



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Teršalų emisijų mažinimas biokurą naudojančiuose įrenginiuose

Baigiamasis magistro projektas

Adas Jasulaitis

Projekto autorius

Doc. Kęstutis Buinevičius

Vadovas

Kaunas, 2024



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Teršalų emisijų mažinimas biokurą naudojančiuose įrenginiuose

Baigiamasis magistro projektas
Termoinžinerija (6211EX023)

Adas Jasulaitis

Projekto autorius

Doc. Kęstutis Buinevičius

Vadovas

Doc. Egidijus Puida

Recenzentas

Kaunas, 2024



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Adas Jasulaitis

Teršalų emisijų mažinimas biokurą naudojančiuose įrenginiuose

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

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

Adas Jasulaitis

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Išduota studentui – Adui Jasulaičiui

1. Projekto tema

Teršalų emisijų mažinimas biokurą naudojančiuose įrenginiuose

(Lietuvių kalba)

Emission Reduction in Biofuel-Powered Devices

(Anglų kalba)

2. Projekto tikslas ir uždaviniai

Tikslas: eksperimentiškai ištirti NO_x emisijų mažinimo galimybes kūrenant biomasę.

Uždaviniai:

1. Atlikti mokslinės literatūros analizę NO_x mažinimo taikant orų perskirstymo ir dūmų recirkuliacijos metodus.
2. Aprašyti eksperimentinių tyrimų įrenginį.
3. Parengti eksperimentinių tyrimų atlikimo ir duomenų apdorojimo metodiką.
4. Atlikti eksperimentinius tyrimus ir apdoroti matavimų duomenis, parengti grafines priklausomybes.

3. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos

Projektas turi atitikti KTU rašto darbų rengimo metodinių nurodymų reikalavimus ir MIDF baigiamųjų projektų rengimo ir gynimo metodinius reikalavimus.

Darbo duomenų pagrindas – Vilniaus kogeneracinės jėgainės dūmų valymo įrenginių veikimo duomenys.

4. Papildomi reikalavimai projektui, ataskaitai ir jos priedams

Netaikoma

Projekto autorius

Adas Jasulaitis

(Vardas, Pavardė)

(Parašas)

(Data)

Projekto vadovas

Kęstutis Buinevičius

(Vardas, Pavardė)

(Parašas)

(Data)

Krypties studijų programų
vadovas

Algimantas Balčius

(Vardas, Pavardė)

(Parašas)

(Data)

Jasulaitis, Adas. Teršalų emisijų mažinimas biokurą naudojančiuose įrenginiuose. Magistro baigiamasis projektas / Vadovas doc. Kęstutis Buinevičius; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): energijos inžinerija, inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: biokuras, teršalų emisijos, emisijų mažinimas.

Kaunas, 2024. 56 p.

Santrauka

Įsigaliojus griežtiems ES aplinkosaugos reikalavimams, dėl kurą deginančių vidutinės galios įrenginių teršalų emisijų, esame priversti ieškoti efektyvių technologinių sprendinių taršai mažinti.

Šio baigiamojo projekto tikslas – eksperimentiškai ištirti NO_x emisijų mažinimo galimybes kūrenant biomasę. Buvo pasirinkta atlikti eksperimentus naudojant orų perskirstymo ir dūmų recirkuliacijos metodus.

Pirmoje magistro baigiamojo darbo dalyje analizuojama nacionalinis oro taršos mažinimo planas, koki reikalavimai yra iškelti Lietuvai ir iki kada Lietuva turi juos įvykdyti. Apžvelgta kaip susiformuoja azoto bei sieros oksidai ir kokie jie gali būti. Aptariama pirminės ir antrinės teršalų emisijų mažinimo priemonės, azoto oksidų mažinimas pakopinio deginimo metodu, oro laipsniavimo strategijos ir dūmų recirkuliacijos įtaka NO_x ir CO susidarymui. Antroje dalyje aprašoma tyrimo metodika, medienos degimo specifika, eksperimentinių tyrimų standai ir degimo parametrų matavimai. Trečioje dalyje pateikiama eksperimentinių bandymų rezultatai bei grafinė analizė. Darbo pabaigoje apibendrinamas visas darbas pateikiant išvadas. Taip pat pateikiamas naudotos literatūros sąrašas.

Eksperimentiniai bandymai buvo atlikti dvejuose stenduose – KTU degimo procesų laboratorijoje ir UAB „Enerstenos“ laboratorijoje. Standai pritaikyti atlikti įvairius tyrimus deginant įvairių rūšių biomasę ir matuoti teršalų emisijas sudarant skirtingas degimo sąlygas. Matavimai buvo atlikti sukūriant skirtingas kuro degimo situacijas, tokias kaip pirminio ir antrinio orų padavimo vietų keitimas, dūmų recirkuliacijos prijungimas į pirminį ar antrinį orą, deguonies koncentracijos reguliavimas pirminiame ar antriniame oruose. Eksperimentuose buvo deginama trijų rūšių biomasė – saulėgražų lukštų granulės, smulkinta pušų žievė ir medienos granulės. Atliekant eksperimentinius bandymus pastebima, jog naudojant skirtingos rūšies biomasę gaunami skirtingi rezultatai ir norint gauti mažiausią išmetamų azoto oksidų kiekį reikalingos specifinės sąlygos. Fiksuojant matavimus prie skirtingų degimo sąlygų ir išsivedus teršalų išmetimų vidurkius prie tam tikrų sąlygų nustatyti šie mažiausi išmetamų azoto oksidų kiekiai: deginant saulėgražų lukštų granules – $80,9 \text{ mg/Nm}^3$, smulkintą pušų žievę – 152 mg/Nm^3 ir medienos granules – $62,62 \text{ mg/Nm}^3$. Šiems išmetamų azoto oksidų kiekiams įtaką daro ne tik degimo sąlygos, bet ir kuro savybės, tokios kaip: kuro drėgnumas bei sausoje masėje esančio azoto kiekis. Drėgniausias kuras buvo smulkinta pušų žievė, o mažiausiai savyje azoto turintis kuras – medienos granulės.

Jasulaitis, Adas. Emission Reduction in Biofuel-Powered Devices. Master's Final Degree Project / supervisor doc. Kęstutis Buinevičius; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: biofuel, pollutant emissions, emission reductions.

Kaunas, 2024. 56 pages.

Summary

Following the implementation of strict EU environmental regulations, for medium-sized combustion plants, we are compelled to seek effective technological solutions to reduce emissions.

The aim of this final project is to experimentally investigate the potential for reducing NO_x emissions from biomass combustion. It was chosen to carry out experiments using air redistribution and flue gas recirculation methods.

The first part of the Master's graduation project analyses the National Air Pollution Plan, what are the requirements for Lithuania, and the deadline by which Lithuania has to meet them. It looks at how nitrogen and sulphur oxides are formed and what they can be. In addition to this there is also an overview of the primary and secondary emission reduction measures, the reduction of nitrogen oxides through staged combustion, air staging strategies and the impact of flue gas recirculation on NO_x and CO formation. The second part describes the methodology of the study, the specificities of wood combustion, the experimental test stands and the measurement of combustion parameters. The third part presents the results of the experimental tests and the graphical analysis. The work is summarised at the end of the paper with conclusions. A list of references used is also given.

The experimental tests were carried out on two stands - the KTU combustion processes laboratory and the laboratory of UAB "Enerstena". The stands are designed to carry out various tests on different types of biomass combustion and to measure pollutant emissions under different combustion conditions. The measurements were carried out in different combustion situations, such as changing the primary and secondary air supply points, connecting the flue gas recirculation to the primary or secondary air and regulating the oxygen concentration in the primary or secondary air. Three types of biomass were used in the experiments: sunflower husk pellets, shredded pine bark and wood pellets. The experimental tests show that different types of biomass give different results and specific conditions are needed to obtain the lowest nitrogen oxide emissions. By recording measurements at different combustion conditions and averaging the emissions at specific conditions, the following lowest nitrogen oxide emissions were found: sunflower husk pellets - 80,9 mg/Nm³, shredded pine bark - 152 mg/Nm³ and wood pellets - 62,62 mg/Nm³. These emissions of nitrogen oxides are influenced not only by the combustion conditions, but also by the fuel characteristics, such as the moisture, the nitrogen content in the dry mass of the fuel. The moistest fuel was shredded pine bark and the lowest nitrogen-containing fuel was wood pellets.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Santrumpų ir terminų sąrašas	11
Įvadas.....	12
1. Literatūros apžvalga	13
1.1. Nacionalinis oro taršos mažinimo planas	13
1.2. Teršalų susidarymas deginant biokurą	14
1.3. Azoto ir sieros oksidų susidarymas degant biokurui	15
1.4. Priemonės teršalams mažinti	15
1.4.1. Pirminės azoto oksidų mažinimo priemonės	15
1.4.2. Antrinės azoto oksidų mažinimo priemonės	16
1.5. NO _x emisijų mažinimas pakopinio degimo būdu	17
1.6. Oro laipsniavimo strategijos	19
1.7. Dūmų recirkuliacijos įtaka NO _x ir CO emisijoms	21
2. Tyrimo metodika	23
2.1. Medienos degimo specifika	23
2.2. Tyrimų standai	24
2.2.1. KTU degimo procesų laboratorijos stendas	24
2.2.2. UAB „Enerstenos“ kuro tyrimų laboratorijos tyrimų stendas	29
2.2.3. Degimo parametrų matavimai	32
3. Eksperimentinių tyrimų rezultatai ir analizė	34
3.1. Eksperimentai KTU degimo procesų laboratorijoje	34
3.2. UAB „Enerstenos“ laboratorijoje atliktų tyrimų duomenų analizė	38
3.2.1. Tyrimas deginant saulėgražų granules	39
3.2.2. Tyrimas deginant smulkintą pušų žievę	45
3.2.3. Tyrimas deginant medienos granules	47
Išvados	53
Literatūros sąrašas	54

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Nacionaliniai išmetamųjų teršalų kiekio mažinimo įsipareigojimai [3].....	13
2 lentelė. Įsipareigojimai amoniako ir kietųjų dalelių mažinimui [3].....	13
3 lentelė. Susidarantys teršalai deginant biomasę [4].	14
4 lentelė. KTU laboratorijoje naudojamo kuro charakteristikos	34
5 lentelė. Antro tyrimo metu naudoto kuro charakteristikos	38
6 lentelė. Teršalų emisijų vidurkiai keičiantis degimo sąlygomis, deginant saulėgražų lukštų granules.....	42
7 lentelė. Teršalų emisijų vidurkiai keičiantis degimo sąlygomis, deginant smulkintą pušų žievę..	46
8 lentelė. Teršalų emisijų vidurkiai keičiantis degimo sąlygomis, deginant medienos granules.....	50

Paveikslų sąrašas

1 pav. Pirminiai NO _x emisijų mažinimo būdai [9].....	16
2 pav. Degimo produktų valymo įrenginių klasifikavimas [13].	17
3 pav. Eksperimentinio stendo brėžinys [14].....	18
4 pav. Optimalus NO _x sumažinimo potencialas naudojant gazifikacinį pakopinį degimą, lyginant su nepakopiniu degimu ir priešingu efektu N ₂ O emisijų atveju optimaliu pirminio oro tiekimu NO _x mažinimui [14]	19
5 pav. Eksperimento laboratorinio stendo schema [16].....	20
6 pav. Degimo produktų vidutinės temperatūros ašinis pasiskirstymas kūrykloje pritaikius skirtingas pakopinio degimo strategijas [16].....	21
7 pav. Tinklelio profilis katilo paviršiuje [17]	21
8 pav. Azoto oksidų pasiskirstymas pakuroje, kairėje pusėje be dūmų recirkuliacijos, dešinėje pusėje su [17].....	22
9 pav. KTU degimo procesų laboratorijos tyrimų stendas.....	25
10 pav. Kuro bunkeris su kuro padavimo į pakurą sraigtu	25
11 pav. Katilo su kūrykla pjūvis	26
12 pav. Biokuro katilo – modelio veikimo schema [21].....	27
13 pav. KTU laboratorijos katilo principinė veikimo schema	28
14 pav. UAB „Enerstenos“ laboratorijos tyrimų stendas [20]	29
15 pav. Bendra tyrimų stendų principinė veikimo schema [26]	30
16 pav. UAB „Enerstenos“ stendo schema [22]	31
17 pav. NO _x priklausomybė nuo O ₂ dūmuose, tiekiant tik pirminį orą ir pirminį ir antrinį orą	34
18 pav. NO _x priklausomybė nuo O ₂ dūmuose, kai į pirminį orą prijungiama dūmų recirkuliacija ..	35
19 pav. Rezultatai viso bandymo metu	36
20 pav. Rezultatų vidurkiai	37
21 pav. Oro angų išdėstymas Enerstenos eksperimentinės bazės stendo pakuroje.....	38
22 pav. Dūmų tekėjimo seka.....	39
23 pav. Antrinio oro padavimas	39
24 pav. NO _x ir CO emisijos keičiant antrinio oro padavimo vietas	39
25 pav. Antrinio oro padavimas	40
26 pav. NO _x ir CO emisijos prijungus DR ir keičiant O ₂ koncentraciją antrinio oro ir DR mišinyje	40
27 pav. Antrinio oro ir DR padavimas	40
28 pav. NO _x ir CO emisijos perkėlus antrinį orą, keičiant antrinio oro debitą ir O ₂ koncentraciją DR	41
29 pav. NO _x ir CO emisijos keičiant antrinio oro debitą, O ₂ koncentraciją DR ir apkeitus vietomis DR su antriniu oru	41
30 pav. Teršalų emisijų vidurkiai keičiantis degimo sąlygomis, deginant saulėgrąžų lukštų granules	43
31 pav. NO _x priklausomybė nuo deguonies koncentracijos dūmuose, deginant saulėgrąžų lukštų granules.....	44
32 pav. Antrinio oro padėtis.....	45
33 pav. NO _x ir CO emisijos keičiant antrinio oro padavimo vietas, prijungiant DR į antrinį orą ir keičiant O ₂ koncentraciją DR ir antrinio oro mišinyje, prijungiant DR į pirminį orą	45

34 pav. NO _x ir CO emisijos keičiant O ₂ koncentraciją pirminio oro ir DR orų mišinyje	46
35 pav. Teršalų emisijų vidurkiai keičiantis degimo sąlygomis, deginant smulkintą pušų žievę.....	47
36 pav. NO _x priklausomybė nuo deguonies koncentracijos dūmuose, deginant smulkintą pušų žievę	47
37 pav. Antrinio oro padavimo vieta.....	48
38 pav. NO _x ir CO emisijos keičiant pirminio ir antrinio oro debitus bei padavimo vietas	48
39 pav. NO _x ir CO emisijos keičiant O ₂ koncentraciją pirminio oro ir dūmų recirkuliacijos mišinyje	49
40 pav. NO _x ir CO emisijos antrinio oro padavimo vietą, prijungiant DR į antrinį orą ir keičiant O ₂ koncentraciją antrinio oro ir DR oro mišinyje.....	49
41 pav. Teršalų emisijų vidurkiai keičiantis degimo sąlygomis, deginant medienos granules.....	51
42 pav. NO _x priklausomybė nuo deguonies koncentracijos dūmuose, deginant medienos granules	51
43 pav. NO _x priklausomybė nuo deguonies koncentracijos dūmuose, lyginant visas 3 biomasas ..	52

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

NO – azoto monoksidai;

NO_x – azoto oksidai;

NO₂ – azoto dioksidai;

SO₂ – sieros dioksidai;

H₂S – vandenilio sulfidai;

CO – anglies monoksidai;

KD – kietosios dalelės;

NMLOJ – ne metaniniai lakieji organiniai junginiai;

DR – dūmų recirkuliacija.

Ivadas

Įsigaliojus naujam ES teršalų emisijų iš kurų deginančių vidutinės galios įrenginių normos [1], kuriose lyginant su Lietuvoje priimtais ir galiojusiais reikalavimais LAND 43-2013 [2], azoto oksidų leistinos koncentracijų degimo produktuose normos griežtėja nuo 2 iki 5 kartų, taip pat ir kietųjų dalelių – 15-20 kartų. Kai kuriose ES šalyse NO_x ir kitų teršalų normos yra griežtesnės nei bendros ES taisyklės. Pavyzdžiui, Olandijoje azoto oksidų leistinas kiekis dūmuose yra 145 mg/m^3 , o ES norma yra 300 mg/m^3 . Kai kuriuose regionuose, kur teršalų apkrova yra didelė, NO_x ribinės koncentracijos vertės nustatomos tarp 70 ir 100 mg/m^3 ar net mažiau. Todėl, siekiant patekti į Vakarų Europos ir Skandinavijos rinkas, būtina diegti naujas biokuro deginimo technologijas. Kūrenant sieros turinčią biomasę, didelė problema yra katilų korozija, kurią sukelia sieros junginiai. Dėl to svarbu ne tik atitikti SO_2 koncentracijos ribines vertes, bet ir mažinti kitų koroziją sukeliančių sieros junginių koncentraciją.

Norint plėtoti atsinaujinančios energetikos įgyvendinimą būtina panaudoti visus įmanomus biomasės išteklius, o kai kuriuose biomasės ištekliuose yra didesni tarša keliančių medžiagų kiekiai. Tam reikalingos specialios biomasės deginimo technologijos ir sprendiniai, kad deginant šios rūšies kurą būtų galima tenkinti griežtas ES ir atskirų šalių ekologines normas.

Dėl šios priežasties šiandien biomasės energetikai susiduria su svarbiu iššūkiu – rasti technologinius sprendinius, kaip sumažinti teršalų emisijas. Kadangi plečiasi biomasės naudojimas energijos gamybai, bus siekiama panaudoti kuo daugiau biomasės išteklių, įskaitant ir tuos, kurie šiuo metu nėra naudojami. Kad būtų galima panaudoti kuo daugiau biomasės kuro reikės specialių deginimo technologijų bei degimo organizavimo priemonių, norint atitikti ES teršalų emisijų ribines vertes ir būtų išvengta technologinių deginimo problemų.

Darbo tikslas – eksperimentiškai ištirti NO_x emisijų mažinimo galimybes kūrenant biomasę.

Darbo uždaviniai:

- atlikti mokslinės literatūros analizę NO_x mažinimo taikant orų perskirstymo ir dūmų recirkuliacijos metodus;
- aprašyti eksperimentinių tyrimų įrenginį;
- parengti eksperimentinių tyrimų atlikimo ir duomenų apdorojimo metodiką;
- atlikti eksperimentinius tyrimus ir apdoroti matavimų duomenis, parengti grafines priklausomybes;
- parengti tyrimų išvadas ir rekomendacijas;
- apiforminti magistrinį baigiamąjį darbą.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Nacionalinis oro taršos mažinimo planas

Europos Parlamento ir Tarybos direktyva (ES) 2016/2284 parengtas nacionalinis oro taršos planas, tai yra pagrindinis teisės aktas Lietuvoje, nusakantis išmetamų teršalų mažinimą. Šioje direktyvoje aprašomi įsipareigojimai, kuriuos Lietuva turėjo pasiekti iki 2020m. ir turi pasiekti iki 2030m. Dokumento tikslas – pasiekti tokį oro kokybės lygį, dėl kurio nesusidarytų didelis neigiamas poveikis ir pavojus žmonių sveikatai ir aplinkai [3].

Norint pasiekti oro taršos mažinimo tikslų, oro kokybės gerinimo ir neigiamo poveikio žmonių sveikatai bei gyvybei ir ekosistemoms mažinimo, nurodomi pagrindiniai Lietuvos sektoriai, kurių taršą būtina mažinti. Tarp svarbiausių sektorių patenka pramonės, žemės ūkio, energetikos, transporto ir namų ūkių sektoriai.

Šis dokumentas įpareigoja Europos valstybes mažinti teršalų išmetimo į aplinką kiekius. Teršalai bei jų kiekiai, kuriuos direktyva įpareigoja mažinti yra SO₂, NO_x ir NMLOJ (ne metaniniai lakieji organiniai junginiai) nurodyti pirmoje lentelėje. Taip pat dokumentas įpareigoja mažinti NH₃ bei KD (kietąsias daleles), 2 lentelė.

1 lentelė. Nacionaliniai išmetamųjų teršalų kiekio mažinimo įsipareigojimai [3].

Valstybė narė	Sumažintina SO ₂ dalis, palyginti su 2005 m.		Sumažintina NO _x dalis, palyginti su 2005 m.		Sumažintina NMLOJ dalis, palyginti su 2005 m.	
	Bet kuriais metais nuo 2020 m. iki 2029 m.	Bet kuriais metais nuo 2030 m.	Bet kuriais metais nuo 2020 m. iki 2029 m.	Bet kuriais metais nuo 2030 m.	Bet kuriais metais nuo 2020 m. iki 2029 m.	Bet kuriais metais nuo 2030 m.
Estija	32 %	68 %	18 %	30 %	10 %	28 %
Latvija	8 %	46 %	32 %	34 %	27 %	38 %
Lietuva	55 %	60 %	48 %	51 %	32 %	47 %

2 lentelė. Įsipareigojimai amoniako ir kietųjų dalelių mažinimui [3].

Valstybė narė	Sumažintina NH ₃ dalis, palyginti su 2005 m.		Sumažintina KD _{2,5} dalis, palyginti su 2005 m.	
	Bet kuriais metais nuo 2020 m. iki 2029 m.	Bet kuriais metais nuo 2030 m.	Bet kuriais metais nuo 2020 m. iki 2029 m.	Bet kuriais metais nuo 2030 m.
Estija	1 %	1 %	15 %	41 %
Latvija	1 %	1 %	16 %	43 %
Lietuva	10 %	10 %	20 %	36 %

1.2. Teršalų susidarymas deginant biokurą

Apžvelgiamas teršalų susidarymas biokurą deginančiuose katiluose. Visame pasaulyje labai paplitęs ekologiškas ir atsinaujinantis energijos šaltinis – biomasė, pastaruoju metu šio energijos šaltinio panaudojimas įgauna vis svarbesnį vaidmenį. Biomasės deginimo technologijos ir taršos mažinimo metodai sparčiai tobulėja visame pasaulyje, tam padeda ilgametė akmens anglies deginimo patirtis ir sukauptos žinios [4]. Mechanistiniai tyrimai, paremti anglies deginimo principais, gali padėti iš dalies paaiškinti teršalų ir pelenų susidarymą, jų nusėdimą bei katilo koroziją, atsirandančią deginant biomasę. Biokuras pasižymi skirtingomis cheminėmis ir fizikinėmis savybėmis, kurios daro įtaką degimo valdymui ir teršalų emisijų susidarymui bei jų išmetimui į aplinką, tai sukelia praktinių problemų katilinėms, dėl to būtina apžvelgti kokiais būdais šios emisijos susidaro.

