



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

Dominykas Pabarčius

NO_x EMISIJOS MAŽINIMAS SUDARANT REDUKCINĘ
APLINKĄ

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Kęstutis Buinevičius

KAUNAS, 2017

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

NO_x EMISIJOS MAŽINIMAS SUDARANT REDUKCINĘ
APLINKĄ

Baigiamasis magistro projektas
Termoinžinerija (kodas 621E30001)

Vadovas

(parašas) Doc. dr. Kęstutis Buinevičius
(data)

Recenzentas

(parašas) Doc. dr. Egidijus Puida
(data)

Projektą atliko

(parašas) Dominykas Pabarčius
(data)

KAUNAS, 2017

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

Tvirtinu:
Šilumos ir atomo energetikos
katedros vedėjas

(parašas, data)
Doc. dr. E. Puida

(vardas, pavardė)

MAGISTRANTŪROS UNIVERSITETINIŲ STUDIJŲ BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS
Studijų programa TERMOINŽINERIJA

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

1. Darbo tema **NO_x emisijos mažinimas sudarant redukcinę aplinką**.....
Patvirtinta 2017 m. balandžio mėn. 21 d. dekanu įsakymu Nr. V25-11-8.....
2. Darbo tikslas: **Ištirti azoto oksidų susidarymo dėsningumus deginant daug azoto turintį kurą, bei eksperimentiškai išanalizuoti azoto oksidų mažinimo metodų efektyvumą, naudojant išmetamųjų dujų recirkuliaciją, vandens garo tiekimą į pakurą ir SNKV technologiją, t.y. sukuriant redukcinę aplinką**.....
3. Darbo struktūra: **Įvadinė dalis: darbo tikslas, uždaviniai, literatūros apžvalga; Tyrimų metodika: stendo aprašymas, naudojamas kuras, duomenų apdorojimo metodika, tyrimų vykdymo metodika, matavimų automatizavimas; Tyrimų rezultatai: įvairių NO_x mažinimo metodų tyrimai; Išvados; Literatūros sąrašas**.....
4. Reikalavimai ir sąlygos: **Eksperimentiniai tyrimai atliekami Kauno technologijos universiteto kuro degimo procesų laboratorijoje, deginant biokurą. Gauti duomenys apdorojami ir analizuojami. Nustatomas įvairių NO_x mažinimo metodų efektyvumas**.....
5. Užbaigto darbo pateikimo terminas: 2017 m. gegužės mėn. 23 d.
6. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo darbo dalis.

Išduota studentui **Dominykui Pabarčiui**.....
Užduotį gavau **Dominykas Pabarčius** 2017-02-02
(studento vardas, pavardė) *(parašas)* *(data)*

Vadovas **doc. Kęstutis Buinevičius**

..... 2017-02-02
(pareigos, vardas, pavardė) *(parašas)* *(data)*



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

(Fakultetas)

Dominykas Pabarčius

(Studento vardas, pavardė)

Terminžinerija , 621E30001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „NO_x emisijos mažinimas sudarant redukcinę aplinką“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. gegužės _____ d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Dominyko Pabarčiaus** baigiamasis projektas tema „NO_x emisijos mažinimas sudarant redukcinę aplinką“ 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)

Pabarčius, Dominykas. NO_x emisijos mažinimas sudarant redukcinę aplinką. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Kęstutis Buinevičius; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: Energijos inžinerija

Reikšminiai žodžiai: NO_x mažinimas, biomasė, deginimas, degūs priedai

Kaunas, 2017. 56 p.

SANTRAUKA

Aplinkosauginės direktyvos vis griežtėja, todėl šiuo metu yra labai aktualu rasti veiksmingus metodus, kurie padėtų efektyviai sumažinti NO_x koncentracijas pramoninių katilų išmetamuosiuose dūmuose.

Šis darbas pristato atliktus įvairius eksperimentinius NO_x mažinimo metodų tyrimus, bei jų palyginimus, kai deginamos medienos drožlių plokščių (MDP) granules pramoninio prototipo katile temperatūrų intervale 1000 – 1200 °C.

Pirmoje darbo dalyje trumpai apžvelgti azoto oksidų susidarymo mechanizmai bei pagrindiniai azoto oksidų mažinimo metodai (tiek pirminiai, tiek antriniai). Antroje darbo dalyje aprašyta tyrimų eiga, jų vykdymo metodika, laboratorinis stendas, bei kita naudojama įranga.

