrindinėms kuro savybėms nustatyti, laboratorija atliko kuro analizę vadovaujantis Lietuvos Respublikoje galiojančiais standartais: drėgmės matavimas LST EN 14774-1, peleningumo matavimas LST EN 14775, šilumingumo matavimas LST EN 14918.

2.6 lentelė. Antro tyrimų etapo bandymuose naudoto kuro tyrimų duomenys

Parametras	Vienetai	Vertė					
		14.02.17 13:30	14.02.17 7	14.02.17 8	14.02.18	14.02.18 12:00	14.02.18 14:00
Mėginio paėmimo vieta	-	Transporteris	Kuro sandėlis	Kuro sandėlis	Kuro sandėlis	Transporteris	Transporteris
Drėgmės kiekis	%	55,6*	50,9/ 51,7/ 51,9/ 53	59,4	59,3	61,5	60,9
Kuro viršutinis šilumingumas	kJ/kg	9150	-	-	-	7934	8058
Kuro apatinis šilumingumas	kJ/kg	7309	-	-	-	6013	6145
Peleningumas	%	1,8	-	-	-	1,6	1,5

* - kuras buvo maišomas su 02.18 dienos kuru.



2.6 pav. Bandymams naudotas skirtingos frakcijos ir drėgnumo kuras

Dūmų temperatūra ir dūmų komponentų koncentracijų matavimai atlikti už katilo išeinančių dūmų kanale naudojant Testo 350XL. Likutinių pelenų charakterizavimui, pelenų mėginiai imti iš lauke esančio sausų pelenų konteinerio. Pelenų kokybiniam įvertinimui atliktas organinio likučio nustatymas.

Atliekant pagrindinius matavimus, lygiagrečiai buvo fiksuojami katilo valdymo sistemos SCADA parodymai: dūmų temperatūra po katilo; deguonies kiekis dūmuose; pirminio, antrinio ir tretinio oro ir dūmų ventiliatorių dažnio keitiklių reikšmės; dūmų temperatūra prieš ir už dūmų kondensacinio ekonomaizerio; katilo apkrovimas; ekonomaizerio galia.



2.7 pav. Mėginio ėmimo vieta kuro drėgnumui nustatyti

2.6.2 Antrojo bandymų etapo rezultatai

Ekspirimentiniai bandymai buvo vykdomi dvi dienas 2014 vasario 17 d. ir 18 d. Pirmos dienos tyrimų metu kuro drėgmė praktiškai nesikeitė ir svyravo ~55%. Darbo metu katilo apkrovimas svyravo ~3,9 MW, o ekonomazerio galingumas siekė ~1 MW. Dirbant 54% drėgnumo kuru prie minėto katilo apkrovimo, papildomai pakuros reguliuoti nereikėjo ir tiko esama režiminė lentelė. Aplinkosauginiai rodikliai pateikiami 2.8 lentelėje. Pirmosios dienos bandymuose šie parametrai ženkliai nesikeitė.

2.7 lentelė. Aplinkosauginiai parametrai nustatyti bandymų metu

Parametras	Matavimo vienetai	Vertė					
		14.02.17 14:00	14.02.18 11:30	14.02.18 12:30	14.02.18 12:50	14.02.18 13:50	14.02.18 14:50
Degunies kiekis	%	6,7	6,4	8,6	9,5	8,5	6,3
Oro pertekliaus koeficientas	—	1,47	1,43	1,69	1,82	1,68	1,42
CO koncentracija	mg/Nm ³	18	6	60	98	190	67
NO _x koncentracija	mg/Nm ³	540	582	700	579	645	643
CO ₂ koncentracija	%	12,2	12,3	10,8	10,1	10,9	12,5
Degiosios masės dalis pelenuose už pakuros	%	10,1	-	10,4	-	10,3	-

Vasario 18 d. 10.30 - 11 val. į pakurą pradėta tiekti drėgno kuro, kurio vidutinis drėgnumas siekė ~60% (žr. 2.6 lentelę). Pirmiausia pradėjus deginti šlapią kurą pradeda kristi iš katilo išeinančio vandens temperatūra, t.y. mažėja katilo apkrovimas. Siekiant padidinti katilo apkrovimą seka rankinis kuro kiekio į pakurą didinimas. Kuro kiekio didėjimą galima matyti iš pirminio oro pirmos ir antros kamerų oro slėgių už ventiliatoriaus padidėjimo. Žinoma, oro pasipriešinimo vertės didina ir padidėjęs oro srautas į šias sekcijas, tačiau ne taip intensyviai, pvz.: stebint į pirminio oro pirmo ir antro ventiliatoriaus dažnio kitimą vasario 18 d. ~13 val., matyti, kad ~2/3 sumažinus oro tiekimą į šias kameras slėgis už ventiliatoriaus sumažėja tik ~40 Pa kai atitinkamai turėtų sumažėti ~ 120 Pa.