Naudojant biokurą teršalai dažniausiai susidaro dėl dviejų veiksnių: neefektyvus kuro deginimas arba kure esantys didelis teršalų kiekis. Neefektyvus kuro degimas gali kilti dėl vietinės stochiometrijos (vietinis oro maišymasis su kuru), ne pakankamai aukšta arba per aukšta degimo temperatūra, degimo produktai tam tikrose zonose išbūna per ilgai arba per trumpai [5]. Susidarantys teršalų emisijas galima išskaidyti į dvi kategorijas: viena – dėl nepilno sudegimo arba oksidacijos proceso, kita – dėl biomasėje esančių neorganinių elementų [6]. Kategorijos aprašomos 1 lentelėje.

3 lentelė. Susidarantys teršalai deginant biomasę [4].

Būdingas kuras	Šaltinis	Teršalų emisijos
I kategorija: teršalai atsirandantys dėl degimo proceso		
Visa biomasė	Nepilnas sudegimas	CO, C _x H _y , KD, dervos
Visa biomasė	Oksidacija	NO _x , N ₂ O
II kategorija: atsirandantys teršalai dėl biomasėje esančių neorganinių elementų		
Visa biomasė	Pelenai	KD
Medienos, augalų atliekos, šiaudai	Cl ir S	HCl, SO _x , druskos (KCl ir kt.)
Medienos, javai, šiaudai ir kt.	Aukšta Cl frakcija	Dioksinai ir furanai (PCDD ir PCDF)
Baldinės medienos atliekos, dumblas	Sunkieji metalai	Pb, Zn, Cd, Cu, Cr, Hg ir kt.

1.3. Azoto ir sieros oksidų susidarymas degant biokurui

Bendras terminas azoto oksidams yra NO_x , su degimo produktais į aplinką išmetami ir šie oksidai. Naudojant biokurą, kurio sudėtyje yra azoto, jam degant susidaro azoto oksidas (NO), azoto dioksidas (NO_2) ir diazoto oksidas (N_2O). Azoto oksidų dažniausiai yra pateikiama, kaip konvertuota azoto dioksido vertė, didesnė dalis kaip 95% azoto oksidų į aplinką išmetami NO pavidalu [5]. Didžiausia dalis NO susidaro esant degimui pakuroje, o patekę į aplinką oksiduojasi su ore esančiu deguonimi (O_2) arba ozonu (O_3) ir sudaro azoto dioksidą NO_2 [7].

Degimo kameroje susidarantis azoto oksidas yra labai sudėtingas procesas, kuris dar nėra iki galo ištirtas. Dabartinėmis žiniomis pagal reakcijos terpę ir azoto šaltinį galima išskirti tris būdus NO susidarymui [8]:

1. Terminių azoto oksidų susidarymas – esant aukštesnėms nei 1250°C temperatūroms.
2. Greitųjų azoto oksidų susidarymas – susidaro kai azoto atomas reaguoja su nevisiško degimo angliavandenilių radikalais.
3. Kuro azoto oksidų susidarymas – priklauso nuo elementinio azoto kiekio kuro sudėtyje bei oro pertekliaus koeficiento.

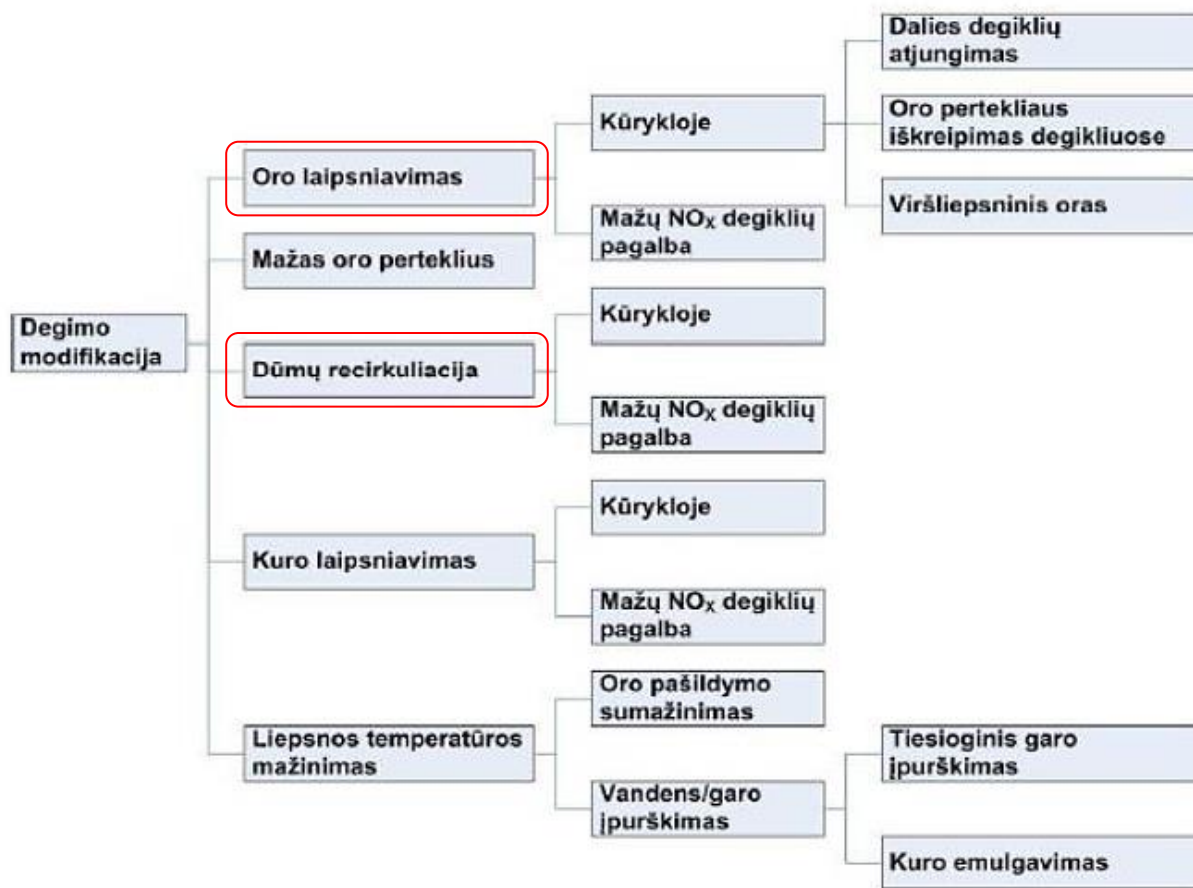
Sieros oksidų susidarymas nuo degimo proceso nepriklauso, dėl to net ir idealiai suderintam degimo režimui, šie oksidai susidaro, kuomet didesnė sieros koncentracija deginamame kure tuo didesnė sieros oksidų koncentracija. Siera išsiskiria, tuo metu, kai iš kuro skiriasi lakiosios medžiagos [5]. SO_x teršalai išsiskiria, kai dega kure esanti sieros arba jos junginiai – H_2S . Didžioji dalis sieros masės oksiduojasi į SO_2 , likusioji į SO_3 . Priimta, kad SO_2 koncentracija priklauso nuo sieros kiekio kure, nepriklauso nuo kitų procesų ar temperatūros. Esant aukštesnei nei 1300°C temperatūrai susidaro maksimali SO_3 koncentracija. Be to SO_3 susidarymo kiekis priklauso nuo degimo produktuose esančio deguonies ir jų temperatūros, priklausomybė nuo jų yra panaši į NO_x atvejį. Naudinga žinoti, kad SO_3 kiekis ir nedidelis palyginti su SO_2 , bet jis daro didelį neigiamą poveikį katilinėms, tiksliau jų veiklai, kadangi susidaro sieros rūgštis (H_2SO_4). Tai sukelia šilumos paviršių koroziją, ypač, kai dūmų temperatūra nukrenta žemiau sieros rūgšties rasos taško, kuris priklauso nuo to kokia sieros koncentracija yra biokure.

1.4. Priemonės teršalams mažinti

Šių teršalų (azoto ir sieros oksidų) koncentracijos yra griežtai reglamentuojamos, dėl to būtina vengti jų susidarymo – imtis pirminių priemonių, arba antrinių priemonių ir jas šalinti iš išmetamųjų dujų. Antrinės priemonės nėra ekonomiškai mažoms įmonėms, todėl dažniausiai naudojamos tik pirminės priemonės.

1.4.1. Pirminės azoto oksidų mažinimo priemonės

Norint sumažinti NO_x kiekį išmetimuose naudojama įvairios technologijos ir sprendimai [29]. Pirminės NO_x emisijų mažinimo priemonės yra instaliuotos į kuro deginimo sistemą, ko pasekoje NO_x kiekis jau yra mažinamas degimo metu. Šios priemonės skirtos keisti degimo parametrus katilėse tam, kad mažintų azoto oksidų susidarymą kuro degimo metu ir redukuotų jau susidariusius NO_x į elementinį azotą prieš jiems išeinant iš katilo [9].



1 pav. Pirminiai NO_x emisijų mažinimo būdai [9].

Oro laipsniavimas – tai metodas, kuris pagrįstas dviejų atskirų degimo zonų sukūrimu. Pirmoje degimo zonoje sudaromas deguonies trūkumas, o antroje – oro perteklius, norint užtikrinti pilną kuro sudegimą [9].

Mažas oro perteklius – šį būdą ganėtinai paprasta įgyvendinti. Degimo zonoje reikia sumažinti deguonies kiekį iki minimalaus kiekio, kurio reikia visiškam degimui užtikrinti. Tokiu būdu sumažėja azoto esančio kure transformacija į NO_x bei terminius NO_x [9,10].

Dūmų recirkuliacija – sugražinant atšalusius degimo produktus į kūryklą, sumažinamas deguonies kiekis degimo zonoje ir tuo pačiu metu atšaldomas fakelas. Šiuo būdu pristabdomas kure esančio azoto oksidavimasis ir sumažėja terminių azoto oksidų susidarymas.

Kuro laipsniavimas – kuras sudega per kelis etapus, deginama pakopomis tiekiant kurą ir degimui reikalingą orą. Pirmoje pakopoje susidarantys azoto oksidai reaguoja su sekančioje pakopoje tiekiamu kuru ir jame esančiais angliavandeniliais radikalais [11].

Liepsnos temperatūros mažinimas – temperatūra mažinama įpurškiant vandens ar garo [12].

1.4.2. Antrinės azoto oksidų mažinimo priemonės

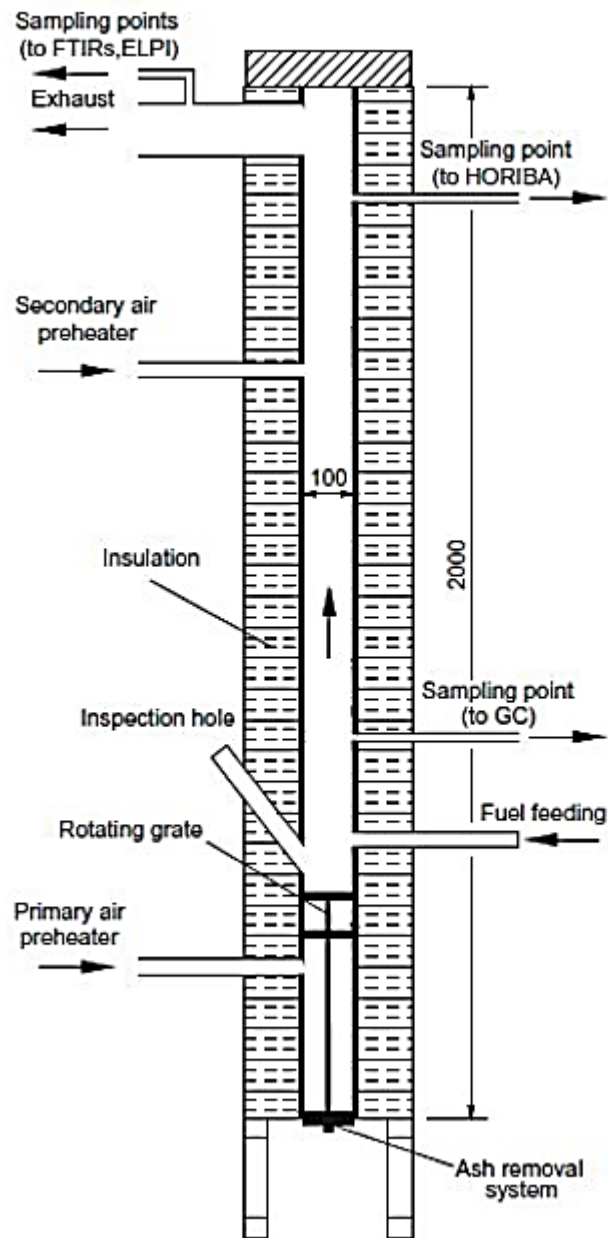
Šios priemonės naudojamos jau susiformavusiems azoto oksidams pašalinti iš degimo produktų. Antrinės azoto oksidų mažinimo priemonės yra brangios, bet efektingos ir dažnu atveju būtinos, ypač įmonėms deginančioms daug kuro. Naudojami įvairaus tipo dujų valymo įrenginiai 2 pav.



2 pav. Degimo produktų valymo įrenginių klasifikavimas [13].

1.5. NO_x emisijų mažinimas pakopinio degimo būdu

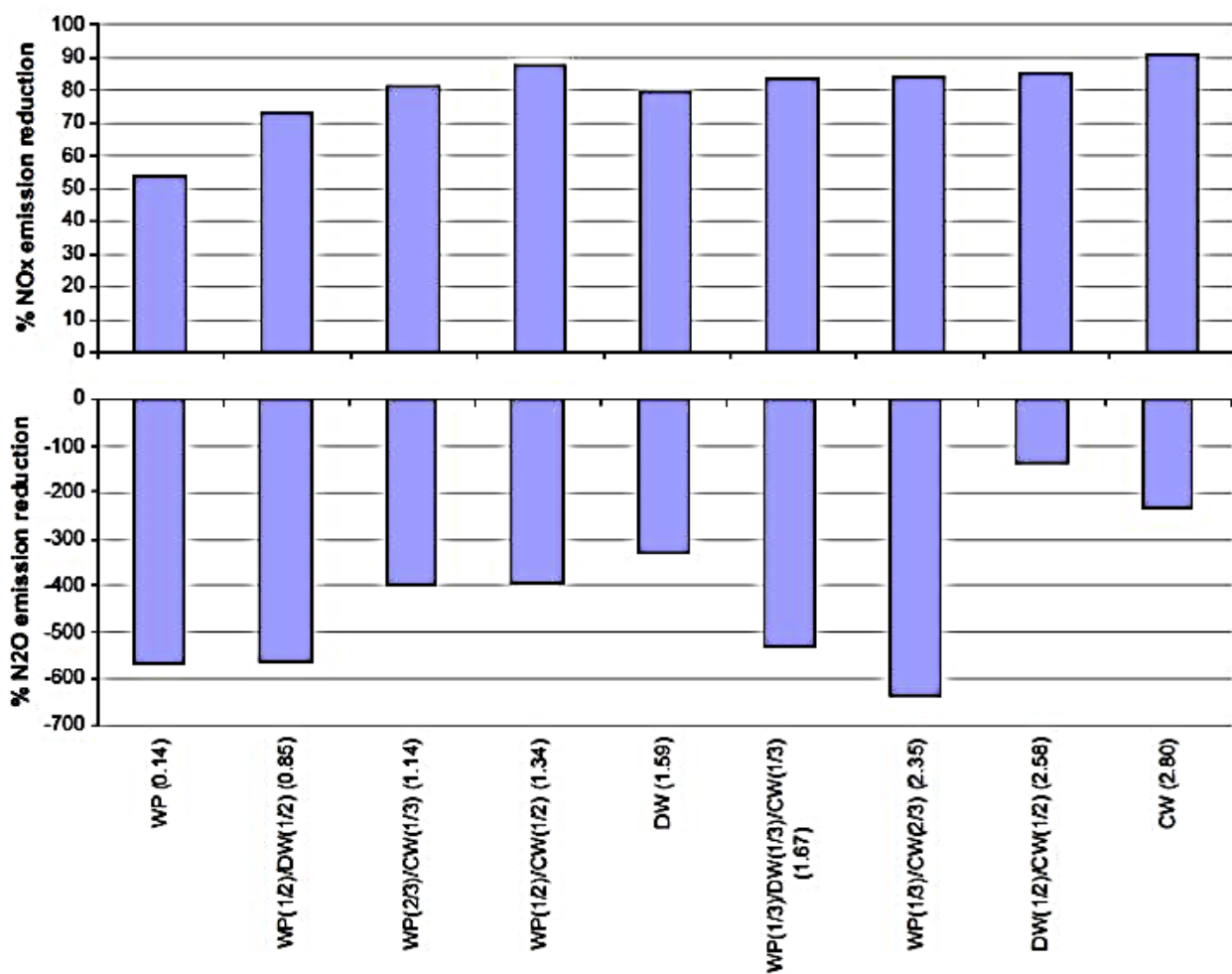
Dviejuose tų pačių autorių publikacijose [14] ir [15] buvo tiriama NO_x ir N₂O emisijų išmetimas naudojant skirtingos biomasės kurus granulių pavidalu. Tiriama buvo su oro laipsniavimu ir be jo, ardyniniame kelių kūrų reaktoriuje. Tiriamieji kurai buvo miško mediena, statybinių atliekų mediena, kavos atliekos ir visų šių išvardintų kūrų mišinys. Eksperimentai buvo atliekami aukštatemperatūriniame daugiakuriame reaktoriuje 3 pav., kurio galia yra 16 kW. Šis daugiakuras kaitinamas naudojant elektros energiją. Reaktoriaus viduje yra 100 mm skersmens ir 2 m ilgio keraminis vamzdis. Šį vamzdį sudaro du keraminiai vamzdžiai kurių ilgis yra po 1 m. Vamzdžiai yra sudaryti iš neporinio nekatalitinio aliuminio. Prieš patenkant orui į reaktorių jis yra pašildomas išoriniais pašildytuvais iki reaktoriaus temperatūros [27]. Po ardynu nukreipiamas pirminis oras, o virš ardyno antrinis. Yra dveji skaitmeniniai masės srautų valdikliai, kurie skirti kontroliuoti oro srautą.



3 pav. Eksperimentinio stendo brėžinys [14]

Bandymų metu reaktorius eksploatuotas beveik pastoviomis sąlygomis, oro pertekliaus koeficientas buvo apie 1,6, o pirminio oro apie 0,8, tai reiškia, jog pirminėje zonoje degimas buvo gazifikacinis [28]. Degimo produktų temperatūra buvo pastovi ir siekė 850 °C, ši temperatūra buvo palaikoma viso tyrimo metu. Šiomis sąlygomis buvo matuojami NO_x emisijų lygiai, atsižvelgiant ar oro tiekimas buvo pakopinis ar ne ir esantį azoto kiekį kure. Pritaikius pakopinį kuro deginimą gauti rezultatai parodė jog NO_x žymiai sumažėjo ir siekė net iki 91% sumažėjimą, kas atitinka mažiau kaip 20 ppm NO_x, kai deguonies koncentracija ore 11% ir kure esančio azoto kiekis yra 3%.

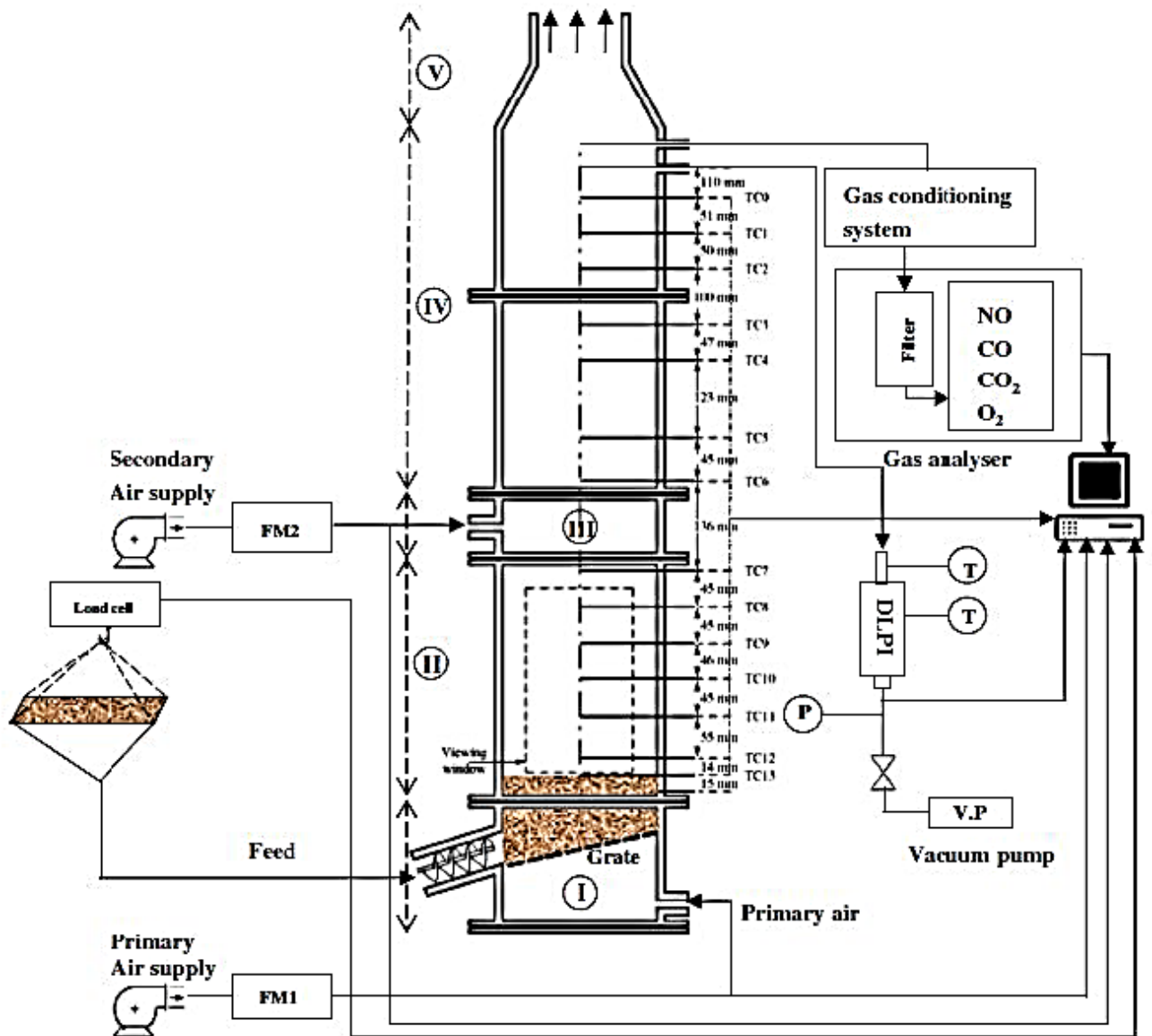
To paties tyrimo metu sekant N₂O sumažėjimą, straipsnio autoriai gavo atvirkštinį efektą, esant tokioms pat kuro degimo sąlygoms [24]. Taip pat buvo tiriama ir kuro sumaišymo efektas. Sumaišant kurus buvo siekiama sumažinti elementinio azoto kiekį bendroje kuro masėje. Šis bandymas parodė teigiamus rezultatus NO_x sumažinimui, tačiau neigiamus bendram kuro konversijos koeficientui į NO_x ir N₂O (4 pav.).