NO_x mažinimo metodai, kurie buvo naudojami: recirkuliacinių (REC) dūmų tiekimas į pakurą, vandens garo įpurškimas į pakurą, tradicinių ir degių priedų naudojimas taikant SNKV technologiją. Degūs priedai, kurie buvo naudojami tyrimams: CH₄, C₂H₂ ir C₃H₈/C₄H₁₀ mišinys. Amoniakas NH₃ buvo pasirinktas kaip tradicinis priedas, kuris dažniausiai naudojamas SNKV technologijoje. Šio darbo tikslas yra išanalizuoti aukščiau paminėtų azoto oksidų mažinimo metodų efektyvumą. Šio tyrimo metu buvo matuojamos NO_x ir CO koncentracijos išmetamuosiuose katilo produktuose.

Baigiamojoje šio darbo dalyje apžvelgiami, grafiškai atvaizduojami ir apibendrinami gauti eksperimentų rezultatai. Lygindami priedų poveikį NO_x koncentracijų mažinimui, matome, kad NH₃ priedai sumažina NO_x koncentracijas iki 56 %. Degūs priedai gali sumažinti iki 76 % NO_x emisijų išmetamosiose dujose. Recirkuliacinių dūmų arba vandens garo tiekimas į pakurą nežymiai sumažina azoto oksidų koncentracijas.

Apžvelgus rezultatus galime teigti, kad degūs priedai gali pakeisti tradicinius NO_x mažinimo priedus SNKV technologijoje ir ši technologija gali būti paprastai integruota į esamus katilus.

Pabarčius, Dominykas. Decreasing of NO_x Emission by Forming Reduction Surrounding. Master's thesis / supervisor doc. dr. Kęstutis Buinevičius; The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Research area and field: Energy Engineering

Key words: NO_x reduction, biomass, burning, flammable additives

Kaunas, 2017. 56 p.

SUMMARY

Directives of pollution reducing are getting stricter, so we are in need to find effective methods to reduce NO_x in the industrial boilers exhaust gases.

This study presents an experimental investigation of various NO_x reduction methods while burning wood panel chip pellets on industrial prototype boiler in temperature range of 1000 – 1200 °C.

At the first part of the work the nitrogen oxides formation mechanisms and basic nitrogen oxides reduction methods (both primary and secondary) are briefly reviewed. The second part describes process and methodology of the research, laboratory stand and other equipment which was used during research.

NO_x reduction methods that were used: exhaust gas recirculation (EGR) through the furnace, steam injection to the furnace, traditional and flammable additives usage in the SNCR technology. Flammable additives used in the research: CH₄, C₂H₂ and mixture of C₃H₈ and C₄H₁₀. Ammonia NH₃ was selected as the traditional additive, which is mostly used in the SNCR technologies. This work assesses the influence of NO_x reduction by above mentioned methods. NO_x and CO concentrations in flue gas were measured during this research.

Results of the experiments are shown and described at the final part of this work. Comparing the effects of additives in NO_x reduction while burning furniture production waste showed that NH₃ additives reduces primary NO_x by 56 %. Flammable additives can reduce up to 76 % NO_x emissions in exhaust gases. Exhaust gas recirculation (EGR) through the furnace or steam injection to the furnace reduces NO_x concentrations only slightly.

Results showed that SNCR technology with flammable additives can change traditional NO_x reduction additives and this technology can be easily installed into existing boilers.

TURINYS

ĮVADAS.....	11
1 DARBO TIKSLAS IR LITERATŪROS APŽVALGA	12
1.1 Darbo tikslas ir uždaviniai.....	12
1.2 Azoto oksidų susidarymas	12
1.3 Azoto oksidų mažinimo būdai.....	15
1.3.1 Pirminės priemonės.....	16
1.3.2 Antrinės priemonės	17
2 TIRIAMOJO DARBO METODIKA.....	21
2.1 Laboratorinis degimo stendas.....	21
2.2 Tyrimuose naudojamas biokuras	24
2.3 Dūmų recirkuliacinis kontūras.....	25
2.4 Vandens garo tiekimas į pakurą.....	27
2.5 Degiųjų priedų tiekimas į pakurą.....	28
2.6 Dūmų analizės įranga	29
2.7 Matavimų automatizavimas.....	30
2.7.1 Kuro padavimas	30
2.7.2 Pirminio ir antrinio oro padavimo matavimai.....	32
2.7.3 Techniniai kuro degimo skaičiavimai.....	35
3 TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ ANALIZĖ	38
3.1 I-ojo etapo bazinis NO _x koncentracijų dūmuose tyrimas.....	38
3.2 NO _x koncentracijų mažinimas tiekiant REC dūmus į pirminio/antrinio oro padavimo zoną.....	39
3.3 NO _x koncentracijų mažinimas purškiant vandens garą į antrinio oro padavimo zoną.....	41
3.4 II-ojo etapo bazinis NO _x koncentracijų dūmuose tyrimas	42
3.5 SNKV technologijos pritaikymas naudojant tradicinius priedus	43
3.6 SNKV technologijos pritaikymas naudojant degius priedus.....	46
3.7 Azoto oksidų mažinimo efektyvumo palyginimas	51
IŠVADOS.....	54
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	55