Padidinus kuro tiekimą į katilą, automatiškai (pagal užduotus programoje parametrus) buvo didinamas II ir III oro ventiliatorių dažniai (oro kiekis). Šių orų kiekių padidinimas iššaukia ir didesnę likutinio O₂ koncentraciją dūmuose, kuri padidėja nuo ~ 6 iki 8 % (pagal prietaisą sumontuotą ant katilo) bei nuo 6,4 iki 9,5 % (pagal nešiojamą dūmų dujų analizatorių Testo 350 XL). Padidėjęs oro perteklius blogina kuro sudegimą, didina dūmų kiekį, apkraunamas dūmsiurbis, krenta dūmų temperatūra už pakuros, katilo našumas, efektyvumas. Sumažinus tretinio oro užduotį normalizavosi deguonies koncentracija dūmuose. Padidinus pirminio oro pirmojo ventiliatoriaus bei sumažinus pirminio oro trečiojo ventiliatoriaus užduotis, degimas stabilizavosi.

Pažymėtina, kad vasario 18 d. šlapiame kure vizualiai matėsi didelė dalis spygliuočių medžių spyglių (žr. 2.6 ir 2.7 pav.). Kaip žinoma, spygliuose vidutiniškai yra ~1,8 % azoto, kai standartiškai medienoje tik ~0,2 %. Dėl šios priežasties bandymų metu dūmuose buvo fiksuojama didesnė azoto oksidų koncentracija (~540 mg/Nm³ vasario 17 d. ir 640 – 700 mg/Nm³ vasario 18 d.) nei ankstesnių bandymų metu deginant pagrinde medienos skiedras (~300 mg/Nm³). Tačiau išmetamų teršalų iš kurų deginančių įrenginių normose LAND 43-2013 nurodytų ribinių verčių (750 mg/Nm³) neviršijo.

3 Kuro drėgnumo įtaka kondensaciniam ekonomizeriui

Literatūroje [12] aprašyta metodika ir pateiktos matematinės išraiškos dūmų, susidarančių deginant augalinę biomasę, slaptajai garavimo šilumai įvertinti, bei pateiktos formulės leidžiančios apskaičiuoti kitus kondensacinį režimą charakterizuojantys parametrai:

Apskaičiuojamas sočiųjų garų parcialinis slėgis:

$$p_{sg} = 479 + (11,52 + 1,62 \cdot t)^2;$$

čia t – oro temperatūra 20°C

$$p_{sg} = 479 + (11,52 + 1,62 \cdot 20)^2 = 2407,97 \text{ Pa};$$

Apskaičiuojamas oro drėgnis, kuris nurodo ore esančių vandens garų ir sauso oro masės santykį:

$$d = 0,623 \cdot \frac{\varphi \cdot p_{sg}}{B - \varphi \cdot p_{sg}};$$

čia φ – santykinis oro drėgnis;

B – atmosferinis slėgis, Pa;

p_{sg} – sočiųjų garų parcialinis slėgis, Pa;

$$d = 0,623 \cdot \frac{0,7 \cdot 2407,97}{101325 - 0,7 \cdot 2407,97} = 0,0105;$$

Apskaičiuojamas drėgmės kiekis susidarantis sudeginus 1 kg drėgno biokuro:

$$m_{H_2O} = (1 - n_s) \cdot (1 - w) \cdot (m_{H_2Ost}^0 + \lambda \cdot d \cdot m_{Ost}^0) + w;$$

čia n_s – biokure esančių nedegių mineralinių medžiagų kiekis kuro sausos masės dalimis;

w – kuro drėgnumas, kuro bendrosios masės dalimis;

$m_{H_2Ost}^0$ - stochiometriškai sudeginus 1 kg biokuro, susidarančių vandens garų masė;

λ – oro pertekliaus koeficientas;

d – oro drėgnis;

m_{Ost}^0 – oro masė reikalinga stochiometriškai sudeginti 1 kg biokuro;

$$m_{H_2O} = (1 - 0,015) \cdot (1 - 0,5) \cdot (0,54 + 1,4 \cdot 0,0105 \cdot 5,89) + 0,5 = 0,809 \text{ kg};$$

Apskaičiuojamas su oro pertekliumi sudeginus 1 kg drėgno biokuro susidarančių dūmų kiekį:

$$m_D = 1 + \lambda \cdot (1 - n_s) \cdot (1 - w) \cdot (1 + d) \cdot m_{Ost}^0$$

$$m_D = 1 + 1,4 \cdot (1 - 0,015) \cdot (1 - 0,5) \cdot (1 + 0,0105) \cdot 5,89 = 5,10 \text{ kg};$$