4 pav. Optimalus NO_x sumažinimo potencialas naudojant gazifikacinį pakopinį degimą, lyginant su nepakopiniu degimu ir priešingu efektu N₂O emisijų atveju optimaliu pirminio oro tiekimu NO_x mažinimui [14]

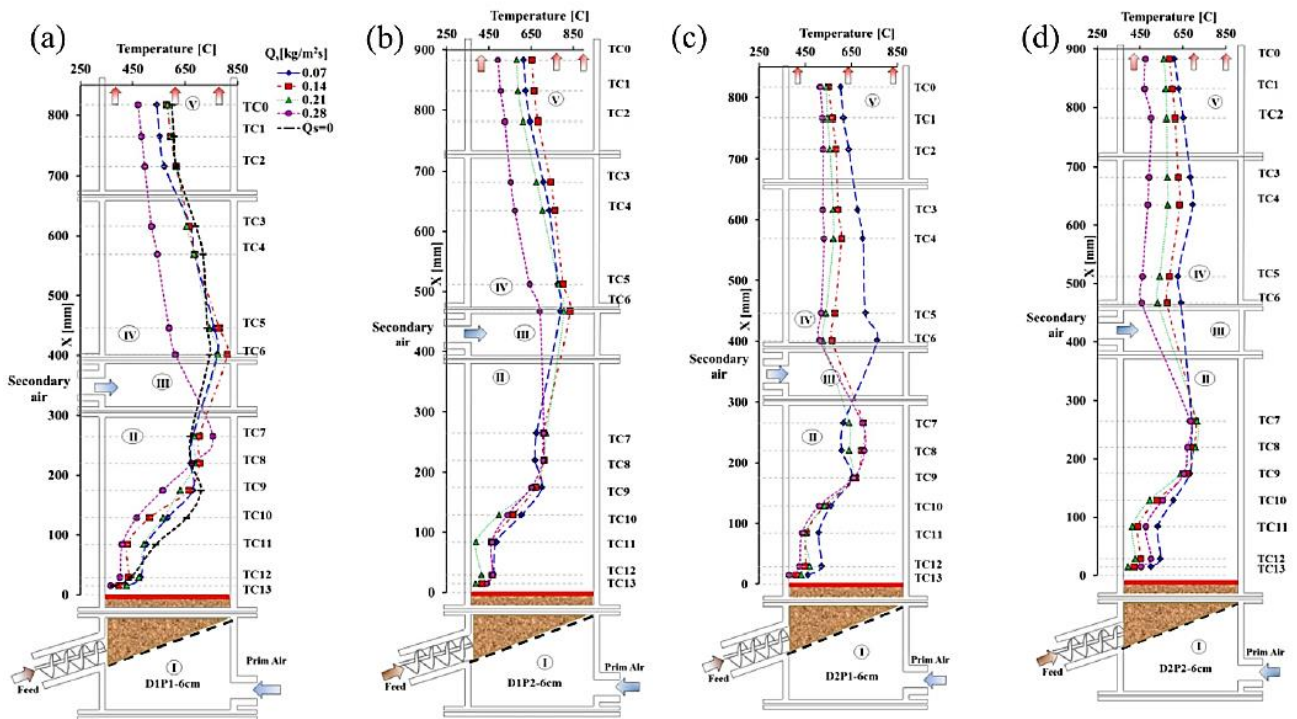
1.6. Oro laipsniavimo strategijos

Buvo atliktas tyrimas pasitelkiant įvairias oro laipsniavimo strategijas esant plačiam antrinio oro srauto diapozonui, šį tyrimą atliko H. Khoadei ir kiti bendraautoriai [16]. Tyrimo metu buvo išanalizuotos dujinių ir kietųjų dalelių emisijos. Eksperimentui atlikti buvo naudojamas laboratorinio mastelio medienos granulių deginimo įrenginys, kuriame medienos granulės tiekiamos iš apačios naudojant sraigtinę transporterį (5 pav.).



5 pav. Eksperimento laboratorinio stendo schema [16]

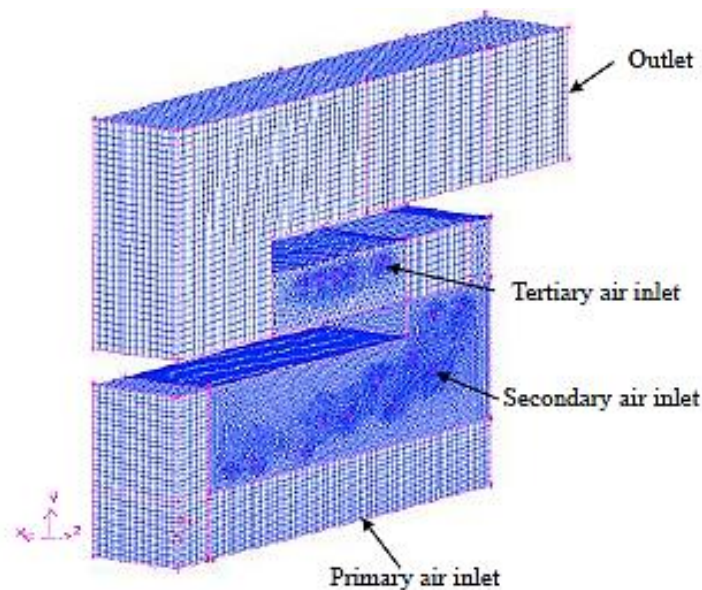
Laipsniavimo strategijos buvo panaudotos norint atlikti degimo greičio, temperatūros pirminėje zonoje ir zonoje po degimo analizę, taip pat išmatuoti NO_x , CO ir KD emisijas, priklausomai nuo degimui tiekiamo oro priklausomybių ir atsižvelgiant į oro-kuro stochiometrinį santykį. Taikant antrinio oro srauto modelį aukščiau kuro esančioje padėtyje, buvo pasiekta 50 procentų CO sumažėjimas ir 9 kartus mažesnis kietųjų dalelių kiekis, lyginant su rezultatais netaikant oro laipsniavimo. Minimalus NO_x išmetimų kiekis (sumažėjo 37%) buvo pamatuotas prie didesnio antrinio oro srauto nevienalyčio oro paskirstymo modulyje esant mažesniai atstumui iki kuro sluoksnio. Modeliavimo variantai pateikiami 6 paveiksle. Tyrimo rezultatai atskleidžia ne tik kompromisą tarp KD, NO_x ir CO išmetimų, bet ir reikšmingą galimybę sumažinti dujų ir kietųjų dalelių išmetimus taikant oro laipsniavimą granulių deginimo įrenginyje.



6 pav. Degimo produktų vidutinės temperatūros ašinis pasiskirstymas kūrkykloje pritaikius skirtingas pakopinio degimo strategijas [16]

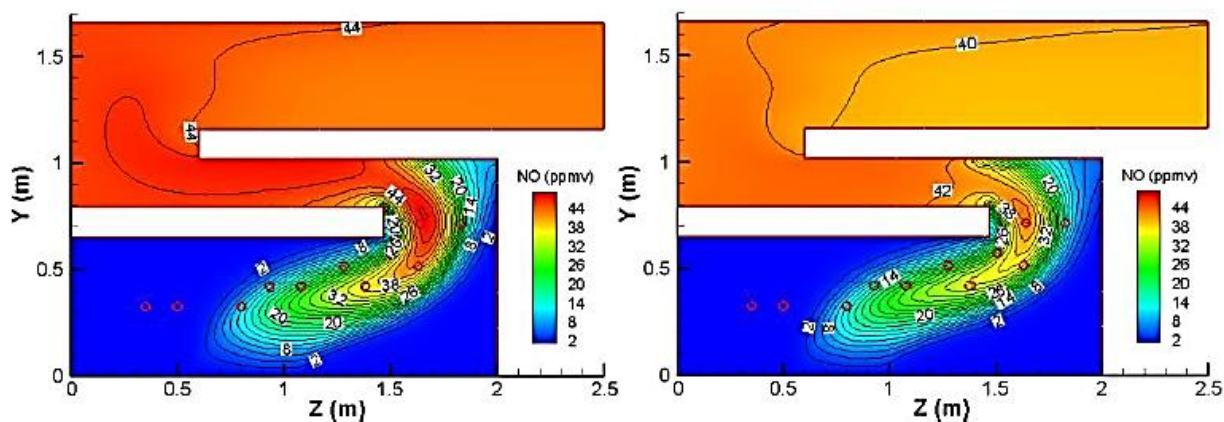
1.7. Dūmų recirkuliacijos įtaka NO_x ir CO emisijoms

Buvo atliktas tyrimas kokį poveikį turi dūmų recirkuliacija NO_x ir CO emisijoms deginant smulkintą medieną [17]. Tyrimo metu buvo modeliuojama ir matuojami realūs išmetimai esant dūmų recirkuliacijai ir be jos. Bandymai buvo atlikti naudojant 500 kW galios biokuro katilą. Katile įrengta dūmų recirkuliacijos sistema. Dalis atidirbtų dūmų grąžinama atgal į pakurą su pirminiu ir (arba) antriniu oru. Siekiant ištirti katilo poveikį teršalų emisijoms buvo sudarytas matematinis modelis (7 pav.), susidedantis iš dviejų dalinių modelių [18], vienas imituoja smulkintos medienos degimą ant judančio ardyno, o kitas dujų degimą ir srautą virš dugno [19].



7 pav. Tinklelio profilis katilo paviršiuje [17]

Atlikus tyrimą modeliavimo rezultatai gan gerai sutapo su realiais išmatuotais išmetimais. Dūmų recirkuliacija sumažino išmetamo NO_x kiekį, tačiau labai padidino išmetamo CO kiekį. Dūmų recirkuliacija taip pat sumažina pakuros temperatūrą, taip suteikia ilgaamžiškesnę pakuros eksploatavimą.



8 pav. Azoto oksidų pasiskirstymas pakuroje, kairėje pusėje be dūmų recirkuliacijos, dešinėje pusėje su [17]

Taikomi matematiniai metodai yra patikimi tiriant degimo ir šilumos perdavimo procesus judančio sluoksnio katile ir prognozuojant išmetamųjų dujų emisijas [25]. Dėl didelio drėgmės kiekio biokure iš katilo išmetamas palyginti didelis CO kiekis. Dūmų recirkuliacijos maišymasis su pirminiu oru sumažina temperatūrą degimo kameroje ir terminio NO_x susidarymą [30]. Siekiant mažesnio išmetamųjų dujų kiekio, taip pat reikia toliau optimizuoti pirminio ir antrinio oro srovių paskirstymą.

2. Tyrimo metodika

Tyrimas buvo atliekamas naudojant 3 biomasės rūšis (saulėgrąžų lukštų granules, smulkintą pušų žievę ir medienos granules). Buvo sudaromos tam tikros degimo sąlygos, keičiant pirminio ar antrinio orų padavimo vietas, prijungiant dūmų recirkuliaciją į pirminį ar antrinį orus ir keičiant deguonies koncentraciją šių orų ir DR mišinyje ir atliekami matavimai prie pakeistų degimo sąlygų. Tyrimo metodika pasinaudota iš [23] šaltinio, ten ji aprašoma detaliau.

2.1. Medienos degimo specifika

Medienos kuras turi daug angliavandenilių, kurie įkaitus kurui skyla į 75–85% lakiąsias medžiagas (dujas) ir apie 15–20% kietąjį likutį (medžio anglį bei kietąsias organines ir neorganines medžiagas). Lakiųjų medžiagų degimas vyksta degimo kameros erdvėje, o koksas dega ant ardyno. Medienos kuro degimas susideda iš šių etapų:

I etapas. Patekęs į pakurą kuras kaista. Kuro masė kaista iki vandens garavimo temperatūros;

II etapas. Intensyvaus džiūvimo etapas (jei kuras yra drėgnas). Šiame etape iš kuro gausiai išsiskiria vandens garai, kurie sunaudoja dalį šilumos, todėl kuro temperatūra stabilizuojasi ir išlieka beveik pastovi. Jei kuras yra sausas, šiame etape jau prasideda lakiųjų medžiagų išsiskyrimas;

III etapas. Lakiųjų medžiagų išsiskyrimas – pirolizė. Šioje zonoje didžioji dalis vandens jau yra pašalinta, kuro temperatūra kyla, ir prasideda lakiųjų medžiagų (degiųjų dujų) išsiskyrimas.

IV etapas. Kietojo likučio – kokso degimas. Kad koksas pradėtų degti, reikia aukščiausios temperatūros, ir jo degimas trunka palyginti ilgai, todėl jo degimo zona yra ardyno pabaigoje.

Jei degimas vyksta „karštoje“ kūrykloje, t. y. kūryklos sienos yra padengtos mūru, betonu ar keramika, liepsna išlieka karšta (nes nėra aušinama), ir didžioji dalis angliavandenilių sudega iki galutinių produktų – CO₂ ir H₂O. Taip pat svarbu, kad degimo produktai pakankamai ilgai išliktų aukštoje temperatūroje, kad šios degimo reakcijos galėtų visiškai įvykti.

Pagal kuro sudeginimo parametrus ir energetinį efektyvumą, galima būtų išskirti 3 iš esmės besiskiriančius medienos kuro deginimo katiluose būdus:

- pramoniniai katilai;
- buitiniai mažos galios ir panašios konstrukcijos kiek didesnės galios granuliniai katilai;
- buitiniai ir į juos panašūs nedidelės galios periodinio veikimo katilai, kuriuose kuras deginamas ant nejudančių ardelių.

Pramoniniams katilams būdinga tai, kad degimas vyksta daugiau ar mažiau pastoviu režimu: kuras yra beveik nuolat tiekiamas, oras degimui tiekiamas pastoviai, o ardelių judinimas užtikrina nuolatinį degančio kuro sluoksnio perstūmimą link ardyno pabaigos, tuo pačiu sujudinant degančio kuro sluoksnį. Kūryklos sienos padengtos mūru ar kitomis medžiagomis, todėl degimo zonoje temperatūra yra aukšta, o degimo produktų kelias ilgas. Dėl šių priežasčių pramoniniuose katiluose pasiekiamas geras ir pilnas kuro sudegimas, o degimo režimas yra gana stabilus su nedideliais svyravimais. Be to, pramoninius katilus įprastai prižiūri kvalifikuotas personalas, o teršalų emisijos periodiškai tikrinamos.

Granuliniai katilai, nors ir gali ženkliai skirtis savo konstrukcija, tačiau turi bendrų savybių, kurios daro juos panašius į pramoninius katilus:

pirma, tai degimo kamera būna „šalta“ – sienelės aušinamos vandeniu, todėl degimo temperatūra nėra aukšta;

antra – degimo produktų kelias liepsnos temperatūroje trumpesnis;

trečia – šiems katilams būdingas veikimo periodiškumas – kuras įstumiamas sraigtu per kelis ar keliolika sekundžių ir toliau minutę ar keletą minučių nebetiekiamas, o oras degimui tiekiamas visą laiką vienodai;

ketvirta – kuro sluoksnis nejudinamas arba judinamas retai. Todėl kuro sudegimas nėra toks geras kaip pramoniniuose katiluose, o degimo produktų sudėtis yra kintanti, nepastovi – tai daugiau nesudegimo (tarpinių degimo) produktų (mažiau perteklinio deguonies), tai mažiau (deguonies koncentracija padidėja).

Malkinę medieną ekonomiškiausia ir švariausia deginti gazifikaciniu principu veikiančiuose katiluose. Čia kuras deginamas 2 etapais – pirmoje kameroje kuras dega su oro trūkumu, gaminasi degios dujos, kurios antroje kameroje (čia paduodant antrinį orą) švariai sudega. Tokių katilų pagrindinis trūkumas – tinka tik gerai išdžiovintos malkos arba medienos briketai. Tokie katilai brangūs, naudojantys tik aukštos kokybės kurą, todėl jie Lietuvoje nėra labai paplitę.

2.2. Tyrimų standai

Eksperimentiniai tyrimai atlikti Kauno technologijos universiteto Šilumos ir atomo energetikos katedros Degimo procesų laboratorijoje ir UAB „Enerstenos“ 20 kW galios tyrimų stenduose. Abu standai yra sumažintos pramoninio katilo versijos. Standai tarpusavyje iš esmės skiriasi tik ardymo ilgiu ir papildomu aukštos temperatūros ruožu. Pastarasis instaliuotas tik UAB „Enerstenos“ tyrimų stende.

2.2.1. KTU degimo procesų laboratorijos standas

Degimo tyrimų standas pagamintas pagal pramoninių biokuro katilų pavyzdį ir yra pramoninių katilų veikiantis maketas. Standą pagamino pramoninių biokuro katilų gamintoja UAB „Enerstena“ (9 pav.).

Biokuro kūrykla aprūpinta sraigtinio kuro maitintuvu, pasvirusiu judinamu ardymu su greičio reguliavimo sistema, pirminio ir antrinio oro tiekimo degimui ventiliatoriais, dūmų šalinimo ventiliatoriumi su automatine traukos palaikymo sistema. Kūrykloje įrengtas apžiūros langas degimo procesui stebėti.

Kuro padavimui į kūryklą naudojamas sraigtas, kurį suka variklis su reduktoriumi ir dažnio keitikliu, todėl kuro tiekimas yra nuolatinis ir pastovus. Kuras tiekiamas iš 50 l bunkerio (10 pav.).

Iš pakuros pelenai išstumiami kūryklos apačioje esančiais skreperiais į pelenų dėžę.

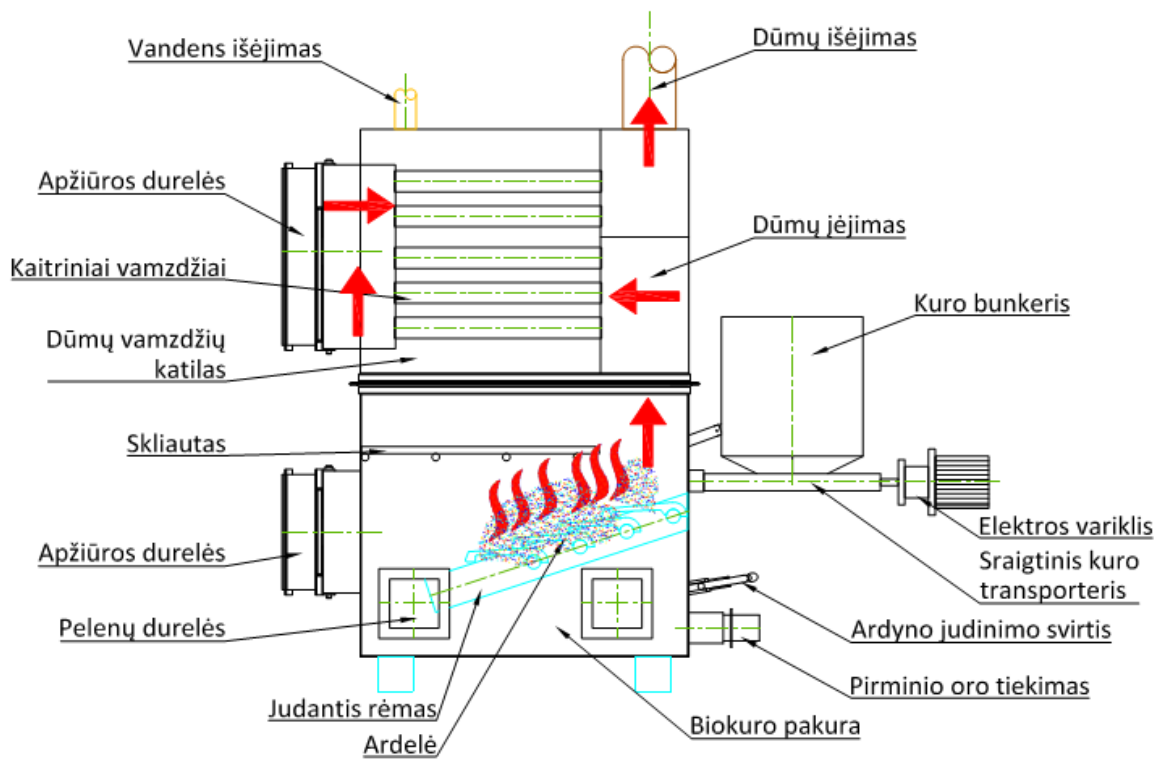
Katilo su kūrykla pjūvis pavaizduotas 11 paveiksle bei jo veikimo schema 12 paveiksle.