Paveikslų sąrašas

1.3.1.1 pav. Pirminės azoto oksidų koncentracijos mažinimo priemonės [13].	17
1.3.2.1 pav. Selektyvusis katalitinis redukavimo būdas [14].	18
1.3.2.2 pav. Selektyvusis nekatalitinis dūmų valymas naudojant amoniakinį vandenį [14].	20
2.1.1 pav. Laboratorinis degimo stendas.	21
2.1.2 pav. Kuro padavimo bunkeris su šneku.	22
2.1.3 pav. Pakuros ir katilo principinis vaizdas.	22
2.1.4 pav. Valdymo spinta.	23
2.2.1 pav. Įvairių kuro rūšių azoto kiekio palyginimas naudojamojoje masėje.	25
2.3.1 pav. a) buitinis dujinis katilas; b) REC dūmų kontūras; c) degimo stendas.	26
2.3.2 pav. REC dūmų sudėties bei greičio matavimas.	26
2.4.1 pav. Garo generatorius Kärcher SC 1402.	27
2.4.2 pav. Į antrinio oro padavimo angą įkištas garo generatoriaus antgalis.	27
2.5.1 pav. Antrinio oro tiekimo vamzdžio ruožas, per kurį kartu su oru tiekiamos degios dujos.	28
2.6.1 pav. Dūmų analizatorius Multilyzer NG.	29
2.6.2 pav. Į dūmtakį įkištas dūmų analizatoriaus zondas.	30
2.7.1.1 pav. Kuro padavimų matavimų rezultatai. Našumo priklausomybė nuo kuro padavimo santykinio dažnio.	31
2.7.2.1 pav. Oro greičio matavimas anemometru Mini Air 20.	32
2.7.2.2 pav. Pirminio oro matavimų rezultatai. Tūrinio debito priklausomybė nuo pirminio oro ventiliatoriaus sukimosi santykinis dažnis.	33
2.7.2.3 pav. Antrinio oro matavimų rezultatai. Tūrinio debito priklausomybė nuo sklendės atidarymo padalos vertės.	35
3.1.1 pav. NO _x ir CO koncentracijų priklausomybė nuo deguonies, deginant MDP granules.	39
3.2.1 pav. NO _x ir CO koncentracijų priklausomybė nuo deguonies kiekio REC dūmuose, deginant MDP granules, kai REC dūmai tiekiami į pirminio oro padavimo zoną.	40
3.2.2 pav. NO _x ir CO koncentracijų priklausomybė nuo deguonies kiekio REC dūmuose, deginant MDP granules, kai REC dūmai tiekiami į antrinio oro padavimo zoną.	41
3.3.1 pav. NO _x ir CO koncentracijų išmetamuose dūmuose priklausomybės nuo tiekiamo garo našumo.	42
3.4.1 pav. NO _x ir CO koncentracijų priklausomybė nuo deguonies, deginant MDP granules.	43