Apskaičiuojamas dūmų drėgnis, sausų dūmų masės dalimis:

$$d_D = \frac{m_{H_2O}}{m_D - m_{H_2O}}$$

$$d_D = \frac{0,809}{5,10 - 0,809} = 0,188;$$

Apskaičiuavus dūmų drėgnį, galima nustatyti rasos taško temperatūrą:

$$t_{Dr} = 37,6 \cdot \lg(250 \cdot d_D)$$

$$t_{Dr} = 37,6 \cdot \lg(250 \cdot 0,188) = 62,9 \text{ } ^\circ\text{C};$$

Norint panaudoti dūmuose esančių vandens garų slaptąją garavimo šilumą, reikia juos ataušinti iki temperatūros žemesnės už rasos taško temperatūrą. Ataušinus dūmus žemiau rasos taško temperatūros, dalis dūmuose esančių vandens garų susikondensuoja ir dūmų drėgnis sumažėja. Dūmuose likusios drėgmės kiekis gali būti apskaičiuojamas pagal formulę:

$$d_{D1} = 0,004 \cdot 10^{\frac{t_{D1}}{37,6}}$$

$$d_{D1} = 0,004 \cdot 10^{\frac{45}{37,6}} = 0,0629 \text{ kg};$$

Ataušinus dūmus iki temperatūros žemesnės nei rasos taško temperatūra, gaunamas šilumos kiekis apskaičiuojamas kaip suma dūmų ataušimo sąskaita gauto šilumos kiekio ir slaptosios garavimo šilumos gautos besikondensuojantis dūmuose esantiems vandens garams:

$$Q_{D1} = 1,005 \cdot t_d + (2500 + 1,8 \cdot t_d) \cdot d_D - 1,005 \cdot t_{D1} - (2500 + 1,8 \cdot t_{D1}) \cdot d_{D1}$$

$$\begin{aligned} Q_{D1} &= 1,005 \cdot 180 + (2500 + 1,8 \cdot 180) \cdot 0,188 - 1,005 \cdot 45 - (2500 + 1,8 \cdot 45) \cdot 0,0629 \\ &= 504,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

Šilumos kiekis Q_{D1} apskaičiuotas 1 kg sausų dūmų, dūmus ataušinus nuo pradinės dūmų temperatūros iki temperatūros žemesnės už rasos taško temperatūrą t_{D1} .

Skaičiavimams svarbi kuro elementinė sudėtis, kuri imama iš standarto LST CEN/TS 14961:2006 „Kietasis biokuras – Kuro specifikacijos ir klasės“ (angl. Solid biofuels - Fuel specifications and classes).

Kuro sudėtis išreiškiama jį sudarančių elementų masės procentais. Kietojo biokuro degieji elementai yra anglis (C), vandenilis (H) ir siera (S). Į kuro sudėtį taip pat įeina deguonis (O) azotas (N), drėgmė (W) ir mineralinės priemaišos (A). Deguonis ir azotas sudaro taip vadinamą kuro vidinį balastą, o drėgmė ir mineralinės priemaišos – išorinį balastą. 3.1 lentelėje pateikta medienos sudėtis be išorinio balasto.

3.1 lentelė. Sausos medienos elementinė sudėtis [13]

C ^s	H ^s	S ^s	O ^s	N ^s	Cl ^s
50,23	6,23	0,03	43,19	0,30	0,02

Sekantiems skaičiavimams naudojamos literatūroje [1] pateikiamos formulės.

Apskaičiuojamas sauso kuro kalingumas kaip žemutinė kuro degimo šiluma:

$$Q_{\frac{z}{n}}^n = 339 \cdot C^n \cdot 1035 \cdot H^n \cdot 109 \cdot S^n - 109 \cdot O^n - 25 \cdot W^n;$$

$$Q_{\frac{z}{n}}^n = 339 \cdot 50,23 \cdot 1035 \cdot 6,23 \cdot 109 \cdot 0,03 - 109 \cdot 43,19 - 25 \cdot 0 = 18486 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Užsидуodamas katilo našumas 5 MW:

$$Q = 5 \text{ MW} = 5000 \text{ kW}$$

Priimamas bendras katilo ir pakuros naudingumo koeficientas pagal eksperimentinius rezultatus:

$$\eta = 89 \%$$

Apskaičiuojama kuro energija:

$$Q_k = Q \cdot \frac{\eta}{100} = 5000 \cdot \frac{89}{100} = 5618 \text{ kW}$$

Apskaičiuojama kuro energetinė vertė:

$$Q_{\text{en}} = \frac{Q_{\frac{z}{n}}^n}{3600} = \frac{18486}{3600} = 5,135 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$$

Apskaičiuojamas kuro suvartojimas:

$$B = \frac{Q}{Q_{\text{en}}} = \frac{5000}{5,135} = 1094 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 0,304 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Apskaičiuojamas teorinis reikalingo oro kiekis:

$$V_o^t = 0,0899 \cdot (C^n + 0,375 \cdot S^n) + 0,265 \cdot H^n - 0,0333 \cdot O^n; \frac{\text{nm}^3}{\text{kg}}$$

$$V_o^t = 0,0899 \cdot (50,23 + 0,375 \cdot 0,03) + 0,265 \cdot 6,23 - 0,0333 \cdot 43,19 = 4,66 \frac{\text{nm}^3}{\text{kg}}$$