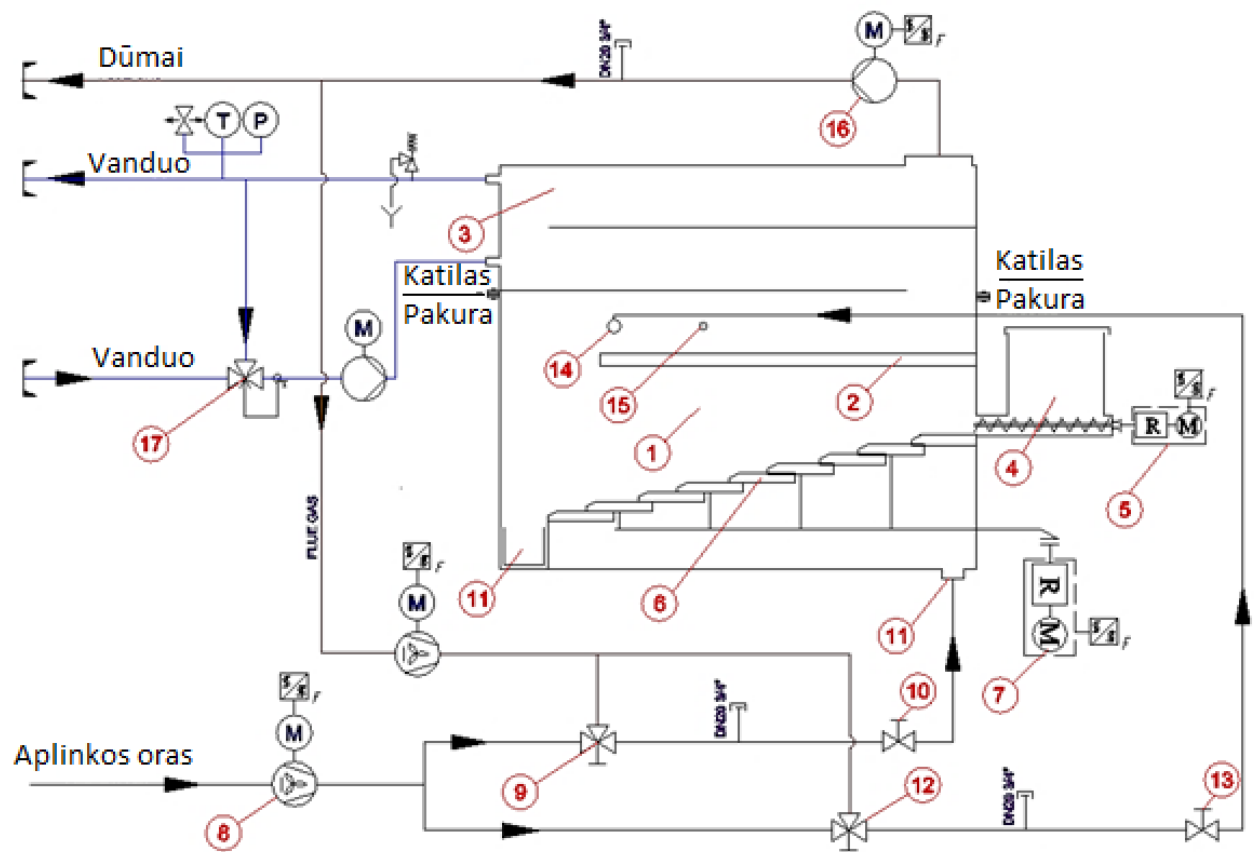
9 pav. KTU degimo procesų laboratorijos tyrimų stendas



10 pav. Kuro bunkeris su kuro padavimo į pakurą sraigtu



11 pav. Katilo su kūrykla pjūvis



12 pav. Biokuro katilo – modelio veikimo schema [21]

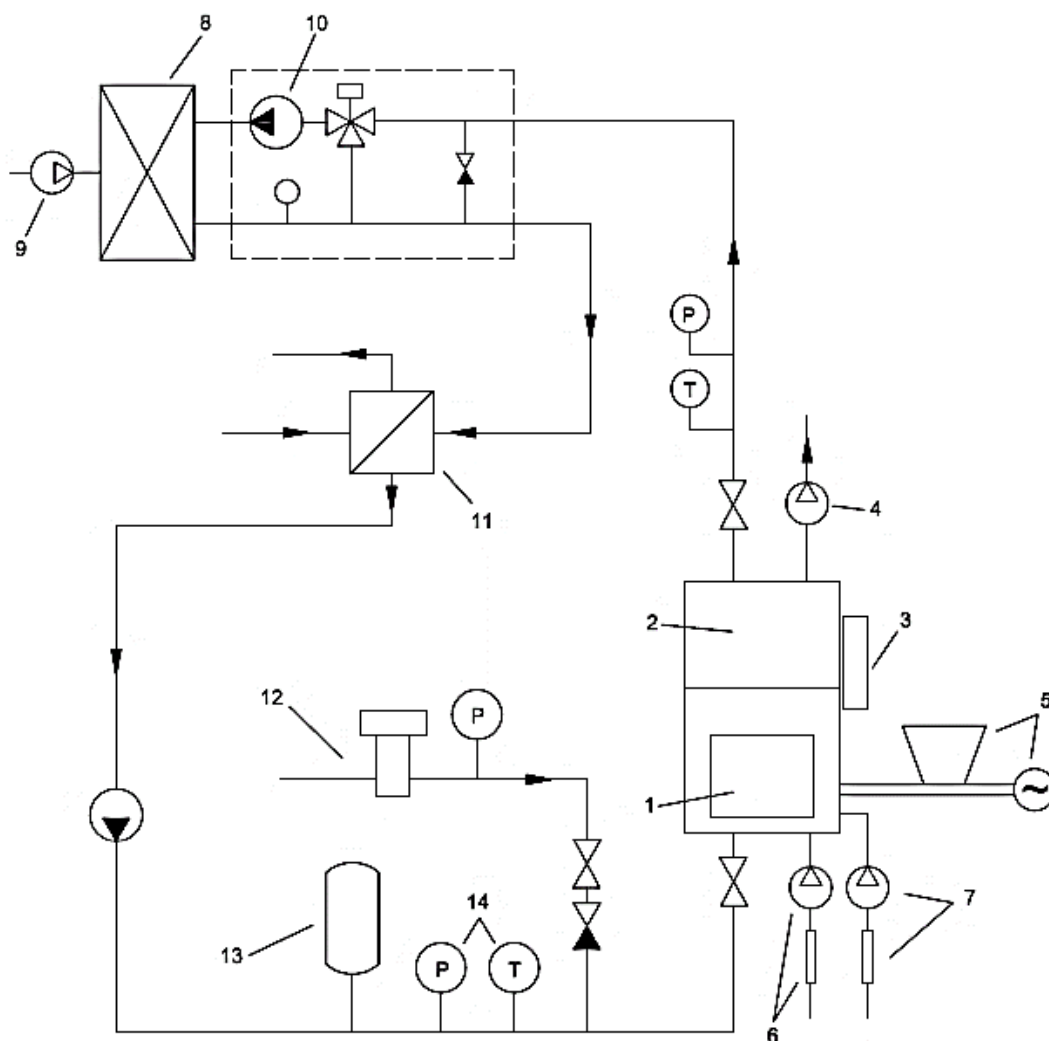
1 – šamoto sienų pakura, 2 – pakuros skliautas, 3 – katilas, 4 – kuro bunkeris, 5 – mechaninė sraigtinė pavara su dažnio keitikliu, 6 –judantis ardynas, 7 – ardyno judinimo mechaninė pavara su dažnio keitikliu, 8 – oro padavimo ventiliatorius su dažnio keitikliu, 9 – pirminio oro ir dūmų sumaišymo trieigis ventilis, 10 – pirminio oro debito reguliavimo sklendė, 11 – pirminio oro padavimo vieta, 12 – antrinio oro ir dūmų sumaišymo trieigis ventilis, 13 – antrinio oro debito reguliavimo sklendė, 14 – antrinio oro padavimo vieta, 15 – priedų įpurškimo vieta, 16 – dūmsiurbis, 17 – trieigis vožtuvas katilo vandens pamaišymui.

Šioje pakuroje galima deginti įvairias biokuro rūšis – skiedras, granules, kitas rūšis, kurų kurio maksimalūs matmenys iki 2–3 cm.

Vandens šildymo katilas – plieninis, jame yra horizontalūs vamzdžiai. Pagrindiniai katilo techniniai rodikliai:

- Maksimali galia – 30 kW;
- Nominali galia – 17 kW;
- Darbinis katilo vandens slėgis – 2 bar;
- Darbinė temperatūra – iki 95 °C;
- Minimali įtekančio į katilą vandens temperatūra – 60 °C.

Visas biokuro degimui reikalingas oras gali būti atskirai valdomas ventiliatoriais, o pirminis oras tuo pačiu aušina ardyną. Pirminis oras tiekiamas po ardynu ir per ardelių plyšius patenka į kuro sluoksnį, užtikrindamas reikiamą oro kiekį kuro sudegimui. Antrinis oras tiekiamas į degimo zoną virš ardyno per specialias angas, siekiant tinkamai sumaišyti ir sudeginti biokuro degimo metu išsiskiriančias dujas – lakiuosius komponentus. Kuras iš bunkerio tiekiamas į pakurą sraigto pagalba pagal nustatytą poreikį, kuris reguliuojamas valdymo spintoje. Kuras yra stumiamas ant laiptuoto, mechaniškai judinamo ardyno, kur vyksta degimo procesas. Pakuroje sudegus kurui, likę pelenai krenta į apačioje įrengtas talpas, kurias galima lengvai ištraukti ir pašalinti likutinius degimo produktus – pelenus.



13 pav. KTU laboratorijos katilo principinė veikimo schema

1 – pakura su įstiklintomis durelėmis; 2 – virš pakuros įrengtas katilas (šilumokaitis); 3 – katilo valdymo skydas; 4 – ventiliatorius, skirtas palaikyti išmetamų dūmų trauką; 5 – kuro padavimo sistema; 6 – pirminio oro tiekimo ventiliatorius su srauto matavimo ruožu; 7 – antrinio oro tiekimo ventiliatorius su srauto matavimo ruožu; 8 – sistemos vandens aušinimo kaloriferis; 9 – kaloriferio oro ventiliatorius; 10 – cirkuliacinis siurblys; 11 – plokštelinis šilumokaitis papildomam aušinimui ir į katilą tiekiamo vandens tikslios temperatūros palaikymui; 12 – sistemos papildymas su vandens filtru; 13 – išsiplėtimo indas; 14 – įvairūs technologiniai matavimo prietaisai, šilumos skaitiklis ir kt.

2.2.2. UAB „Enerstenos“ kuro tyrimų laboratorijos tyrimų stendas

Nepaisant naujojo tyrimų stendo patobulinimų, šie stendai išlaiko konstrukcinius ryšius ir veikia pagal panašų principą kaip pramoninės pakuros. Juose įrengti technologiniai elementai leidžia sukurti pramoninio judančio ardymo katilams būdingas degimo sąlygas, tokias kaip dviejų pakopų degimo kamera su temperatūra nuo 750 iki 1100 °C, atskirai reguliuojamus pirminio ir antrinio oro kiekius, stabilią trauką pakuroje, reguliuojamu ardymo greičiu ir kuro tiekimu. Kuro tiekimo, ardymo judinimo ir traukos ventiliatorių našumas valdomas dažnio keitikliais. Išretėjimas pakurose palaikomas automatikos priemonėmis ir nepriklauso nuo degimui tiekiamo oro ir recirkuliuojamų dūmų kiekio, todėl oro pasiurbimo į pakurą įtaka degimo produktų sudėčiai yra eliminuojama esant skirtingiems degimo režimams. Adiabatinės pakuros leidžia pasiekti aukštas degimo temperatūras, būdingas pramoninėms biokuro katilų pakuroms, todėl abiejuose tyrimų stenduose gauti rezultatai gali būti lyginami su pramoninių katilų rezultatais.

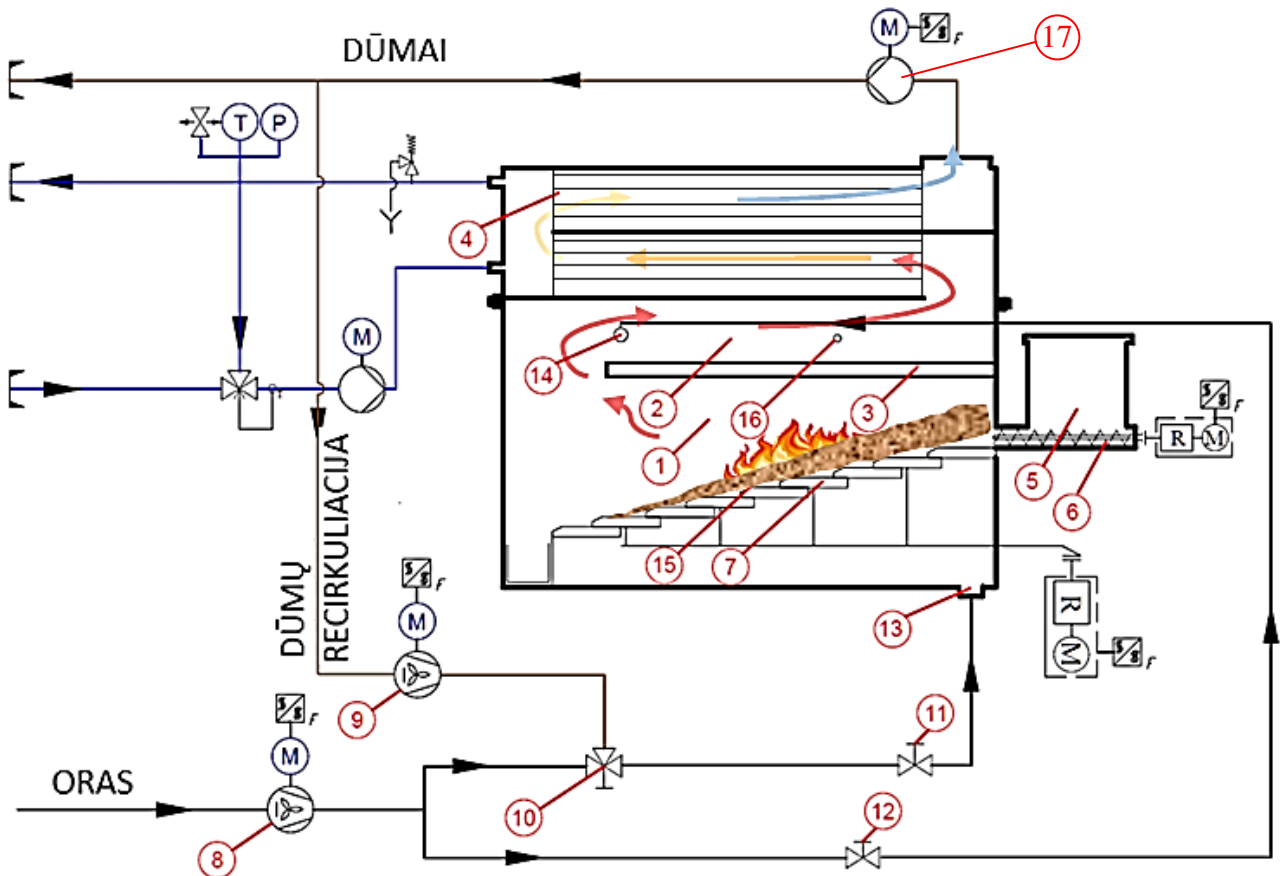


14 pav. UAB „Enerstenos“ laboratorijos tyrimų stendas [20]

Reaktoriuje ir pakuroje įrengtos angos skirtos degimo produktų sudėties matavimui bei oro, recirkuliacinių dūmų ir reagentų tiekimui į skirtingas kūryklos vietas.

Principinė abiejų standų schema pavaizduota 15 paveiksle. Biokuras į pakurą tiekiamas iš kuro bunkerio (5), sraiginiu velenu (6). Kurui patekus ant laiptuoto mechanškai judinamo ardyno, pradedamas degimo procesas. Ardynas yra sudarytas iš judamų ir nejudamų laiptuotai žemyn sudėtų ardelių eilių (7). Kas antra ardelių eilė judėdama stumia į priekį kuro sluoksnį. Tarp ardelių įrengtos oro angos, kurios skirtos pirminio oro pritekėjimui ir degimo palaikymui kuro sluoksnyje ir virš jo.

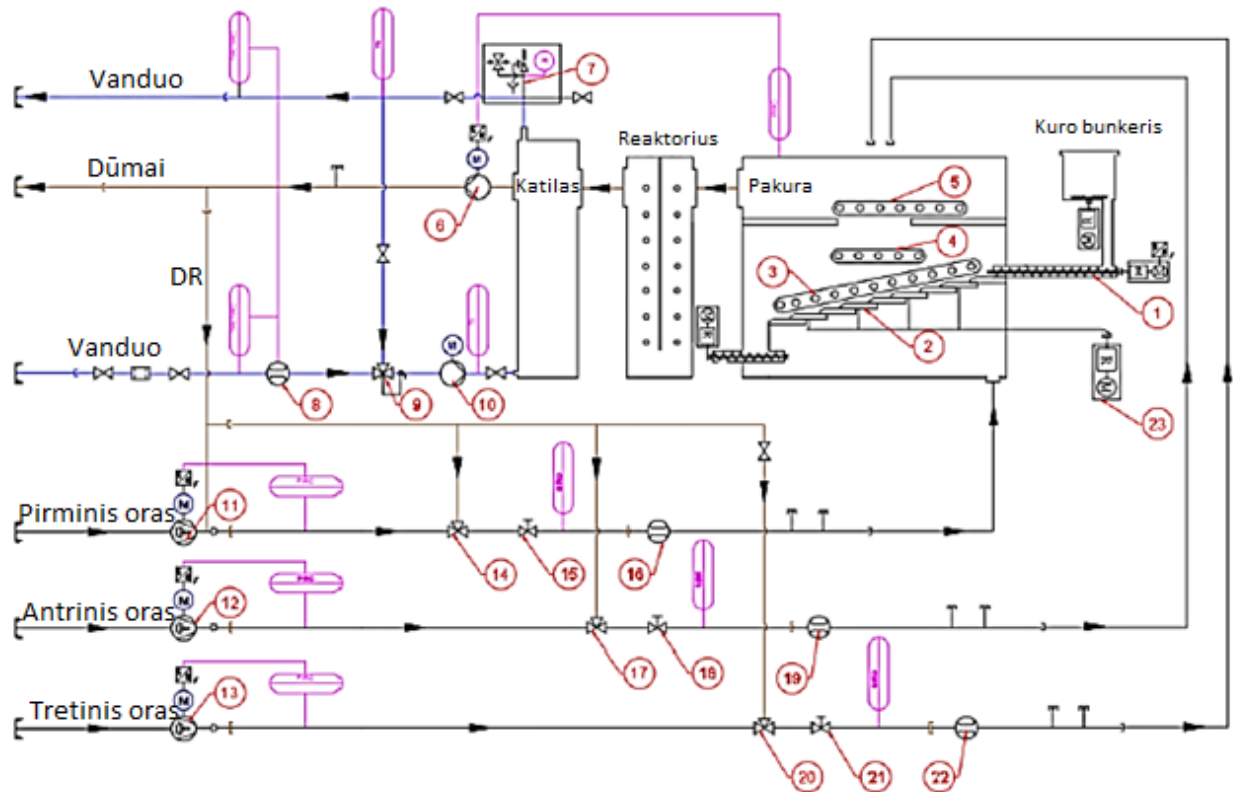
Patekus biokurui ant ardyno, jame esanti vandens dalis sušyla ir prasideda intensyvus garavimas. Dėl ypač didelės vandens specifinės garavimo šilumos sunaudojama dalis šiluminės energijos. Sekančiame etape prasideda lakiųjų medžiagų išsiskyrimas, vyksta degimas. Susidariusios lakiosios medžiagos juda į baigiamojo degimo zoną (2), kuri nuo pirminės degimo zonos atskirta skliautu (3). Pakuros skliautas skirtas prailginti degimo produktų kelią ir buvimo (oksidacijos) laiką pakuroje. Baigiamojo degimo zonoje tiekiamas antrinis oras (14) galutiniam lakiųjų medžiagų oksidavimui. Susidarę degimo produktai ataušinami katile (4) ir dūmsiurbės (17) pagalba šalinami pro kaminą. Paskutinio degimo etapo metu baigiamas anglies – kokso degimas. Anglies degimas vyksta ardyno pabaigoje. Sudegus angliai lieka neorganinė, nedegioji biokuro masės dalis – pelenai. Toliau veikiami ardyno judėjimo jie stumiami į ardyno apačioje esantį pelenų šalinimo bunkerį.



15 pav. Bendra tyrimų standų principinė veikimo schema [26]

Degimui skirtas oras tiekiamas oro ventiliatoriaus (8). Pirminio oro kiekis nustatomas naudojant sklendę (11) ir tiekiamas po ardynu. Oras, pratekęs ardelių skylės, inicijuoja degimo procesą pirminio degimo zonoje (1). Antrinio oro kiekis reguliuojamas antrąja sklende (12) ir tiekiamas virš skliauto. Recirkuliaciniai dūmai tiekiami ventiliatoriaus (9). Tikslus dūmų recirkuliacijos kiekis nustatomas sklende (10) sumaišant tam tikromis proporcijomis dalį degimo produktų su oru.

Aušinantis vanduo cirkuliaciniu siurbliu tiekiamas į aušinimo sistemą – orinį kaloriferį ir plokštelinį šilumokaitį. Atvėsintas cirkuliacinio kontūro vanduo grąžinamas atgal į katilą. Grįžtančio vandens temperatūra į katilą palaikoma aukščiau rasos taško išvengiant tirpiųjų dujų SO₂ ir NO₂ emisijų neteisingo matavimo. Tyrimai atliekami nusistovėjus katilo galiai ir temperatūrai antrinėje degimo zonoje (16).



16 pav. UAB „Enerstenos“ stendo schema [22]

1 – kuro sraigtinis transporteris, 2 – judančios ardelės, 3 – oro tiekimo angos virš kuro sluoksnio/temperatūros matavimo angos, 4 – oro tiekimo angos po arka/temperatūros matavimo angos, 5 – oro tiekimo angos į galutinio degimo zoną/temperatūros matavimo angos, 6 – išmetamųjų dujų ventiliatorius, 7 – oro išleidimo/apsauginis vožtuvas, 8 – vandens srauto matuoklis, 9 – trieigis vandens maišymo vožtuvas, 10 – vandens siurblys, 11 – pirminio oro ventiliatorius, 12 – antrinio oro ventiliatorius, 13 – tretinio oro ventiliatorius, 14 – pirminio oro maišymo su išmetamųjų dujų recirkuliacija vožtuvas, 15 – balansavimo vožtuvas, 16 – nešiojamasis oro srauto matuoklis, 17 – antrinio oro maišymo su išmetamųjų dujų recirkuliacija vožtuvas, 18 – balansavimo vožtuvas, 19 – nešiojamasis oro srauto matuoklis, 20 – tretinio oro maišymo su išmetamųjų dujų recirkuliacija vožtuvas, 21 – balansavimo vožtuvas, 22 – nešiojamasis oro srauto matuoklis, 23 – ardyno judinimo variklis.