3.5.1 pav. NO _x ir CO koncentracijų priklausomybė nuo deguonies, deginant MDP granules, kai naudojamas priedas NH ₃	44
3.5.2 pav. NO _x ir CO koncentracijų priklausomybė nuo deguonies, deginant MDP granules, kai naudojamas priedas NH ₂	45
3.5.3 pav. NO _x priklausomybė nuo tradicinio priedo masės santykio su paduodamu kuru.	46
3.6.1 pav. NO _x ir CO koncentracijų priklausomybė nuo deguonies, deginant MDP granules, kai naudojamas priedas C ₃ H ₈ /C ₄ H ₁₀	47
3.6.2 pav. NO _x ir CO koncentracijų priklausomybė nuo priedo ir kuro energijos santykio, deginant MDP granules, kai naudojamas priedas C ₃ H ₈ /C ₄ H ₁₀	47
3.6.3 pav. NO _x ir CO koncentracijų priklausomybė nuo deguonies, deginant MDP granules, kai naudojamas priedas CH ₄	48
3.6.4 pav. NO _x ir CO koncentracijų priklausomybė nuo priedo ir kuro energijos santykio, deginant MDP granules, kai naudojamas priedas CH ₄	49
3.6.5 pav. NO _x ir CO koncentracijų priklausomybė nuo deguonies, deginant MDP granules, kai naudojamas priedas C ₂ H ₂	49
3.6.6 pav. NO _x ir CO koncentracijų priklausomybė nuo priedo ir kuro energijos santykio, deginant MDP granules, kai naudojamas priedas C ₂ H ₂	50
3.7.1 pav. NO _x sumažinimo efektyvumo palyginimas taikant degius ir tradicinius priedus. NO _x koncentracijos priklausomybė nuo kuro masės santykio tiekiamo į degimo kamerą.....	52
3.7.2 pav. NO _x sumažinimo efektyvumo palyginimas tiekiant degias dujas. NO _x koncentracijos priklausomybė nuo priedo ir kuro energijos santykio.....	53

Lentelių sąrašas

2.2.1 lentelė. Naudojamo kuro sudėtis ir šilumingumas.	24
2.5.1 lentelė. Degių priedų charakteristikos.	28
2.7.1.1 lentelė. Kuro padavimo matavimų rezultatai.....	31
2.7.2.1 lentelė. Pirminio oro matavimų rezultatai.	33
2.7.2.2 lentelė. Antrinio oro matavimų rezultatai.....	34
2.7.3.1 lentelė. Techninių kuro degimo skaičiavimų įvesties duomenys.	35
2.7.3.2 lentelė. Techninių kuro degimo skaičiavimų rezultatai.....	36

Santrumpos ir žymėjimai

- AEI – Atsinaujinantys energijos ištekliai
REC – Recirkuliaciniai dūmai
SKV – Selektyvus katalitinis dūmų valymas
SNKV – Selektyvus nekatalitinis dūmų valymas
DKDI – Didelis kurą deginantis įrenginys
MDP – Medienos drožlių plokštės
KD – Kietosios dalelės
NO_x – Azoto oksidai
NO – Azoto monoksidas
NO₂ – Azoto dioksidas
CO – Anglies monoksidas
CO₂ – Anglies dioksidas
CH₄ – Metanas
C₂H₂ – Acetilenas
C₃H₈/C₄H₁₀ – Propano/butano mišinys
NH₃ – Amoniakas
NH₂ – Amidinis azotas
N₂ – Ore esantis molekulinis azotas
O₂ – Deguonis
Cⁿ – Anglies kiekis naudojamoje kuro masėje, %
Hⁿ – vandenilio kiekis naudojamoje kuro masėje, %
Sⁿ_d – Sieros kiekis naudojamoje kuro masėje, %
Oⁿ – Deguonies kiekis naudojamoje kuro masėje, %
Nⁿ – Azoto kiekis naudojamoje kuro masėje, %
Aⁿ – Mineralinių priemaišų kiekis naudojamoje kuro masėje, %
Wⁿ – Drėgmės kiekis naudojamoje kuro masėje, %
Q_ž – Kuro žemutinė šiluminė vertė, kJ/kg
α – Oro pertekliaus koeficientas

IVADAS

Viena svarbiausių problemų, šiuo metu jaudinančių visuomenę, susijusi su mus supančios aplinkos kokybės blogėjimu. Visais savo evoliucijos laikais žmogus buvo glaudžiai susijęs su aplinka, tačiau nuo to laiko, kai atsirado industrinė visuomenė, žmogaus žalinga įtaka gamtai labai padidėjo, išsiplėtė šios įtakos mastas, ji tapo labai įvairi ir dabar grasina tapti globaliniu pavojumi žmogui [1].

Teršalų išmetimai į atmosferą iš energetikos ir pramonės objektų, po transporto, užima antrąją vietą pagal svarbą, todėl šių išmetimų mažinimas yra vienas iš nacionalinių aplinkos apsaugos prioritetų.