Priimamas oro pertekliaus koeficientas:

$$\alpha = 1,4$$

Tikrasis degimui reikalingas oro kiekis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$V_o = V_o^t \cdot \alpha; \frac{\text{nm}^3}{\text{kg}}$$

$$V_o = 4,66 \cdot 1,4 = 6,52 \frac{\text{nm}^3}{\text{kg}}$$

Visiškai sudeginus kurą su teoriniu oro kiekiu, degimo produktuose būna visiško degimo produktai – CO₂, SO₂, H₂O, ir kuro bei oro azotas N. Deginant su oro pertekliumi, dūmuose dar yra oro pertekliaus deguonis. Sieros kiekis medienoje labai mažas, todėl tolimesniuose skaičiavimuose sieros degimo produktas SO₂ nevertinamas.

Apskaičiuojamas anglies dioksido tūris:

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01866 \cdot C^n; \frac{\text{nm}^3}{\text{kg}}$$

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01866 \cdot 50,23 = 0,92 \frac{\text{nm}^3}{\text{kg}}$$

Apskaičiuojamas azoto dujų tūris:

$$V_{\text{N}_2} = 0,79 \cdot V_o^t + 0,008 \cdot N^n; \frac{\text{nm}^3}{\text{kg}}$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,79 \cdot 4,66 + 0,008 \cdot 0,3 = 3,68 \frac{\text{nm}^3}{\text{kg}};$$

Apskaičiuojamas perteklinis azotas:

$$V_{\text{N}_2}^p = (\alpha - 1) \cdot V_o^t \cdot 0,79; \frac{\text{nm}^3}{\text{kg}}$$

$$V_{\text{N}_2}^p = (1,4 - 1) \cdot 4,66 \cdot 0,79 = 1,47 \frac{\text{nm}^3}{\text{kg}}$$

Apskaičiuojamas vandens garų tūris:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,111 \cdot H^n + 0,0124 \cdot W^n + 0,0161 \cdot \alpha \cdot V_o^t; \frac{\text{nm}^3}{\text{kg}}$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,111 \cdot 6,23 + 0,0124 \cdot 0 + 0,0161 \cdot 1,4 \cdot 4,66 = 0,79 \frac{\text{nm}^3}{\text{kg}}$$

Apskaičiuojamas perteklinis deguonis:

$$V_{\text{O}_2}^p = (\alpha - 1) \cdot V_o^t \cdot 0,21; \frac{\text{nm}^3}{\text{kg}}$$

$$V_{\text{O}_2}^p = (1,4 - 1) \cdot 4,66 \cdot 0,21 = 0,39 \frac{\text{nm}^3}{\text{kg}}$$

Apskaičiuojamas sausų degimo produktų tūris:

$$V_{\text{sd}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{N}_2}^p + V_{\text{O}_2}^p; \frac{\text{nm}^3}{\text{kg}}$$

$$V_{\text{sd}} = 0,92 + 3,68 + 1,47 + 0,39 = 6,47 \frac{\text{nm}^3}{\text{kg}}$$

Apskaičiuojama dūmų masė susidaranti sudeginus 1 kg sauso kuro:

$$M_{\text{sd}} = V_{\text{sd}} \cdot \rho_{\text{sd}}; \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$$

$$M_{\text{sd}} = 6,47 \cdot 1,37 = 8,83 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$$

Apskaičiuojamas susidarantių dūmų masinis debitas deginant reikiamą kuro kiekį:

$$G_{\text{sd}} = M_{\text{sd}} \cdot \frac{B}{3600}; \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$G_{\text{sd}} = 8,83 \cdot \frac{1094}{3600} = 2,68 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Apskaičiuojamas kondensaciniame ekonomizaizeryje galimas gauti šilumos kiekis:

$$Q_{KE} = Q_{D1} \cdot G_{sd}; \text{ kW}$$

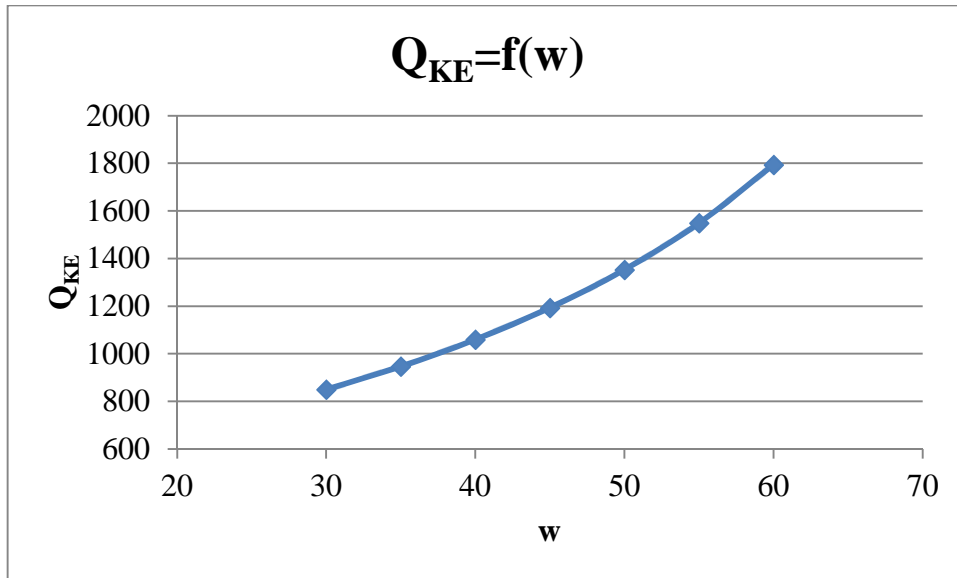
$$Q_{KE} = 504,9 \cdot 2,68 = 1353 \text{ kW}$$

3.1 Parametrai turintys įtaką kondensacinio dūmų ekonomizaizerio darbui

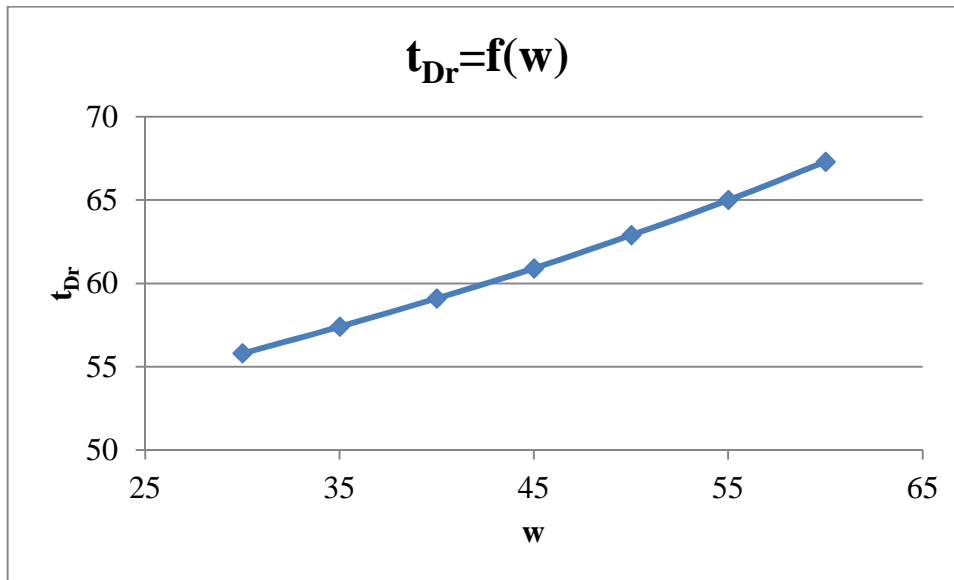
Pasinaudojus ankstesnių skaičiavimų metodika apskaičiuojama kuro drėgnumo, pradinės dūmų temperatūros, dūmų temperatūros po ekonomizaizerio ir oro pertekliaus koeficiento įtaka kondensacinio ekonomizaizerio našumui.

3.1.1 Kuro drėgnumas

Kaip žinoma ir kaip matyti iš 3.1 pav. ženkliai įtaką ekonomizaizerio našumui turi kuro drėgnumas, be to didėjant kuro drėgnumui stiprėja jo įtaka ekonomizaizerio našumui. Tai galima paaikškinti kuro drėgnumo įtaka dūmų rasos taško temperatūrai (žr. pav. 3.2).



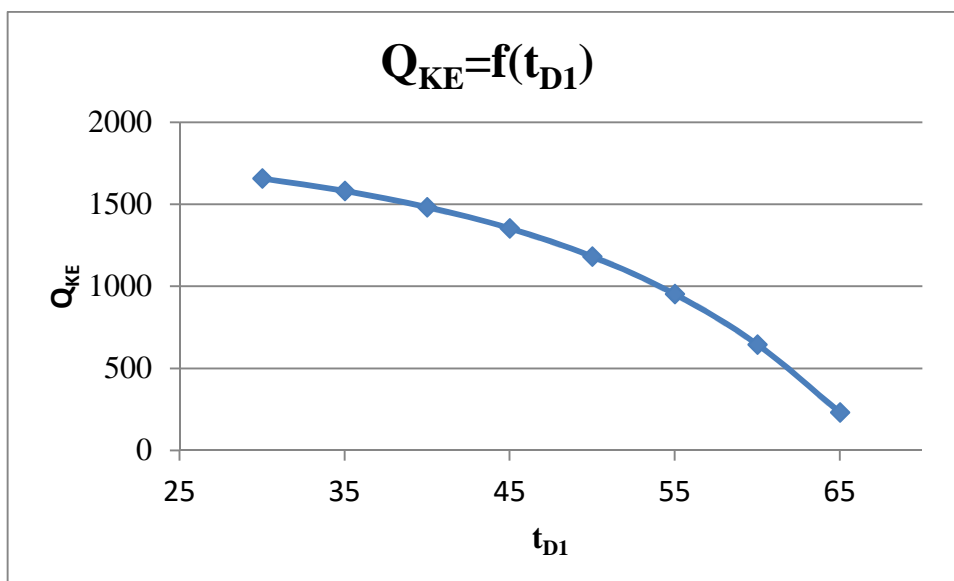
3.1 pav. Kondensacinio ekonomizaizerio našumo priklausomybė nuo kuro drėgnumo, kai $\lambda = 1,4$; $n_s = 0,015$; $t_{D1} = 45^\circ\text{C}$; $t_D = 180^\circ\text{C}$.