2.2.3. Degimo parametrų matavimai

Visų matavimų metu buvo registruojamos temperatūros skirtingose kūryklos degimo zonose – pirminėje ir antrinėje. Pirminės degimo zonos temperatūra matuojama virš degančio kuro sluoksnio (po skliautu), o antrinės degimo zonos temperatūra matuojama už antrinio oro tiekimo vietos (virš skliauto). Temperatūrai matuoti naudotos 1 tikslumo klasės, K tipo termoporos (TTP–TKbW) su mineraline izoliacija. Rezultatai registruoti duomenų registratoriumi PicoLogo TC–08 ir atitinkama programine įranga, temperatūrų registravimo periodiškumas – kas 1 sekundę. Emisijų koncentracijų matavimas atliktas naudojant degimo produktų analizatorių Multilyzer.

Emisijų koncentracijos matuojamos tiesiame $\varnothing 150$ mm nerūdijančio plieno, termoizoliuotame dūmų kanale. Matavimo zondai įstatomi į specialiai padarytas angas statmenai dūmų judėjimo kryptčiai. Tiesaus dūmų kanalo ruožo ilgis iki matavimo vietos atitinka penkių kanalo skersmenų ilgį, o atstumas už matavimo vietos yra didesnis nei dviejų kanalo skersmenų ilgis. Taip išvengiama dūmų tekėjimą trikdančių veiksnių, sukeliančių srauto turbulenciją ir galinčių iškreipti matavimų rezultatus. Dujų analizatorius emisijų koncentracijas pateikia milijoninių dalių (ppm) išraiška, todėl koncentracijos perskaičiuotos į miligramus kubiniame metre normaliomis sąlygomis (pagal 1 formulę). Normalios sąlygos priimtos esant $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrai, atmosferiniam slėgiui ir atmetus vandens garų kiekį išmetamosiose dujose.

$$C_{i\dot{s}} \left(\frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \right) = C_{i\dot{s}}(\text{ppm}) \times \frac{M_x}{V_M} \quad (1)$$

čia:

$C_{i\dot{s}}(\text{mg}/\text{Nm}^3)$ – išmetamo teršalo koncentracija, perskaičiuota į miligramus kubiniame metre, esant normalinėms sąlygoms (mg/Nm³);

$C_{i\dot{s}}(\text{ppm})$ – išmetamo teršalo išmatuota koncentracija (ppm);

M_x – atitinkamo cheminio junginio molinė masė (g/mol);

V_M – molinis dujų tūris lygus 22,4 l/mol.

Emisijų rezultatai pateikti perskaičiavus prie standartinio O₂ kiekio – 6% (vidutinio dydžio kietąjį kurą deginantiesiems įrenginiams). Atskiro išmetamo teršalo išmatuotos koncentracijos perskaičiavimui, esant standartinei O₂ koncentracijai, naudojama 2 formulė:

$$C_{st} = C_{i\dot{s}}(ppm) \times \frac{21 - O_{2(st)}}{21 - O_{2i\dot{s}}} \quad (2)$$

čia:

C_{st} – atskiro išmetamo teršalo koncentracija (mg/Nm³), perskaičiuota, esant standartinei deguonies koncentracijai;

$C_{i\dot{s}(ppm)}$ – atskiro išmetamo teršalo išmatuota koncentracija (mg/Nm³);

O_{2st} – standartinė deguonies koncentracija (tūrio procentais);

$O_{2i\dot{s}}$ – išmatuota deguonies koncentracija (tūrio procentais).

Emisijų rezultatai, kurių išmatuota vertė gauta didesnė už 1 milijoninę dalį (ppm), pateikiami grafiniu pavidalu. Emisijų koncentracijos, mažesnės už reikšmę 1 ppm, laikomi esančiais ties prietaiso matavimų riba, todėl tokie duomenys nepateikiami.

3. Eksperimentinių tyrimų rezultatai ir analizė

Biokuro degimo metu susidarančių NO_x emisijoms mažinti yra daug būdų ir priemonių. Tiriamajame darbe analizuojamas oro laipsniavimo ir dūmų recirkuliacijos metodai dvejuose stenduose. KTU laboratorijoje buvo deginama saulėgrąžų lukštų granulės, o Enerstenos laboratorijoje deginta medienos granulės, saulėgrąžų lukštų granulės ir pušies žievė. Tyrimo metu buvo stebima, kaip keičiasi NO_x, ir kitų teršalų koncentracijos, keičiant O₂ kiekį oro ir dūmų recirkuliacijos mišinyje, keičiant oro padavimo vietas. Tyrimo metu gauti duomenys buvo analizuojami ir sudarinėjamos grafinės priklausomybės.

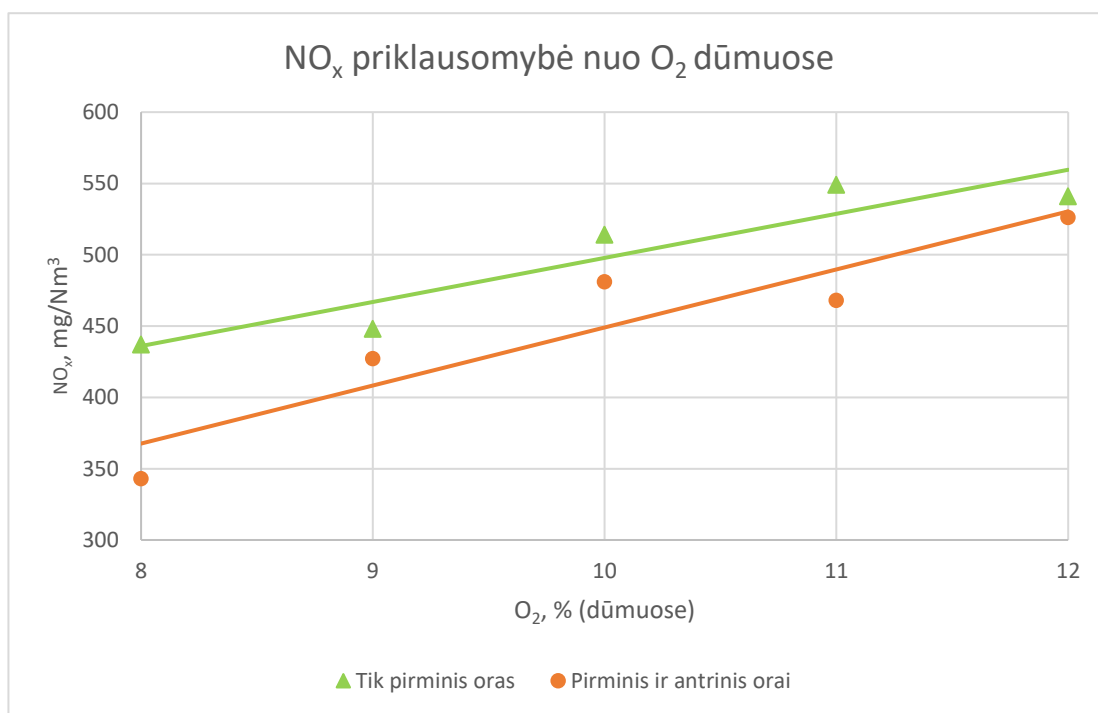
3.1. Eksperimentai KTU degimo procesų laboratorijoje

Šioje laboratorijoje buvo deginamos saulėgrąžų lukštų granulės, kuro savybės nurodomos 4 lentelėje. Eksperimentiniai matavimai buvo atliekami tiekiant tik pirminį orą, tiekiant pirminį ir antrinį orą, prijungiant dūmų recirkuliaciją į pirminį arba antrinį orą ir keičiant deguonies koncentraciją dūmų recirkuliacijoje.

4 lentelė. KTU laboratorijoje naudojamo kuro charakteristikos

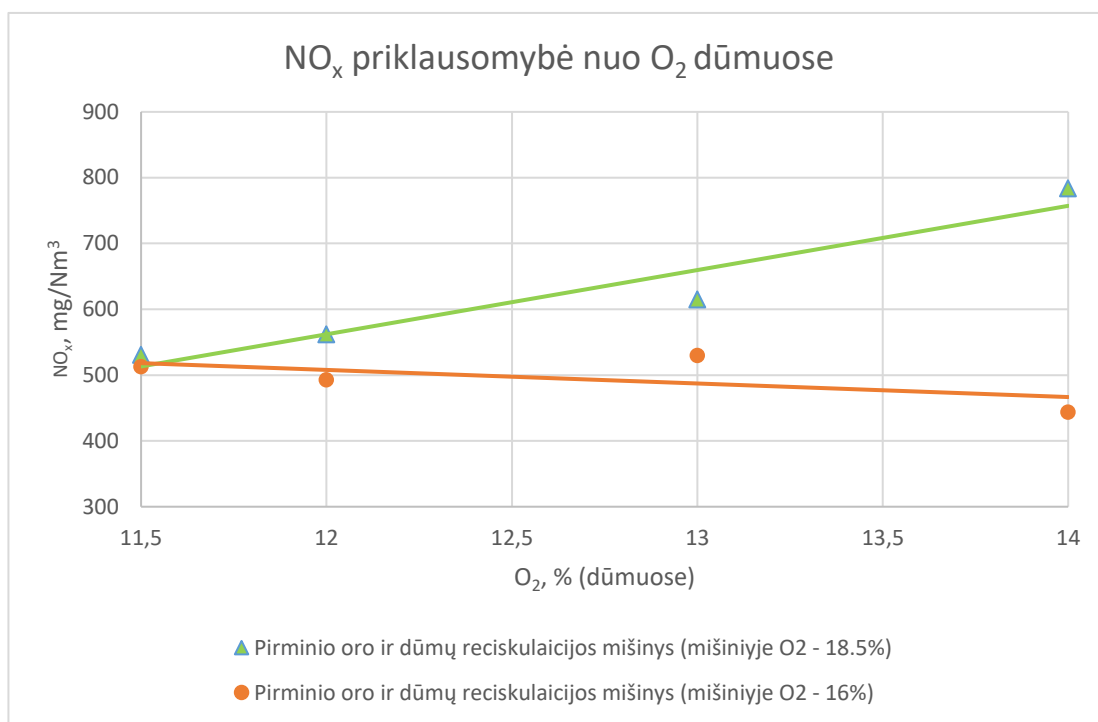
Kuras	Drėgmė	Azoto kiekis sausoje masėje, N
	%	%
Saulėgrąžų lukštų granulės	8,6	0,73

Tyrimas pradamas į pakurą tiekiant tik pirminį orą, azoto oksidų kiekis svyruoja nuo 437 iki 549 mg/Nm³, prijungus antrinį orą NO_x kiekis sumažėja ir svyruoja nuo 343 iki 602 mg/Nm³. Taigi didėjant deguonies koncentracijai dūmuose abejais atvejais azoto oksidų kiekis didėja, tačiau esant pirminiam ir antriniam orui NO_x kiekis mažesnis (17 pav.).



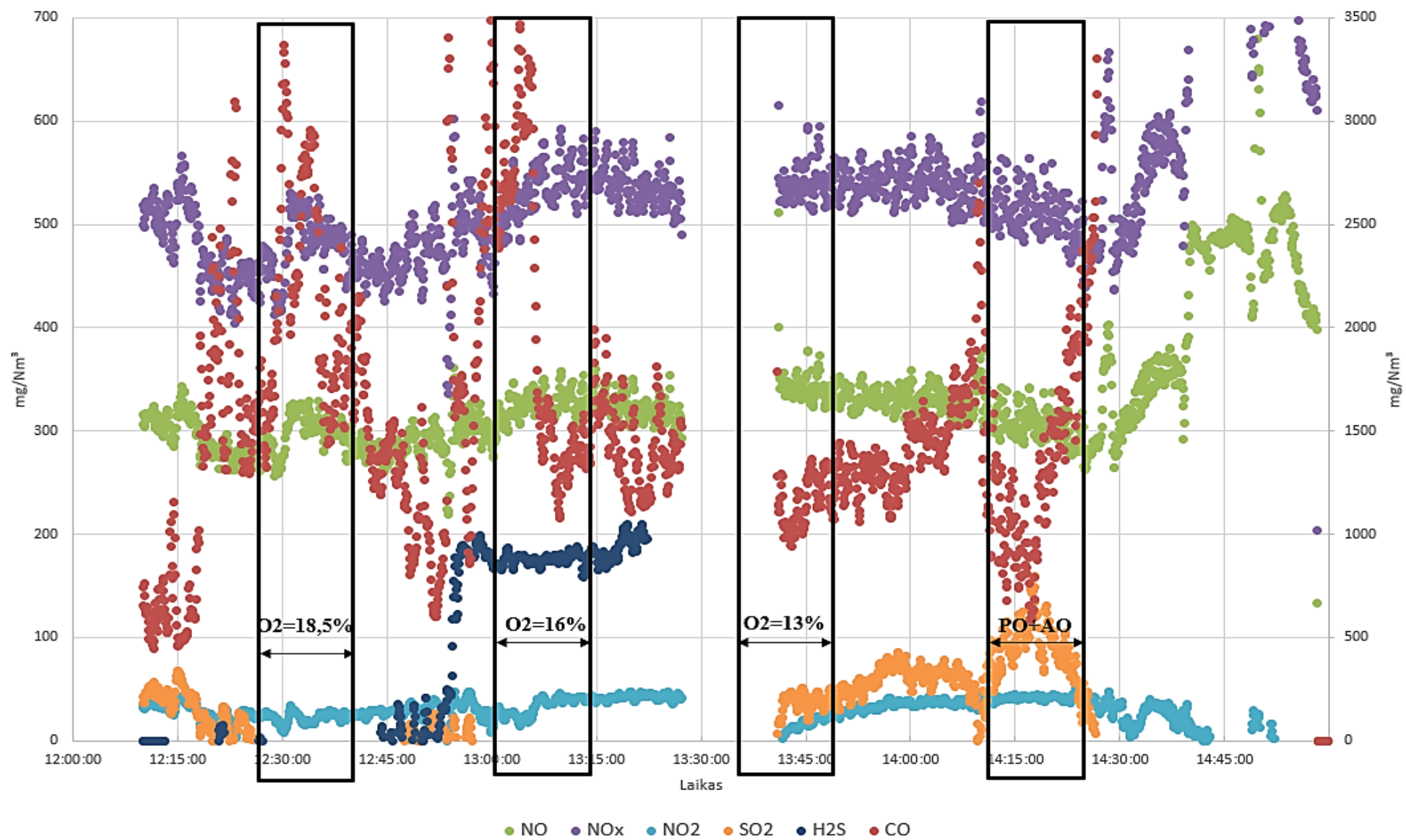
17 pav. NO_x priklausomybė nuo O₂ dūmuose, tiekiant tik pirminį orą ir pirminį ir antrinį orą

Gavus rezultatus su pirminiu ir antriniu oru į pirminio oro liniją prijungiama dūmų recirkuliacija ir nureguliuojama deguonies koncentracija 18,5 %. Gauname azoto oksidų svyravimą nuo 531 iki 784 mg/Nm³. Su tokia deguonies koncentracija azoto oksidų kiekis didėja, didėjant O₂ dūmuose. Tačiau nureguliuavus deguonies koncentraciją pirminio oro ir dūmų recirkuliacijos mišinys 16 % didėjant deguonies koncentracijai dūmuose azoto oksidai mažėja ir svyruoja nuo 444 iki 530 mg/Nm³ (18 pav.).

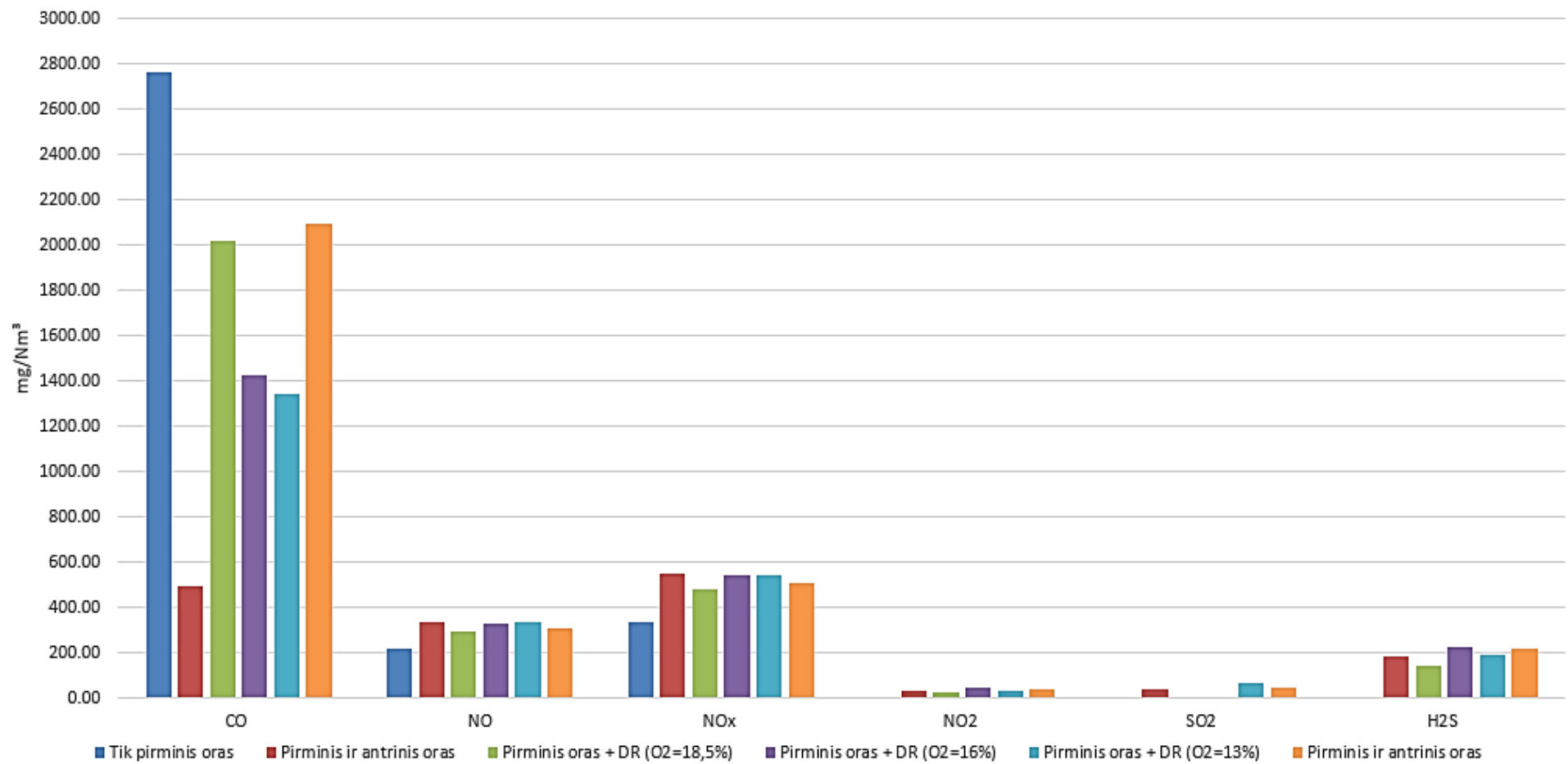


18 pav. NO_x priklausomybė nuo O₂ dūmuose, kai į pirminį orą prijungiama dūmų recirkuliacija

19 paveiksle yra visi matavimo rezultatai. Aiškiai matyti, kaip keičiasi teršalų emisijos keičiant deguonies koncentraciją dūmų recirkuliacijoje arba paliekant tik pirminį ir antrinį orus. Taip pat šiame paveiksle matyti ir kiti teršalai toki kaip NO, NO₂, SO₂, H₂S ir CO. Matomas ryškus anglies monoksidų padidėjimas, kai į pirminį orą prijungiama dūmų recirkuliacija. 20 paveiksle pavaizduota stulpelinė diagrama su visų rezultatų vidurkais skirtingomis situacijomis. Kaip matome iš šios diagramos mažiausi NO_x kiekiai buvo, kai buvo paduodamas tik pirminis oras.



19 pav. Rezultatai viso bandymo metu



20 pav. Rezultatų vidurkiai

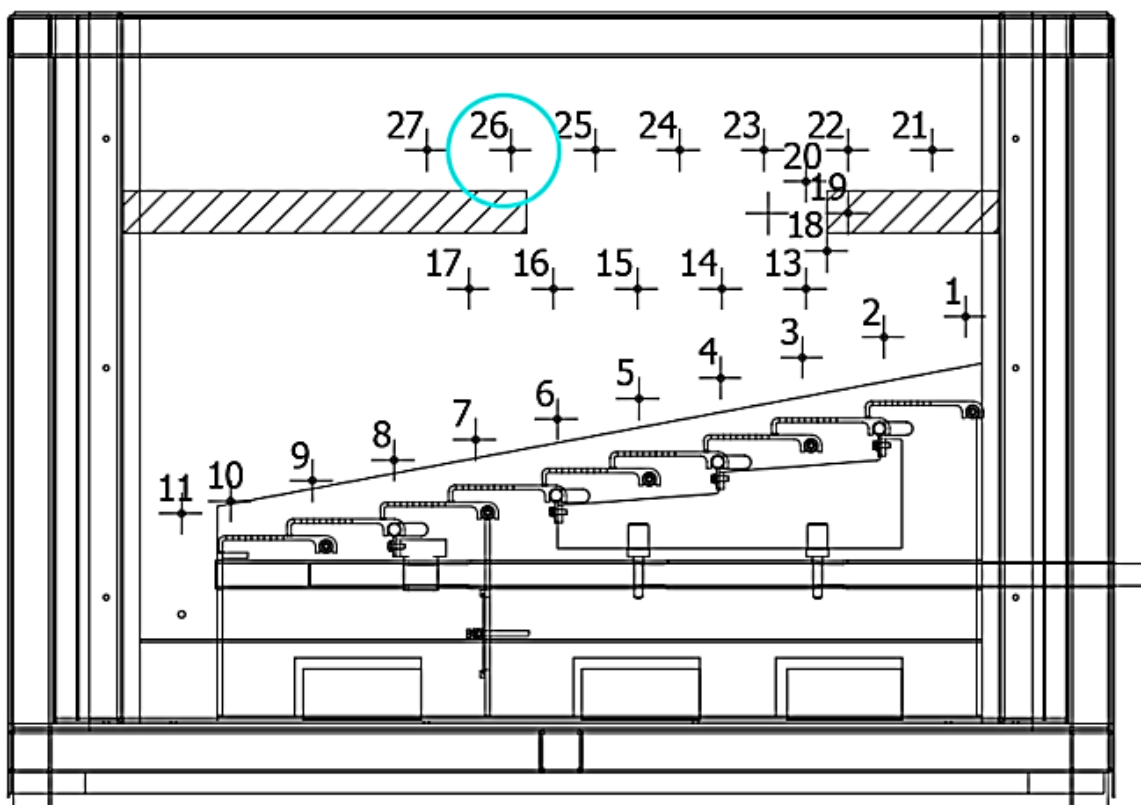
3.2. UAB „Enerstenos“ laboratorijoje atliktų tyrimų duomenų analizė

Šioje laboratorijoje buvo atliekami tyrimai keičiant orų padavimo angas, koreguojant deguonies koncentraciją ore, keičiant dūmų recirkuliacijos padavimo angas, paduodant pirminį ar antrinį orą kartu su dūmų recirkuliacija. Tyrimo metu buvo deginama saulėgrąžų lukštų granulės, medienos granulės ir smulkinta pušies žievė. Kuro charakteristikos nurodomos 5 lentelėje.