Brangstant ir senkant tradicinio iškastinio kuro ištekliams bei didėjant susirūpinimui klimato kaita, vis daugiau dėmesio yra skiriama atsinaujinančių išteklių energetikai ir jos plėtrai. Pasaulyje energijos gamybai vis plačiau naudojami atsinaujinantys energijos ištekliai (AEI) ir ypač biokuras. Ieškant pigesnės energijos gamybos pradėtos naudoti ir alternatyvios biokuro rūšys, tokios kaip: biologiškai skaidžios atliekos, komunalinės atliekos, gamybinės atliekos, žemės ūkio atliekos, nuotekų valymo dumblas, sodų, parkų ir želdynų priežiūros atliekos. Deginant tokio tipo kurą išsiskiria žymiai didesnės teršalų koncentracijos, todėl iškyla poreikis gilesnei teršalų išmetimo į aplinką mažinimo analizei [2, 3].

2016 sausio 1 d. įsigaliojo naujoji Europos Parlamento ir Tarybos direktyva 2010/75/ES, kurioje sugriežtintos teršalų, išmetamų iš didelių deginimo įrenginių (DKDĮ), normos. DKDĮ yra tokie įrenginiai, kurių bendra nominali šiluminė galia yra lygi arba didesnė kaip 50 MW. Taip pat 2015 m. priimta nauja direktyva vidutinės galios įrenginiams (galia nuo 1 iki 50 MW). Šios direktyvos reikalavimai įsigalios nuo 2018 metų gruodžio 20 d. ir jie yra žymiai griežtesni už dabar Lietuvoje galiojančias normas vidutinės galios katilams LAND 43-2013. Išmetamų teršalų iš kurą deginančių įrenginių normos LAND 43-2013 nustato kurą deginančių įrenginių išmetamųjų dujų šalinimo per kaminą reikalavimus, į aplinkos orą išmetamo sieros dioksido (SO₂), azoto oksidų (NO_x), anglies monoksido (CO) ir kietųjų dalelių (KD) ribines vertes, jų laikymosi ir kontrolės reikalavimus [2, 4].

Taigi pradiniame šio darbo etape buvo iškelti uždaviniai iširti azoto oksidų susidarymo dėsningumus deginant medienos drožlių plokščių (MDP) granules bei eksperimentiškai išanalizuoti tyrime naudojamų azoto oksidų mažinimo metodų efektyvumą.

1 DARBO TIKSLAS IR LITERATŪROS APŽVALGA

1.1 Darbo tikslas ir uždaviniai

Deginant biokurą azoto oksidai pagrinde susidaro iš kure esančio azoto. Termocheminių reakcijų metu azotas esantis kure atskyla nuo kuro ir susijungia su degimo kameroje esančiu deguonimi taip sudarydamas NO ir NO₂ junginius, bendrai juos įvardinant NO_x.

Kuro azoto oksidų emisiją galima sumažinti valant dūmus arba tiesiogiai veikiant degimą, slopinant jų susidarymą. Dūmų valymas retai naudojama priemonė dėl sudėtingų įrenginių ir brangios technologijos. Dažniausiai naudojamos NO_x mažinimo priemonės: mažas perteklinio oro kiekis, oro laipsniavimas, išmetamųjų dujų recirkuliacija.

Naujose direktyvose teršalų emisijų normos griežtėja net keletą kartų. Griežtėjant aplinkosauginiams reikalavimams nebepakanka šių pirminių azoto oksidų mažinimo priemonių, todėl pradedamos naudoti ir antrinės NO_x mažinimo priemonės selektyvinis katalitinis dūmų valymas bei selektyvinis nekatalitinis dūmų valymas [2, 4].

Šio darbo tyrime atliekami eksperimentai, kai degūs arba tradiciniai SNKV dūmų valymo technologijos priedai ir daug azoto turinti biokuras dega katilė temperatūrų intervale nuo 1000 – 1200 °C [5, 6, 7]. Degūs priedai, kurie buvo naudojami tyrime: CH₄, C₂H₂ ir C₃H₈/C₄H₁₀ mišinys. Amoniakas buvo pasirinktas kaip tradicinis priedas, kuris yra naudojamas su daugelyje SNKV technologijų [8]. Tyrimuose, kaip pagrindinis, naudojamas daug azoto turintis kuras – medienos drožlių plokščių granulės.