3.2 pav. Dūmų rasos taško priklausomybė nuo kuro drėgnumo, kai $\lambda = 1,4$; $n_s = 0,015$; $t_{D1} = 45^\circ\text{C}$; $t_D = 180^\circ\text{C}$.

3.1.2 Dūmų ataušinimo temperatūra

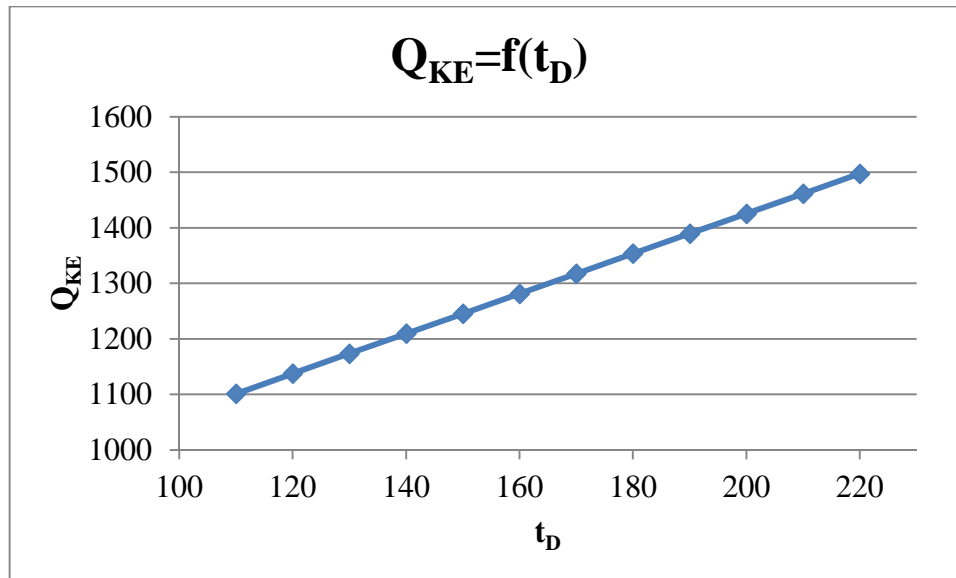
Didelę įtaką ekonomizaierio našumui turi ir dūmų ataušinimo temperatūra. Anksčiau vykusių pakuros bandymų metu taip pat buvo nustatyta, kad dūmai kondensaciniame ekonomizaieryje ataušinami iki temperatūros $2 - 3^\circ\text{C}$ aukštesnės už grįžtantį termofikacinį vandenį. Pagal temperatūrinį grafiką, vasarą grįžtanti temperatūra turi būti 43°C , o žiemą iki 50°C , todėl vasarą kondensacinis ekonomizaieris išnaudojamas efektyviau. Jeigu nepasiekiamas dūmų rasos taško temperatūra, ekonomizaierio našumas drastiškai krenta, kadangi didžioji dalis iš katilo ištekančių dūmų energijos sukauptą slaptosios garavimo šilumos pavidale, o savitosios šilumos įtaka, palyginti, nedidelė.



3.3 pav. Kondensacinio ekonomizaierio našumo priklausomybė nuo dūmų ataušinimo temperatūros, kai $\lambda = 1,4$; $n_s = 0,015$; $w = 0,5$; $t_D = 180^\circ\text{C}$.