5 lentelė. Antro tyrimo metu naudoto kuro charakteristikos

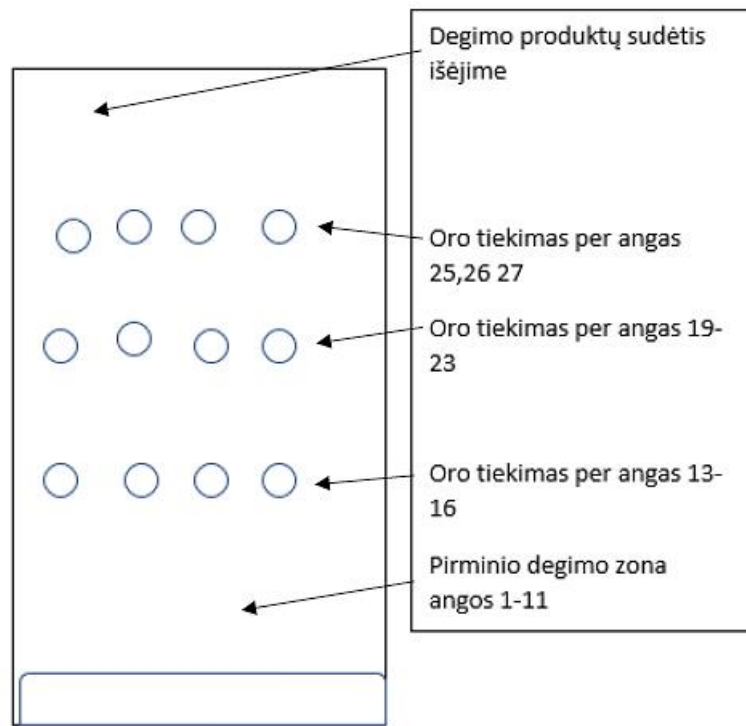
Kuras	Drėgmė	Azoto kiekis sausoje masėje, N
	%	%
Saulėgrąžų lukštų granulės	8,6	0,73
Smulkinta pušies žievė	47,2	0,39
Medienos granulės	5,9	0,15

Enerstenos eksperimentinės bazės stende oro angos išdėstytos tokia tvarka – kaip parodyta 21 pav. Gana sudėtinga analizuoti rezultatus, ir sudėtinga juos aiškintis, nes sudėtingas angų išdėstymas.



21 pav. Oro angų išdėstymas Enerstenos eksperimentinės bazės stendo pakuroje

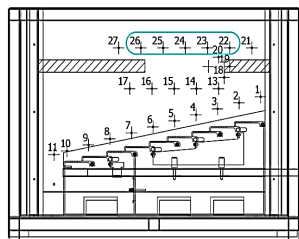
Gal būtų aiškiau, jeigu stendo schemą perbraižytume kitaip, pagal dūmų tekėjimo seką (22 pav.).



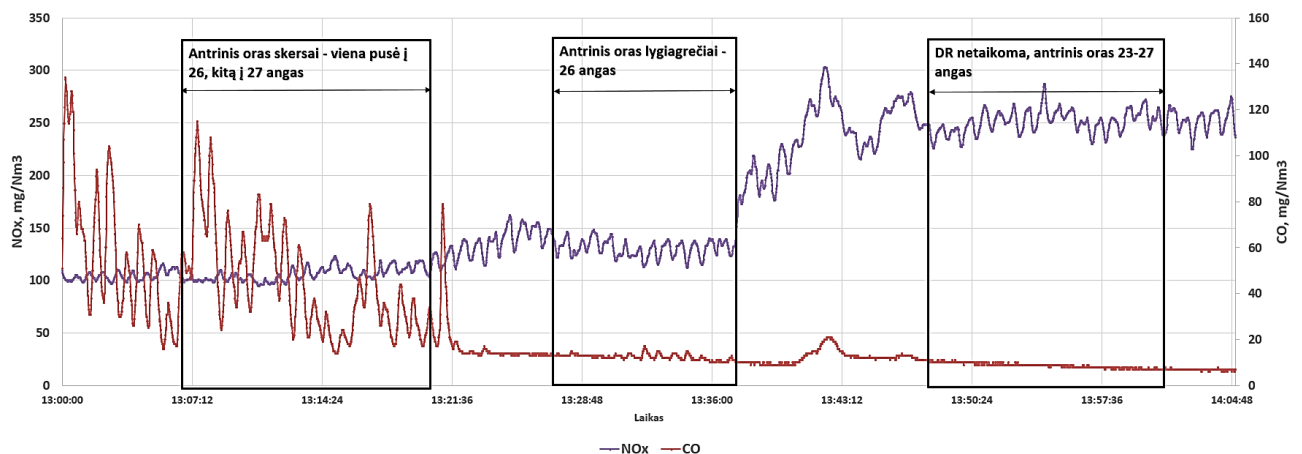
22 pav. Dūmų tekėjimo seka

3.2.1. Tyrimas deginant saulėgražų granules

Pirmas eksperimentas atliekamas keičiant antrinio oro padavimo vietas: skersai į 26 ir 27 angas, lygiagrečiai į 26 angą, į 22-26 angas, kaip pavaizduota 23 paveiksle. 24 paveiksle matome kaip keičiasi NO_x ir CO emisijos priklausomai nuo antrinio oro padavimo vietos.

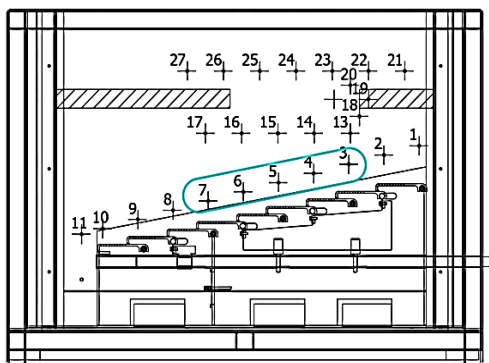


23 pav. Antrinio oro padavimas

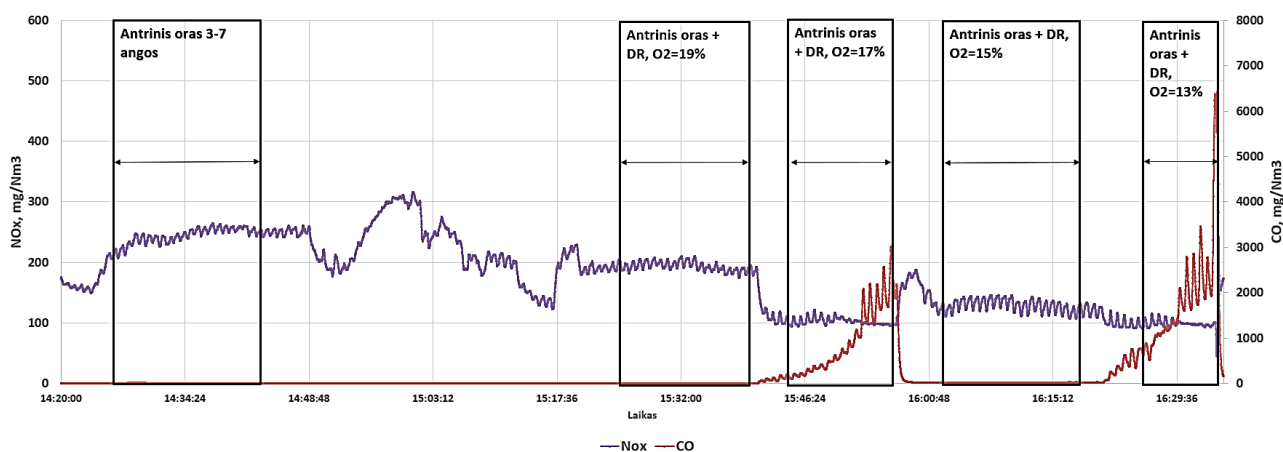


24 pav. NO_x ir CO emisijos keičiant antrinio oro padavimo vietas

Toliau tęsiame eksperimentą ir antrinį orą perkeliame į 3-7 angas kaip parodyta 25 paveikle. Antrinį orą paliekame toje pačioje vietoje tačiau prijungiame dūmų recirkuliaciją ir keičiame deguonies koncentraciją antrinio ir DR mišinysje nuo 19 % iki 13 % mažinant po 2 %. 26 paveiksle matome kaip keičiasi NO_x ir CO emisijos.

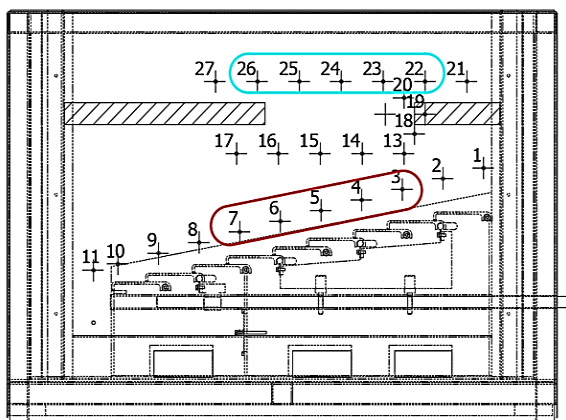


25 pav. Antrinio oro padavimas

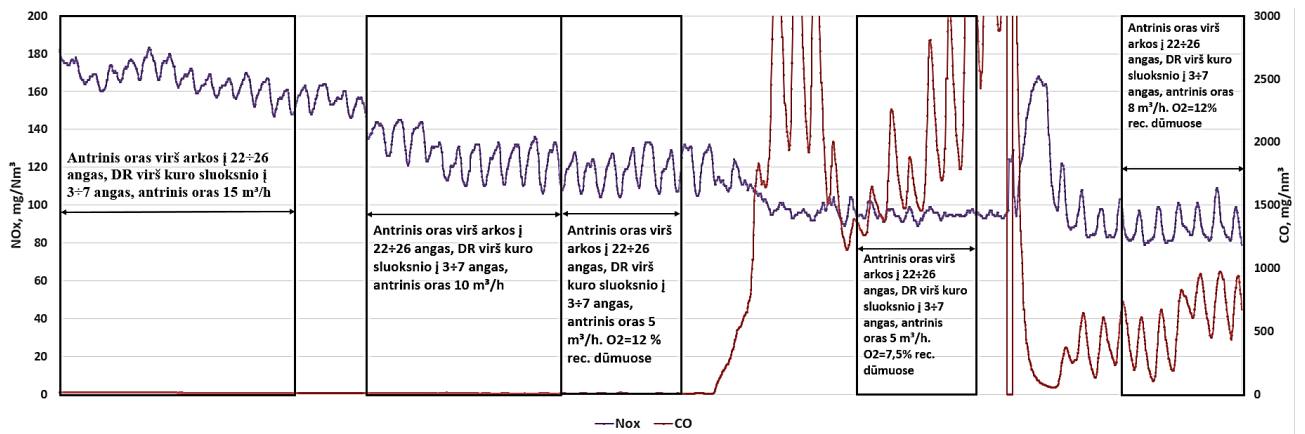


26 pav. NO_x ir CO emisijos prijungus DR ir keičiant O_2 koncentraciją antrinio oro ir DR mišinysje

Perkeliame antrinį orą į 22-26 angas ir pajungiame DR į 3-7 angas, kaip parodyta 27 paveiksle. Šį kartą keičiame antrinio oro debitą (15, 10, 5, 8, m^3/h) ir deguonies koncentraciją dūmų recirkuliacijoje (12 % ir 7,5 %). 28 paveiksle matome, kaip keičiasi NO_x ir CO emisijos iš pradžių keičiant tik antrinio oro debitą, o vėliau ir O_2 koncentraciją DR.

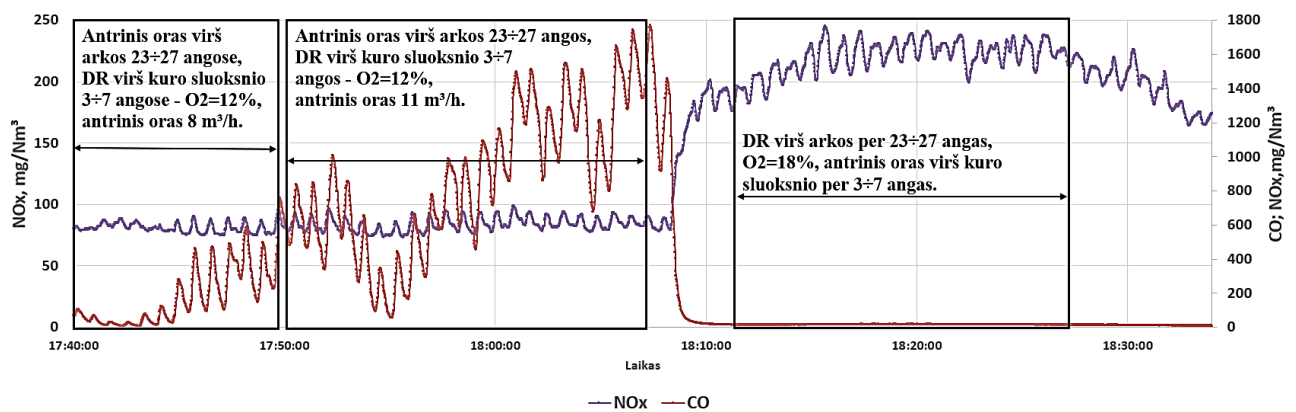


27 pav. Antrinio oro ir DR padavimas



28 pav. NO_x ir CO emisijos perkėlus antrinį orą, keičiant antrinio oro debitą ir O₂ koncentraciją DR

Perkeliame antrinį orą į 23-27 angas, DR paliekame 3-7 angose. Antrinio oro debitą darome 8 ir 11 m³/h, kaip matome 29 paveiksle pakeitus antrinio oro debitą į 11 m³/h NO_x beveik nepakito, tačiau labai iškilo CO išmetimai. Apkeitus DR ir antrinį orą vietomis ir padidinus deguonies koncentraciją DR ir oro mišinyje iki 18 % išaugo NO_x emisijos, tačiau sumažėjo CO išmetimai.

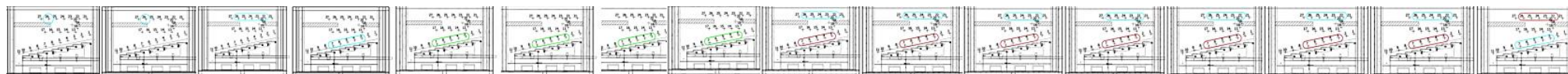


29 pav. NO_x ir CO emisijos keičiant antrinio oro debitą, O₂ koncentraciją DR ir apkeitus vietomis DR su antriniu oru

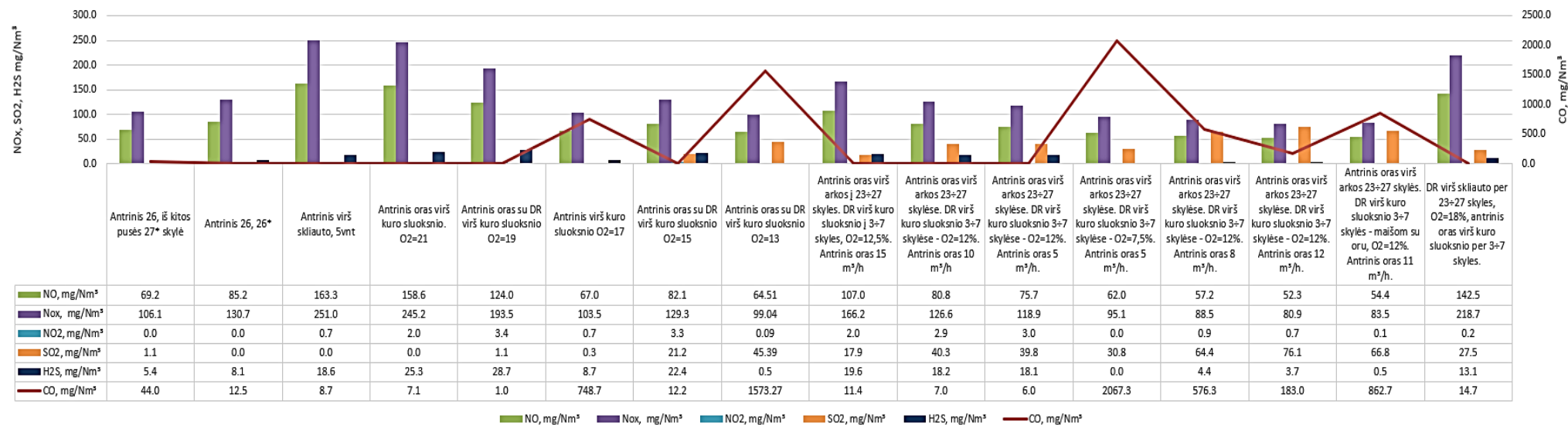
6 lentelėje matome, kaip pasiskirsto teršalų emisijų vidurkiai, pagal degimo sąlygas ir kokiomis degimo sąlygomis yra mažiausios tam tikrų teršalų emisijos. Mažiausias NO_x vidutinis kiekis pasiektas, kai antrinis oras buvo paduodamas virš arkos (23-27 angos), Dūmų recirkuliacija virš kuro sluoksnio (3-7 angos), deguonies koncentracija oro ir DR mišinyje – 12 %, antrinio oro debitas 12 m³/h.

6 lentelė. Teršalų emisijų vidurkiai keičiantis degimo sąlygomis, deginant saulėgrąžų lukštų granules

Degimo sąlygos	Teršalų emisijos					
	CO, mg/Nm ³	NO, mg/Nm ³	NO _x , mg/Nm ³	NO ₂ , mg/Nm ³	SO ₂ , mg/Nm ³	H ₂ S, mg/Nm ³
Antrinis 26 anga, iš kitos pusės 27 anga	44.0	69.2	106.1	0.0	1.1	5.4
Antrinis 26 anga ir iš kitos pusės 26 anga	12.5	85.2	130.7	0.0	0.0	8.1
Antrinis virš skliauto, 22-26 angos	8.7	163.3	251.0	0.7	0.0	18.6
Antrinis oras virš kuro sluoksnio, O ₂ =21%	7.1	158.6	245.2	2.0	0.0	25.3
Antrinis oras su DR virš kuro sluoksnio O ₂ =19%	1.0	124.0	193.5	3.4	1.1	28.7
Antrinis virš kuro sluoksnio O ₂ =17%	748.7	67.0	103.5	0.7	0.3	8.7
Antrinis oras su DR virš kuro sluoksnio O ₂ =15%	12.2	82.1	129.3	3.3	21.2	22.4
Antrinis oras su DR virš kuro sluoksnio O ₂ =13%	1573.27	64.51	99.04	0.09	45.39	0.5
Antrinis oras virš arkos į 23÷27 angas. DR virš kuro sluoksnio į 3÷7 angas, O ₂ =12,5%. Antrinis oras 15 m ³ /h	11.4	107.0	166.2	2.0	17.9	19.6
Antrinis oras virš arkos 23÷27 skylėse. DR virš kuro sluoksnio 3÷7 angose - O ₂ =12%. Antrinis oras 10 m ³ /h	7.0	80.8	126.6	2.9	40.3	18.2
Antrinis oras virš arkos 23÷27 skylėse. DR virš kuro sluoksnio 3÷7 angose - O ₂ =12%. Antrinis oras 5 m ³ /h.	6.0	75.7	118.9	3.0	39.8	18.1
Antrinis oras virš arkos 23÷27 skylėse. DR virš kuro sluoksnio 3÷7 angose - O ₂ =7,5%. Antrinis oras 5 m ³ /h.	2067.3	62.0	95.1	0.0	30.8	0.0
Antrinis oras virš arkos 23÷27 skylėse. DR virš kuro sluoksnio 3÷7 angose - O ₂ =12%. Antrinis oras 8 m ³ /h.	576.3	57.2	88.5	0.9	64.4	4.4
Antrinis oras virš arkos 23÷27 skylėse. DR virš kuro sluoksnio 3÷7 angose - O ₂ =12%. Antrinis oras 12 m ³ /h.	183.0	52.3	80.9	0.7	76.1	3.7
Antrinis oras virš arkos 23÷27 skylės. DR virš kuro sluoksnio 3÷7 angose - maišom su oru, O ₂ =12%. Antrinis oras 11 m ³ /h.	862.7	54.4	83.5	0.1	66.8	0.5
DR virš skliauto per 23÷27 angas, O ₂ =18%, antrinis oras virš kuro sluoksnio per 3÷7 angas.	14.7	142.5	218.7	0.2	27.5	13.1

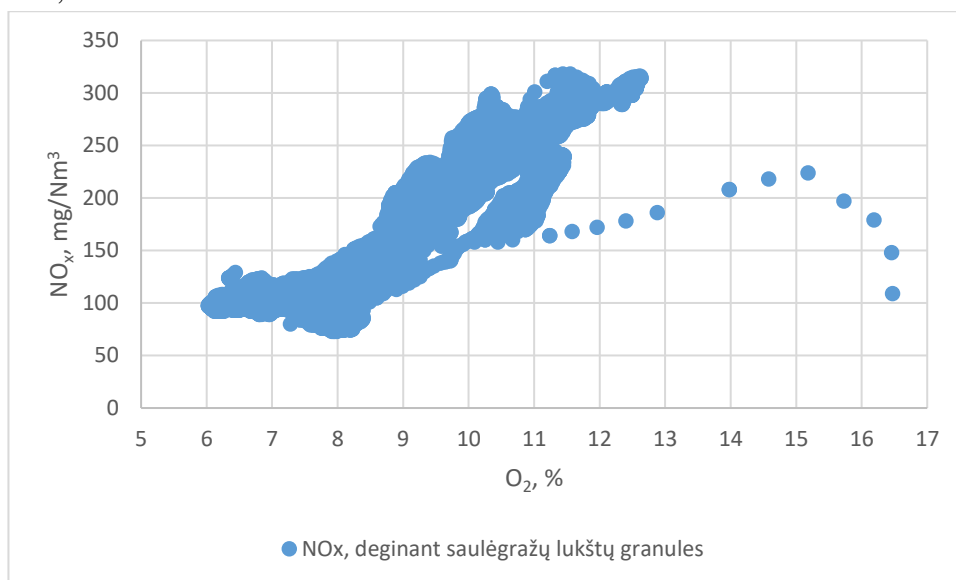


Vidurkiai



30 pav. Teršalų emisijų vidurkiai keičiantis degimo sąlygomis, deginant saulėgražų lukštų granules

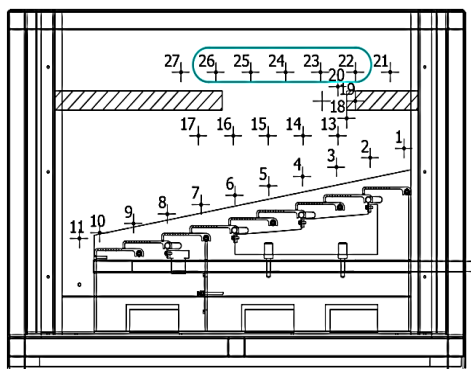
Kaip matome 31 paveiksle NOx svyravimai buvo ryškūs, deginant saulėgražų lukštų granules, viso tyrimo metu NOx svyravo nuo 73 iki 318 mg/Nm³. Mažiausias NOx kiekis buvo pasiektas, kai antrinis oras buvo paduodamas virš arkos 23÷27 angos, DR virš kuro sluoksnio 3÷7 angos - maišom su oru, O₂=12%, antrinis oras 11 m³/h.



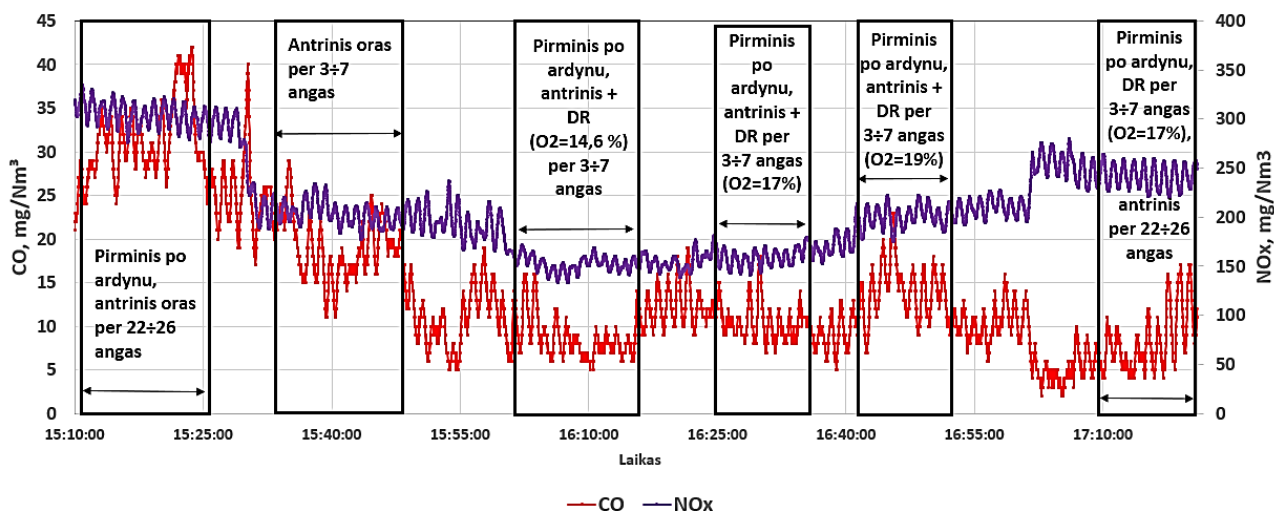
31 pav. NOx priklausomybė nuo deguonies koncentracijos dūmuose, deginant saulėgražų lukštų granules

3.2.2. Tyrimas deginant smulkintą pušų žievę

Pakeičiama biomasės rūšis į smulkintą pušų žievę ir tęsiamas tyrimas. Pradedama nuo pirminio oro padavimo po ardynu, antrinis oras paduodamas per 22-26 angas (30 pav.). Pakeičiame antrinio oro padavimo vietą į 3-7 angas, prijungiame dūmų recirkuliaciją į antrinį orą ir reguliuojame deguonies koncentraciją antrinio oro ir DR oro mišinyje (14,6 %, 17%, 19%). Atjungiame dūmų recirkuliaciją iš pirminio oro ir paduodame DR per 3-7 angas nustatome deguonies koncentraciją 17 %, antrinį orą paduodame per 22-26 angas. 31 paveiksle matome, kaip keičiasi NO_x ir CO emisijos nustatant šias degimo sąlygas.

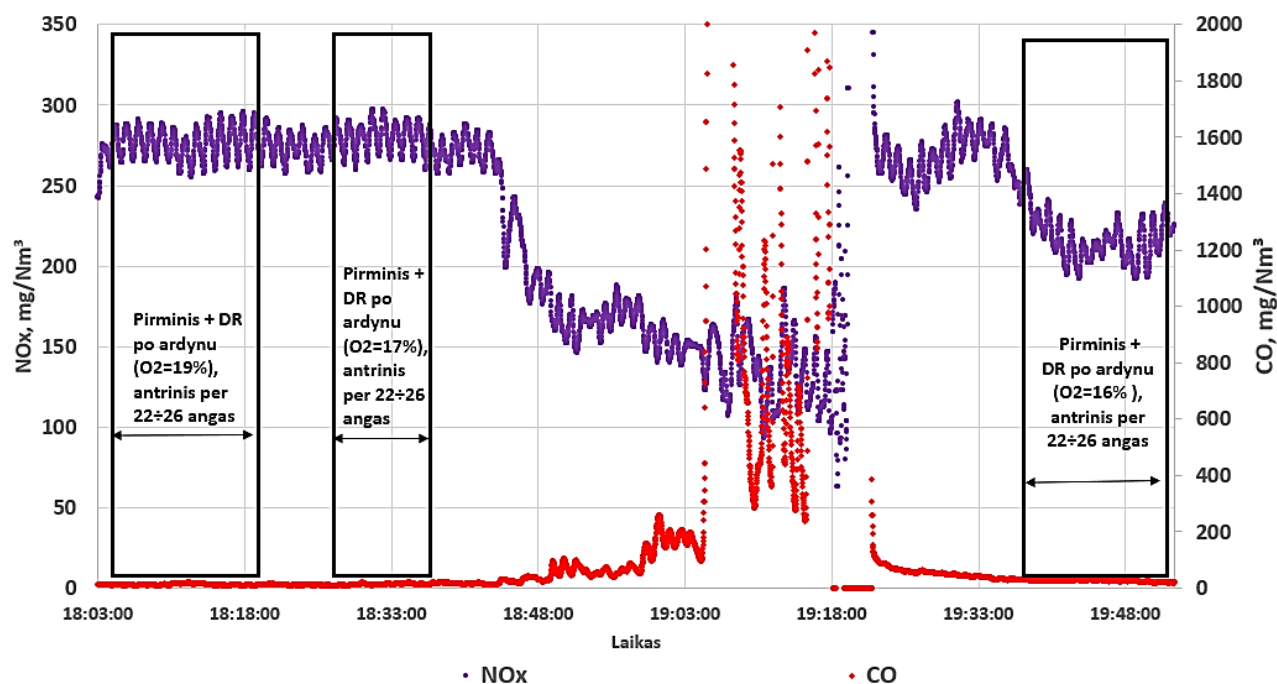


32 pav. Antrinio oro padėtis



33 pav. NO_x ir CO emisijos keičiant antrinio oro padavimo vietas, prijungiant DR į antrinį orą ir keičiant O₂ koncentraciją DR ir antrinio oro mišinyje, prijungiant DR į pirminį orą

Toliau tęsiame tyrimą ir keičiame degimo sąlygas. 32 paveiksle matome kaip keičiasi NO_x ir CO emisijos pirminį orą kartu su DR paduodant po ardynu (O₂ koncentracija orų mišinyje 19%, 17%, 16%) ir antrinį orą per 22-26 angas.

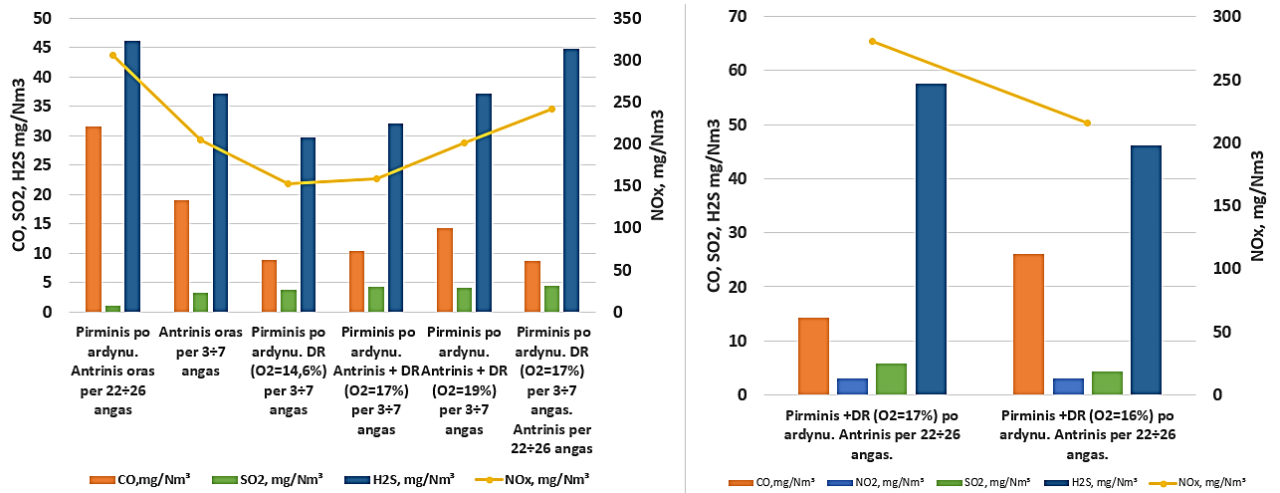


34 pav. NO_x ir CO emisijos keičiant O₂ koncentraciją pirminio oro ir DR orų mišinys

7 lentelėje matome, kaip pagal degimo sąlygas pasiskirsto teršalų emisijų vidurkiai. Mažiausias NO_x išmetimų vidutinis kiekis deginant smulkintą pušų žievę gautas, kai pirminis oras paduodamas po ardynu, antrinis oras kartu su dūmų recirkuliacija per 3-7 angas ir O₂ koncentracija antrinio oro ir dūmų recirkuliacijoje yra 14,6%.

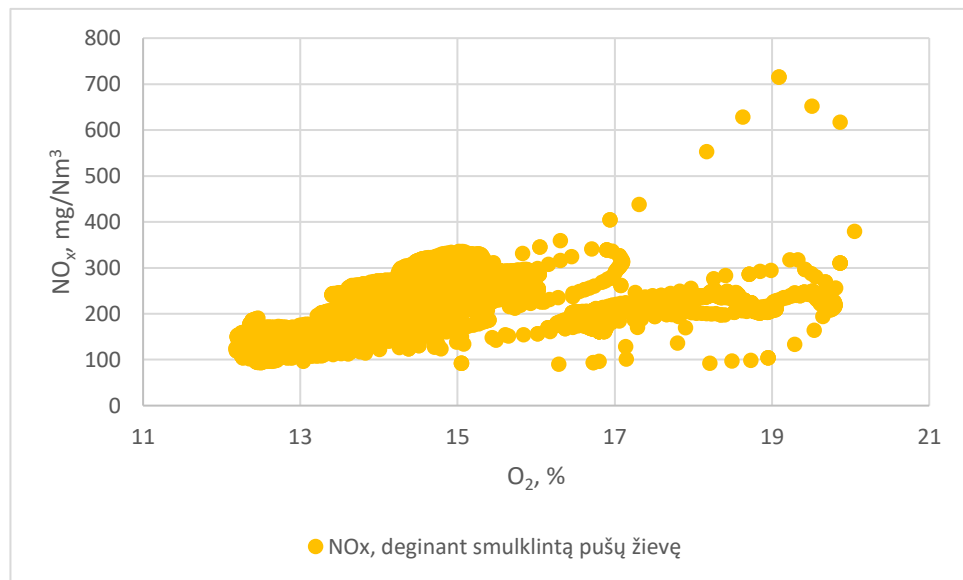
7 lentelė. Teršalų emisijų vidurkiai keičiantis degimo sąlygomis, deginant smulkintą pušų žievę

Degimo sąlygos	Teršalų emisijos					
	CO, mg/Nm ³	NO, mg/Nm ³	NO _x , mg/Nm ³	NO ₂ , mg/Nm ³	SO ₂ , mg/Nm ³	H ₂ S, mg/Nm ³
Pirminis po ardynu. Antrinis oras per 22÷26 angas	31	195	305	2	1	46
Antrinis oras per 3÷7 angas	19	130	204	2	3	37
Pirminis po ardynu. Antrinis + DR (O ₂ =14,6%) per 3÷7 angas	9	97	152	2	4	30
Pirminis po ardynu. Antrinis + DR (O ₂ =17%) per 3÷7 angas	10	100	158	2	4	32
Pirminis po ardynu. Antrinis + DR (O ₂ =19%) per 3÷7 angas	14	128	201	2	4	37
Pirminis po ardynu. DR (O ₂ =17%) per 3÷7 angas. Antrinis per 22÷26 angas	9	154	242	2	4	45
Pirminis +DR (O ₂ =19%) po ardynu. Antrinis per 22÷26 angas.	13	174	275	3	6	56
Pirminis +DR (O ₂ =17%) po ardynu. Antrinis per 22÷26 angas.	14	177	280	3	6	58
Pirminis +DR (O ₂ =16%) po ardynu. Antrinis per 22÷26 angas.	26	136	216	3	4	46



35 pav. Teršalų emisijų vidurkiai keičiantis degimo sąlygomis, deginant smulkintą pušų žievę

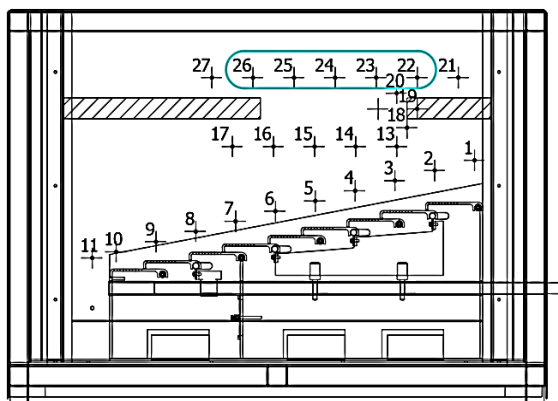
Kaip matome 36 paveiksle NO_x svyravimai buvo nuo 90 iki 715 mg/Nm³. Mažiausias NO_x kiekis buvo užfiksuotas, kai pirminis oras paduodamas po ardynu. DR (O₂=14,6%) per 3÷7 angas.



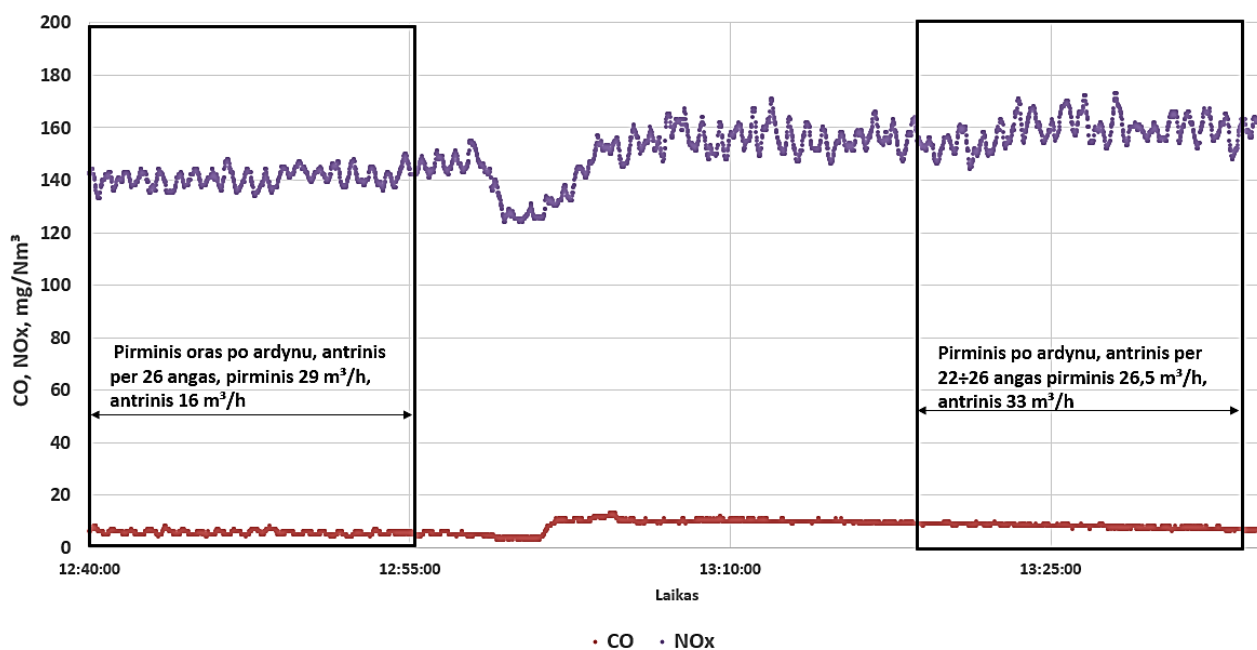
36 pav. NO_x priklausomybė nuo deguonies koncentracijos dūmuose, deginant smulkintą pušų žievę

3.2.3. Tyrimas deginant medienos granules

Tęsiame tyrimą ir deginame medienos granules. Ši biomasė sausiausia ir turi mažiausią kiekį azoto savyje, lyginant su saulėgrąžų lukštų granulėmis ir smulkinta pušų žieve. Pradedame tyrimą paduodant pirminį orą po ardynu ir nustatome debitą 29 m³/h, antrinį orą paduodame per 26 angas iš abiejų pakuros pusių debitas 16 m³/h. Pakeičiame antrinio oro padavimo vietą (22-26 angas, kaip pavaizduota 33 pav.), nustatome pirminio oro debitą 26,5 m³/h ir antrinio 33 m³/h (34 pav.).

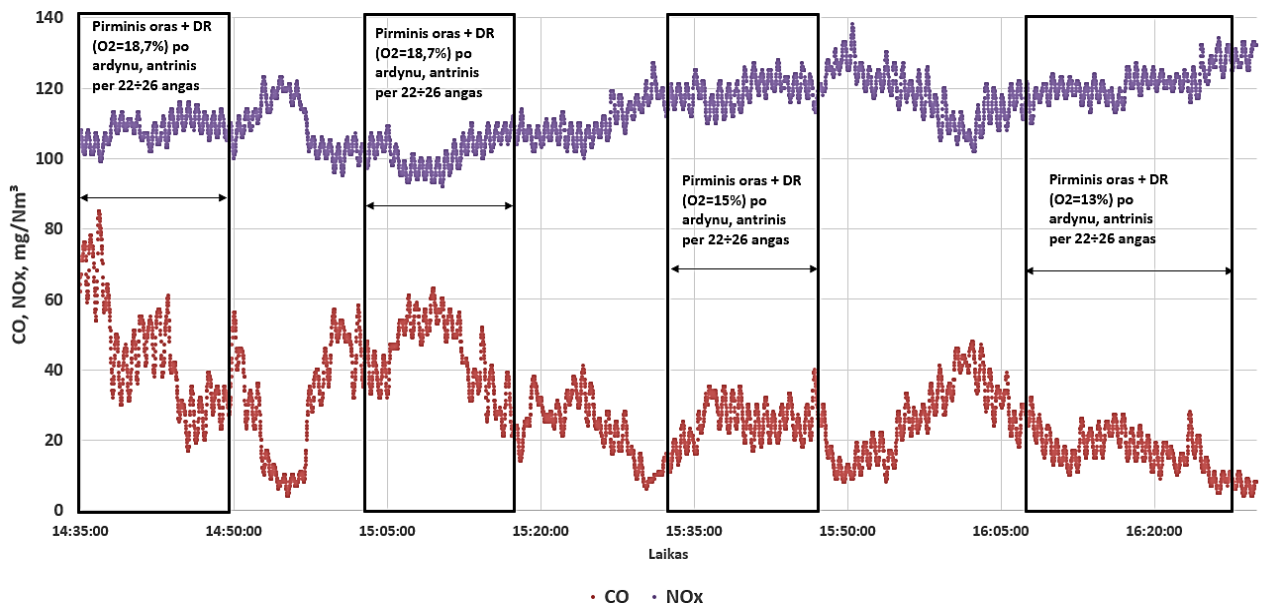


37 pav. Antrinio oro padavimo vieta



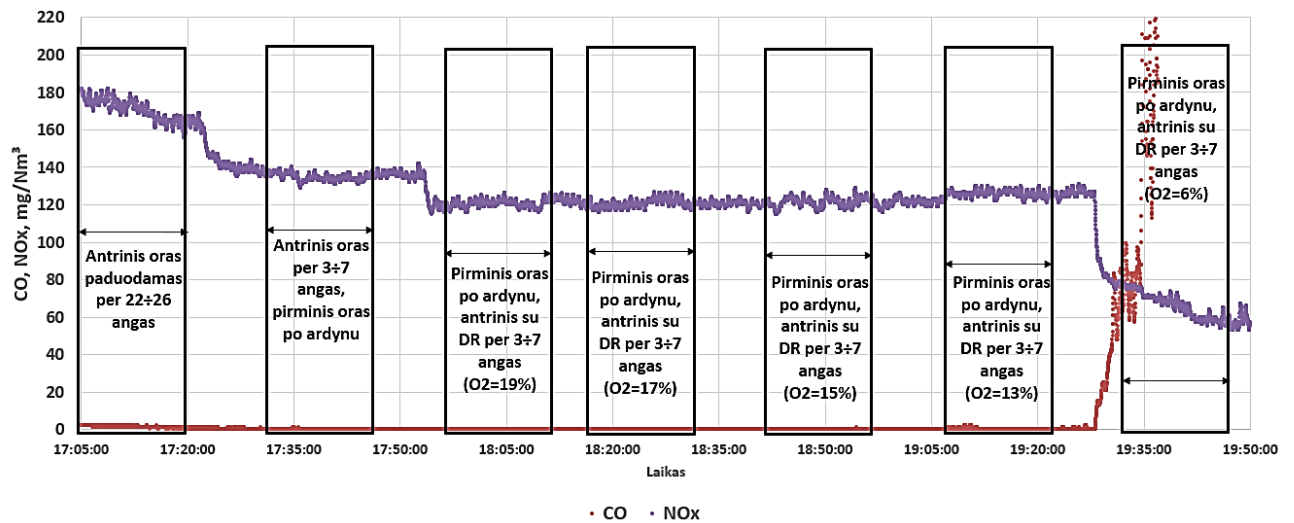
38 pav. NO_x ir CO emisijos keičiant pirminio ir antrinio oro debitus bei padavimo vietas

Keičiame degimo sąlygas, prijungiame DR prie pirminio oro ir nustatome deguonies koncentraciją pirminio oro ir DR oro mišinyje 18,7%, antrinį orą paduodame per 22-26 angas. Toliau reguliuojame O₂ koncentraciją pirminio oro ir dūmų recirkuliacijos mišinyje, nustatome 15% ir 13%. 35 paveiksle matome kaip keičiasi NO_x ir CO emisijos prie šių degimo sąlygų.