3.1.3 Pradinė dūmų temperatūra

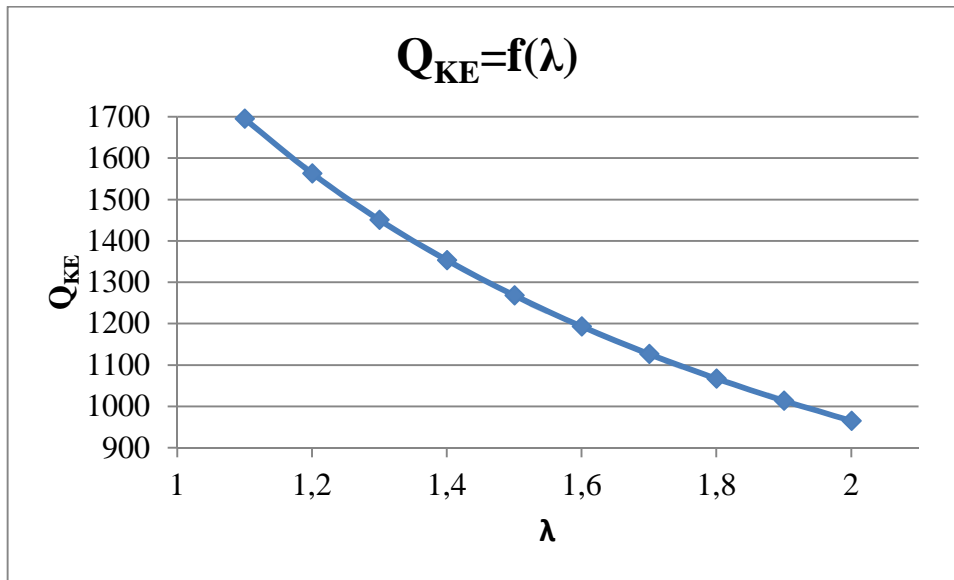
Kaip matyti iš 3.4 pav. į kondensacinį ekonomaizerį įtekančių dūmų temperatūra turi nedidelę įtaką ekonomaizerio našumui. Kondensacinio ekonomaizerio našumo priklausomybė nuo pradinės temperatūros yra tiesinė, nes šiame temperatūros intervale vertinama tik savitoji dūmų šiluma, kurios dydis priklausomai nuo temperatūros kinta nežymiai.



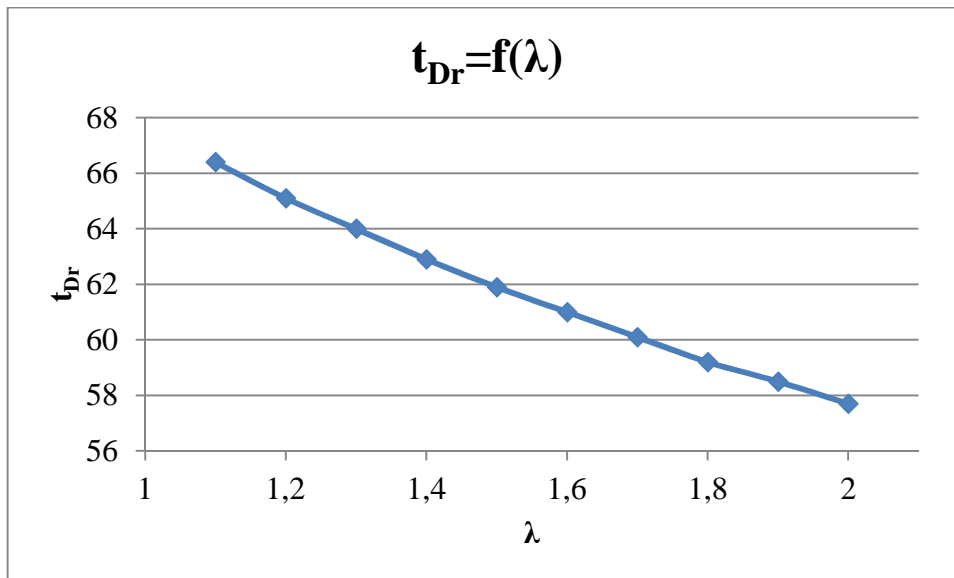
3.4 pav. Kondensacinio ekonomaizerio našumo priklausomybė nuo pradinės dūmų temperatūros, kai $\lambda = 1,4$; $n_s = 0,015$; $w = 0,5$ $t_{D1} = 45^\circ C$.

3.1.4 Oro pertekliaus koeficientas

Iš 3.5 pav. matyti, kad oro pertekliaus koeficientas turi nemažą įtaką kondensacinio ekonomaizerio efektyvumui, tai paaiškina dūmų rasos taško temperatūros priklausomybė nuo oro pertekliaus koeficiento (žr. 3.6 pav.), todėl norint efektyviai išnaudoti kondensacinį ekonomaizerį reikia stengtis palaikyti kiek įmanoma mažesnį oro pertekliaus koeficientą. Tą riboja anglies monoksido susidarymas, kuris apsprendžia katilo nepilno cheminio nesudegimo nuostolius. Palaikyti mažesnį oro pertekliaus koeficientą leistų nuolatinis CO išmetimų stebėjimas, tačiau paprastai degimo proceso valdymo korekcijos vykdomos tik pagal O_2 kiekį po katilo.



3.5 pav. Kondensacinio ekonomaizerio našumo priklausomybė nuo oro pertekliaus koeficiento, kai $\lambda = 1,4$; $n_s = 0,015$; $w = 0,5$ $t_{D1} = 45^\circ C$; $t_D = 180^\circ C$.