39 pav. NO_x ir CO emisijos keičiant O₂ koncentraciją pirminio oro ir dūmų recirkuliacijos mišinyje

Atliekame paskutinius keitimus. Antrinį orą paduodame per 22-26 angas, perdodame antrinio oro padavimą į 3-7 angas, prijungiame DR į antrinį orą ir keičiame O₂ koncentraciją antrinio oro ir dūmų recirkuliacijos oro mišinyje (19%, 17%, 15%, 13%, 6%). 36 paveiksle matome kaip keičiasi NO_x ir CO emisijos.

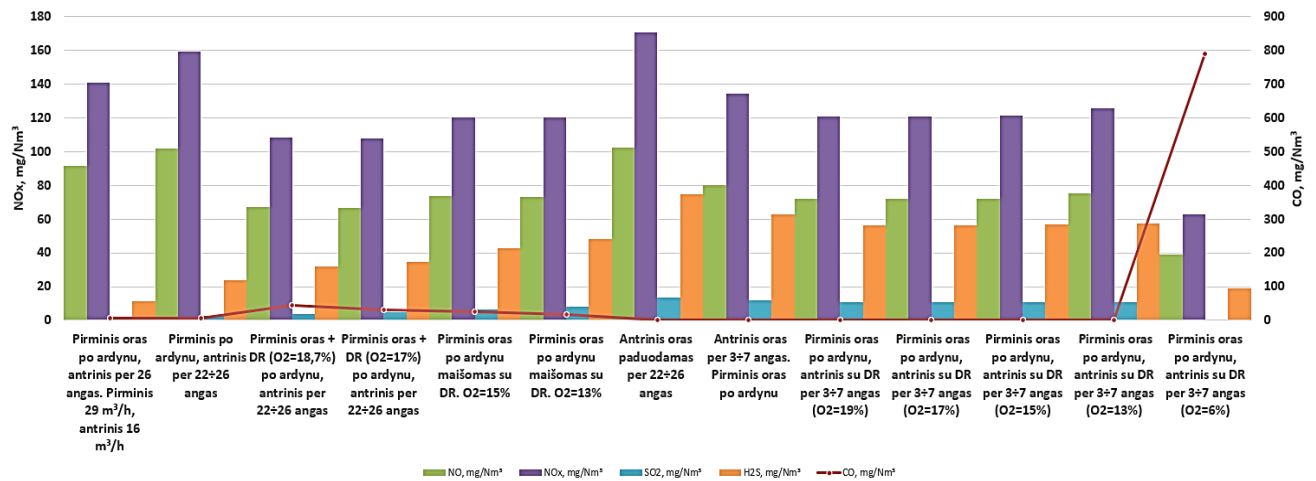


40 pav. NO_x ir CO emisijos antrinio oro padavimo vietą, prijungiant DR į antrinį orą ir keičiant O₂ koncentraciją antrinio oro ir DR oro mišinyje

8 lentelėje matome, jog deginant medienos granules mažiausią NO_x emisijų vidutinį kiekį gauname, kai pirminis oras paduodamas po ardynu, antrinis kartu su dūmų recirkuliacija paduodamas per 3-7 angas ir O₂ koncentracija orų mišinyje yra 6%. Tačiau esant tokioms degimo sąlygoms labai padidėja CO išmetimai.

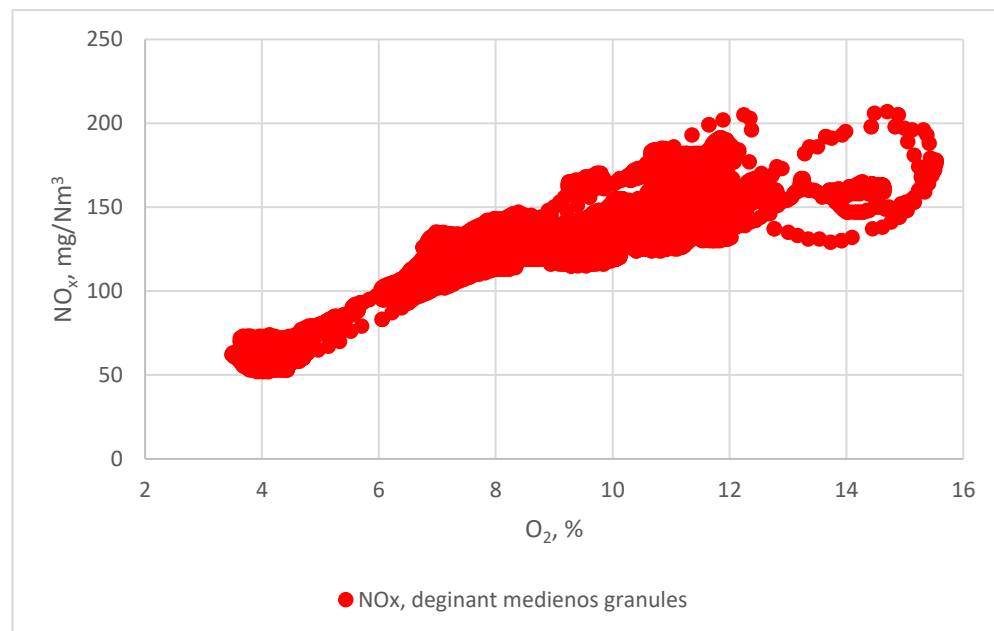
8 lentelė. Teršalų emisijų vidurkiai keičiantis degimo sąlygomis, deginant medienos granules

Degimo sąlygos	Teršalų emisijos				
	CO, mg/Nm ³	NO, mg/Nm ³	NO _x , mg/Nm ³	SO ₂ , mg/Nm ³	H ₂ S, mg/Nm ³
Pirminis oras po ardynu, antrinis per 26 angas. Pirminis 29 m ³ /h, antrinis 16 m ³ /h	5.64	91.66	140.73	0.23	11.47
Pirminis po ardynu, antrinis per 22÷26 angas	7.84	102.10	159.06	2.61	23.71
Pirminis oras + DR (O ₂ =18,7%) po ardynu, antrinis per 22÷26 angas	44.01	67.16	108.13	3.63	31.77
Pirminis oras + DR (O ₂ =17%) po ardynu, antrinis per 22÷26 angas	30.72	66.48	107.72	4.79	34.44
Pirminis oras po ardynu maišomas su DR (O ₂ =15%)	24.46	73.72	120.52	6.52	43.04
Pirminis oras po ardynu maišomas su DR (O ₂ =13%)	17.70	72.96	120.52	7.89	48.25
Antrinis oras paduodamas per 22÷26 angas	1.32	102.43	170.76	13.40	74.72
Antrinis oras per 3÷7 angas. Pirminis oras po ardynu	0.00	80.24	134.56	11.88	62.71
Pirminis oras po ardynu, antrinis su DR per 3÷7 angas (O ₂ =19%)	0.00	72.23	121.08	10.75	56.07
Pirminis oras po ardynu, antrinis su DR per 3÷7 angas (O ₂ =17%)	0.00	72.04	120.84	10.82	56.46
Pirminis oras po ardynu, antrinis su DR per 3÷7 angas (O ₂ =15%)	0.00	72.26	121.18	10.93	56.68
Pirminis oras po ardynu, antrinis su DR per 3÷7 angas (O ₂ =13%)	0.07	75.07	125.64	10.88	57.44
Pirminis oras po ardynu, antrinis su DR per 3÷7 angas (O ₂ =6%)	789.66	38.84	62.62	0.22	18.69



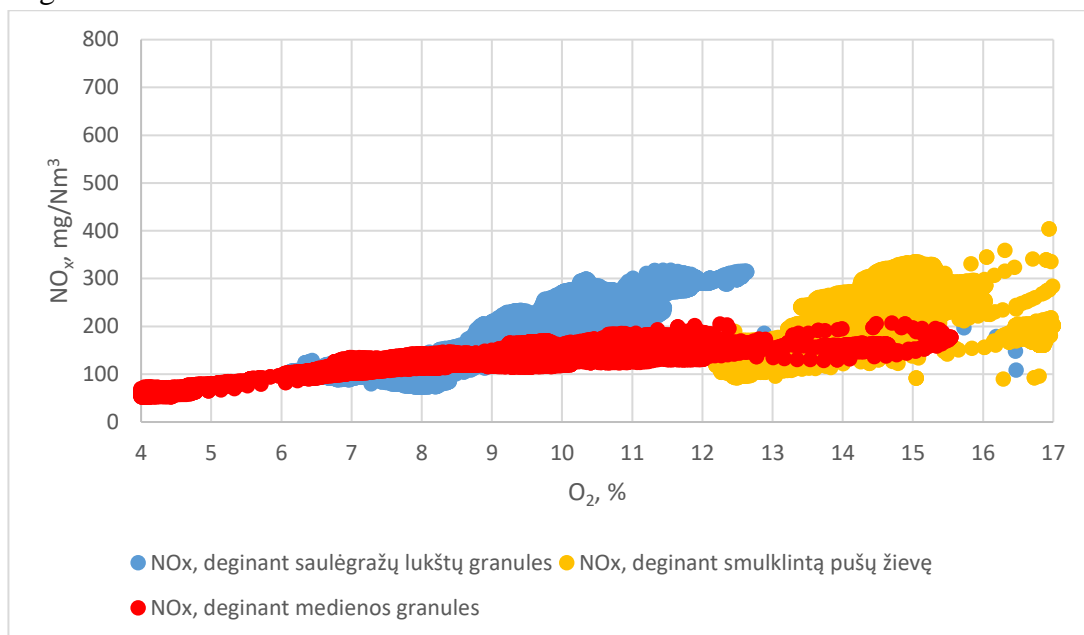
41 pav. Teršalų emisijų vidurkiai keičiantis degimo sąlygomis, deginant medienos granules

42 paveiksle matome, jog NO_x svyravimai buvo nuo 52 iki 207 mg/Nm³. Mažiausias NO_x kiekis buvo užfiksuotas, kai pirminis oras paduodamas po ardynu, antrinis su DR per 3÷7 angas (O₂=6%).



42 pav. NO_x priklausomybė nuo deguonies koncentracijos dūmuose, deginant medienos granules

43 paveiksle matome kaip keičiasi NOx naudotų skirtingų biomasių. Eksperimentiniai tyrimai parodė jog lyginant visas naudotas 3 biomasės rūšis, mažiausiai azoto oksidų išmesime naudojant medienos granules.



43 pav. NOx priklausomybė nuo deguonies koncentracijos dūmuose, lyginant visas 3 biomasės

Išvados

1. Atlikus mokslinių straipsnių analizę matomas ryškus orų perskirstymo ir dūmų recirkuliacijos metodų efektyvumas mažinant azoto oksidų emisijas. Pritaikius orų laipsniavimo strategijas analizuotame straipsnyje buvo pasiekta 50 % CO sumažėjimas ir pastebimas 37 % NO_x sumažėjimas. Dūmų recirkuliacijos metodas nebuvo toks efektyvus, kaip orų perskirstymo, NO_x kiekis sumažėja, bet neryškiai, taip pat mažėja terminių NO_x susidarymo galimybė, kadangi aušinama liepsna, tačiau padidėja CO išmetimo kiekiai.
2. Eksperimentiniai tyrimai buvo atliekami naudojant dvejus eksperimentinius stendus. Pirmas stendas yra KTU degimo procesų laboratorijoje, katilo nominali galia 17 kW, darbinis vandens slėgis 2 bar, darbinė temperatūra iki 95°C. Antras stendas labai panašus į pirmąjį, šio katilo galia 19 kW, darbinis slėgis 2 bar, vienas išskirtinumas jog šiame stende yra sumontuotas reaktorius, kuris leidžia iki 4,8 s išlaikyti adiabatines sąlygas, kurios reikalingos selektyvinėms nekatalitinėms reakcijoms įvykti.
3. Eksperimentiniai tyrimai atliekami deginant įvairių rūšių kurą (granules, smulkintą pušies žievę), matavimai atliekami sudarant skirtingas degimo sąlygas, pakeitus tam tikrus parametrus ar orų padavimo vietas, prijungus dūmų recirkuliaciją į pirminį ar antrinį orą bei keičiant deguonies koncentraciją šių orų ir DR mišinyje.
4. Azoto oksidų ir kitų teršalų emisijos priklauso nuo daugelio faktorių, tačiau atlikus tyrimus, matome jog NO_x emisijas galime sumažinti naudojant orų perskirstymo ir dūmų recirkuliacijos metodus. Deginant saulėgrąžų lukštų granules mažiausios vidutinės NO_x emisijos (80,9 mg/Nm³) buvo pasiektos, kai antrinis oras (debitas 12 m³/h) buvo paduodamas virš pakuros arkos (23-27 angos), dūmų recirkuliacija virš kuro sluoksnio (3-7 angos), deguonies koncentracija dūmų recirkuliacijoje 12%. Naudojant smulkintas pušų žievės mažiausios vidutinės NO_x emisijos (152 mg/Nm³) buvo pasiektos, kai pirminis oras paduodamas po ardynu, antrinis oras kartu su DR per 3-7 angas, deguonies koncentracija antrinio oro ir DR orų mišinyje 14,6 %. Deginant medienos granules mažiausias vidutinis NO_x kiekis (62,62 mg/Nm³) buvo pasiektas, kai pirminis oras buvo paduodamas po ardynu, o antrinis kartu su dūmų recirkuliacija virš kuro sluoksnio per 3-7 angas, deguonies koncentracija orų mišinyje 6%, tačiau esant tokioms degimo sąlygoms ryškiai padidėja CO emisijos. Mažiausią kiekį azoto oksidų užfiksavome deginant medienos granules.

Literatūros sąrašas

1. LIETUVOS RESPUBLIKOS APLINKOS MINISTRO ĮSAKYMAS. Dėl išmetamų teršalų iš vidutinių kurą deginančių įrenginių normų patvirtinimo. 2017 rugsėjo 18 d. D1-778 [interaktyvus] [žiūrėta 2024-04-15]. Prieiga per: <https://www.etar.lt/portal/lt/legalAct/df291a809e9811e79127a823199cc174>
2. LIETUVOS RESPUBLIKOS APLINKOS MINISTRO ĮSAKYMAS. Dėl išmetamų teršalų iš kurą deginančių įrenginių normų LAND 43-2013 patvirtinimo. 2013 balandžio 10 d. D1-244 [interaktyvus] [žiūrėta 2024-04-15]. Prieiga per: <https://www.etar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.A616A3C01CAD>
3. EUROPOS PARLAMENTO IR TARYBOS DIREKTYVA (ES) 2016/2284. 2016. Prieiga per: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=CELEX:02016L2284-20240206>
4. AL-OMARI, S. A. B. Evaluation of the biomass “date stones” as a fuel in furnaces: A comparison with coal combustion. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2009, 36 (9), 956-96.
5. WILLIAMS, A., J.M. JONES, L. MA and M. POURKASHANIAN. Pollutants from the combustion of solid biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2012, 38, 113–137.
6. YIN, C., L. A. ROSENDAHL and S. K. KÆR. Grate-firing of biomass for heat and power production. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2008, 34, 725–754.
7. GOHLKE, O., T. WEBER, P. SEGUIN and Y. LABOREL. A new process for NO_x reduction in combustion systems for the generation of energy from waste. *Waste Management*. 2010, 30, 1348-1354.
8. REN, Q. and C. ZHAO. Evolution of fuel-N in gas phase during biomass pyrolysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015, 50, 408–418.
9. Doc., dr. Kęstutis Buinevičius *Aplinkosauga energijos gamyboje*. 2022. modulio medžiaga. [žiūrėta 2024-03-15].
10. Ehsan Houshfar, Øyvind Skreiberg, Terese Løvås NO_x emission reduction by staged combustion in a grate fired multi-fuel reactor. 2011.
11. Ravi K. Srivastava, Robert E. Hall, Sikander Khan, Kevin Culligan, Bruce W. Lani *Nitrogen Oxides Emission Control Options for Coal-Fired Electric Utility Boilers*. 2005. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/7508442_Nitrogen_Oxides_Emission_Control_Options_for_Coal-Fired_Electric_UTILITY_Boilers
12. Europos parlamento ir tarybos direktyva (ES) 2015/2193 2015 m. lapkričio 25d. Prieiga per: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=CELEX%3A32015L2193>
13. OZAROVSKIS, Darius. Akustinio ciklono tyrimas: daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius: VGTU Technika, 2012.
14. HOUSHFAR, E., Ø. SKREIBERG, D. TODOROVIC, A. SKREIBERG, T. LØVÅS, A. JOVOVIC and L. SØRUM. NO_x emission reduction by staged combustion in grate combustion of biomass fuels and fuel mixtures. *Fuel*. 2012, 98, 29-40.

15. HOUSHFAR, E., Ø. SKREIBERG, D. TODOROVIC, A. SKREIBERG, T. LØVÅS, A. JOVOVIC and L. SØRUM. Effect of Excess Air Ratio and Temperature on NO_x Emission from Grate Combustion of Biomass in the Staged Air Combustion Scenario. *Energy Fuels*. 2011, 25, 10, 4643–4654.
16. KHODAEI, H., F. GUZZOMI, D. PATIÑO, B. RASHIDIAN and G. H. YEOH. Air staging strategies in biomass combustion-gaseous and particulate emission reduction potentials. *Fuel Processing Technology*. 2017, 157, 29-41.
17. Qun Chen, Xiaohui Zhang, Jue Zhou, Vida N. Sharifid, Jim Swithenbank. Effects of Flue gas Recirculation on Emissions from a Small Scale Wood Chip Fired Boiler. *Energy Procedia*. 2015, 65-68.
18. Zhang, X., Chen, Q., Bradford, D., et al. Experimental and mathematical modelling of wood chip combustion in a moving grate boiler. *Fuel Processing Technology*. 2010, 91, 1491-1499.
19. Yang Y.B., Newman R., Sharifi V., Swithenbank J., Ariss J., Mathematical modelling of straw combustion in a 38 MWe power plant furnace and effect of operating conditions, *Fuel*. 2007, 86 129-142.
20. G. Jomantas, K. Buinevičius. NO_x, SO₂ and H₂S emissions reduction by primary measure of air staging. *Environmental issues and operation of energy facilities*. 2022, 98-102.
21. Adolfas Jančauskas and Kęstutis Buinevičius. Combination of Primary Measures on Flue Gas Emissions in Grate-Firing Biofuel Boiler. *Energies*. 2021, 14, 793.
22. G. Jomantas. K. Buinevičius. The Effect of Mixing Recirculated Flue Gas with Primary or Secondary Air during Biomass Combustion in Grate-Firing Boiler as the Primary Measure for NO_x Reduction. *Mechanika*. 2022, 447-454.
23. D. Martuzevičius, K. Buinevičius, V. Kaunelienė, I. Karaliūnaitė. Mokslinis medienos kompozitų (plokščių) gamybos ir naudojimo atliekų panaudojimo įvairaus pajėgumo kurą deginančiuose įrenginiuose, įskaitant naudojamus namų ūkiuose būstams šildyti, galimybių įvertinimas, siekiant nustatyti kietojo kuro kokybės rodiklius, galutinių darbo rezultatų ataskaita. 2019, 24-30.
24. Zia ur Rahman, Ma Daoyang, Wang Xuebin, Ma Wenchao, Huapeng Cui, Houzhang Tan, Hrvoje Mikulcic. Enhanced NO_x reduction through reburning of potassium chloride doped biomass at intermediate temperature in oxy-biomass combustion. *Journal of the Energy Institute*. 2024
25. Ehsan Houshfar, Øyvind Skreiberg, Dušan Todorovic, Alexandra Skreiberg, Terese Løvås, Aleksandar Jovovic, Lars Sørum. NO_x emission reduction by staged combustion in grate combustion of biomass fuels and fuel mixtures. *Fuel*. 2012, 29-40
26. A. Jančauskas, K. Buinevičius. Grate-Firing Boilers Grate Movement Impact onto NO_x, SO₂ Emissions. *Mechanika*. 2020, 503-510.
27. T. Rogaumea, M. Auzanneau, F. Jabouillea, J.C. Goudeau, J.L. Torerob. The effects of different airflows on the formation of pollutants during waste incineration. *Fuel*. 2002, 2277-2288.
28. Pin-Wei Li, Chien-Song Chyang. A comprehensive study on NO_x emission and fuel nitrogen conversion of solid biomass in bubbling fluidized beds under staged combustion. *Journal of the Energy Institute*. 2020, 324-334.

29. Oliver Gohlke, Toralf Weber, Philippe Seguin, Yann Laborel. A new process for NO_x reduction in combustion systems for the generation of energy from waste. *Waste Management*. 2010, 1348-1354
30. Roger Salzmann, Thomas Nussbaumer. Fuel Staging for NO_x Reduction in Biomass Combustion: Experiments and Modeling. *Energy & Fuels*. 2001, 575-582