3.6 pav. Dūmų rasos taško priklausomybė nuo oro pertekliaus koeficiento, kai $n_s = 0,015$; $w = 0,5$ $t_{D1} = 45^\circ C$; $t_D = 180^\circ C$.

4 Išvados

1. Į pirminio ir antrinio oro zonas paduodami recirkuliaciniai degimo produktai padeda stabilizuoti degimą ant ardyno bei sumažina degimo temperatūrą antrinėje zonoje.
2. Siekiant išvengti korozijos būtina laikytis katilo gamintojo rekomendacijų minimaliai į katilą paduodamo vandens temperatūrai ir dūmų temperatūrai po katilo.
3. Stacionaraus deguonies analizatorius parodymai yra drėgnuose dūmuose, todėl deginant drėgną kurą, realus oro pertekliaus koeficientas yra didesnis nei rodo prietaisas.
4. Išaugus oro pertekliui didėja ir šilumos nuostoliai su dūmais bei mažėja katilo naudingumo koeficientas.
5. Didžiausias katilo efektyvumas pasiekiamas esant sausiausiam kurui, kurio metu mažiausias oro pertekliaus koeficientas, dūmų kiekis ir temperatūra.
6. Ardyno judėjimo ciklų nustatymas lemia biokuro sluoksnio storį ant pirmos ardyno dalies ir kuo jis didesnis tuo didesnis biokuro sluoksnio storis.
7. Dėl skirtingo judėjimo greičio atsiranda biokuro sluoksnio storio „lūžis“.
8. Didėjant kuro drėgnumui būtina didinti ardyno dalių judėjimo santykį.
9. Deginant sausą kurą reikalingas didelis recirkuliacinių dūmų kiekis;
10. Deginant labai drėgną kurą reikalingas didelis pirminio oro kiekis;
11. Biokuro degimas vyksta iš apačios į viršų.
12. Įvedus pašildytą orą galima greičiau išdžiovinti į pakurą patenkantį drėgną biokurą.
13. Norint kad recirkuliaciniai dūmai džiovintų paduodamą kurą, reikėtų išvengti jų maišymo su pirminiu oru.
14. Padidinus ardyno dalių judėjimo santykį drėgno kuro atveju kuro sudegimas gerėja, tačiau būtina perskirstyti ir pirminio oro padavimą.
15. Ženklią įtaką ekonomizaizerio našumui turi kuro drėgnumas, dūmų ataušinimo temperatūra ir oro pertekliaus koeficientas.
16. Norint efektyviai išnaudoti kondensacinį ekonomizaizerį reikia stengtis palaikyti kiek įmanoma mažesnę oro pertekliaus koeficientą.

5 Literatūra ir duomenų šaltiniai

1. AB „Axis Industries“ archyvo medžiaga
2. G. Gimbutis, Šiluminė technika, Vilnius, „Mokslas“ 1993
3. Villu Vares, Ülo Kask, Peeter Muiste, Tõnu Pihu, Sulev Soosaar, Biokuro naudotojo žinynas, „Žara“, Vilnius, 2007 72 p.
4. Danstoker katilo naudotojo vadovas
5. Leif Lindau, Barbara Goldschmidt, Low temperature corrosion in bark fuelled, small boilers
6. Garliavos katilinės darbo projektas, Šilumos gamybos ir tiekimo dalis
7. Пеккер Я. Л., Теплотехнические расчеты по приведенным характеристикам топлива. Энергия 1972.
8. LAND 28-98/M-08 „Stacionarūs atmosferos teršalų šaltiniai. Dulkių (kietųjų dalelių) koncentracijos išmetamosiose dujose nustatymas. Svorio metodas“. Patvirtinta Lietuvos Respublikos aplinkos apsaugos ministerijos 1998 m. balandžio 30 d. įsakymu Nr. 69. Normatyvinis dokumentas įsigalioja nuo 1998 m. gegužės 30 d.
9. H. Thunman, B. Leckner, Ignition and propagation of a reaction front in cross-current bed combustion of wet biofuels, Fuel, 80 (2001), pp. 473–481.
10. H. Thunman, B. Leckner, Co-current and counter-current fixed bed combustion of biofuel – a comparison, Fuel, 82 (2003), pp. 275–283.
11. Robert Bauer, Markus Gölles, Thomas Brunner, Nicolaos Dourdoumas, Ingwald Obernberger, Modelling of grate combustion in a medium scale biomass furnace for control purposes, Biomass and Bioenergy, Volume 34, Issue 4, April 2010
12. Biomasės deginių slaptosios šilumos įvertinimas, Liudas Brazdeikis, Žemės ūkio inžinerija. Mokslo darbai, 2012
13. LST CEN/TS 14961:2006 „Kietasis biokuras – Kuro specifikacijos ir klasės“