Šio darbo tikslas yra ištirti azoto oksidų susidarymo dėsningumus deginant MDP granules bei eksperimentiškai išanalizuoti azoto oksidų mažinimo metodų efektyvumą, naudojant išmetamųjų dujų recirkuliaciją, vandens garo tiekimą į pakurą ir SNKV technologiją, t.y. sukuriant redukcinę aplinką.

1.2 Azoto oksidų susidarymas

Deginant organinį kurą, azoto oksidai susidaro oksiduojantis kure esančiam azotui (surištam su angliavandeniliais C_xH_yN_z) ir degimo ore esančiam molekuliniam azotui (N₂). Molekulinio azoto suskaldymui ir oksidavimui reikalinga aukšta virš 1300 °C temperatūra, todėl deginant gamtines dujas, kuriose nėra surišto azoto, azoto oksidų susidaro mažiau. Deginant skystąjį kurą, prie angliavandenilių prijungtas azotas lengviau atskyla ir oksiduojasi, todėl susidaro didesnis azoto oksidų kiekis.

Deginant kurą, išsiskiriantys azoto oksidai būna trijų skirtingų prigimčių:

- Terminiai azoto oksidai – susidaro degimo proceso metu, oksiduojantis ore esančiam azotui.
- Greitieji azoto oksidai – generuojasi reaguojant atmosferoje esančiam deguoniui su tarpiniais angliavandenilniais radikalais liepsnos fakelo zonoje.
- Kuro azoto oksidai – susidaro iš kure esančio azoto; jų susidarymas priklauso nuo kure esančio azoto ir deguonies kiekio reakcijos aplinkoje.

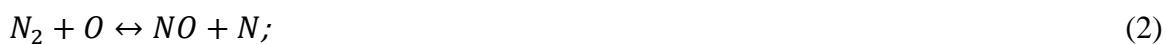
Teoriškai šie trys NO_x susidarymo šaltiniai gali būti atskirai išskaidyti, tačiau praktiškai to padaryti dažnai neįmanoma, dėl to, kad tarpiniai azoto oksidų susidarymo reakcijų produktai yra tam tikru mastu vienodi [9, 10, 11].

Terminiai NO_x

Degimo procese, tose zonose, kuriose temperatūra viršija 1800 K, reaguojant molekuliniam azotui N_2 su ore esančiu deguonimi O_2 , sparčiai pradeda susidaryti NO junginiai. Labai aukštos temperatūros yra reikalingos norint nutraukti stiprų trigubą ryšį azoto molekulėje bei leisti deguonies molekulei disocijuoti į atominį deguonį (1). Būtent dėl šios priežasties, taip susidarantys azoto oksidai ir yra pavadinti terminiais..



Šis terminių azoto oksidų susidarymo būdas iš ore esančio azoto yra apibūdintas globaliai pripažintu J. Zeldovičiaus dviejų žingsnių metodu [11]. Azoto molekulė reaguoja su atominiu deguonimi, kuris susidaro dėl aukštos temperatūros (2). Paskui, cheminėje reakcijoje (2) išsiskyręs atominis azotas reaguoja su deguonies molekule (3). Abejose reakcijose susidaro azoto monoksidas:



Papildoma elementari reakcija (4) dažnai taip pat yra laikoma azoto monoksido kūrimosi mechanizmo dalimi. Tai sukuria modifikuotą arba pratęstą J. Zeldovičiaus modelį, kuris yra naudojamas tuo atveju, kai NO susidarymas iš pirminio J. Zeldovičiaus mechanizmo yra nepakankamai tiksliai įvertinamas.



Terminės NO reakcijos vyksta labai trumpą laiką, t.y. keletą dešimčių mikrosekundžių, ir yra priklausomos nuo temperatūros, gyvavimo trukmės bei deguonies atominės koncentracijos. Dėl savo aukštos aktyvacijos energijos reakcija (2) paprastai priimta laikyti normine ir tai padaro J. Zeldovičiaus modelį jautrų temperatūrai.

Nedidelį NO_x kiekį generuojantys degikliai naudojami žemesnėse nei 1500 °C temperatūrose ir tokiu būdu terminių azoto oksidų indėlis esant bendrai NO_x generacijai yra labai menkas, tačiau lokaliuose aukščiausių temperatūrų pikuose gali prisidėti prie bendrų azoto oksidų emisijų. Dėl reikalingos aukštos temperatūros terminių azoto oksidų susidarymui, degimo procesuose, kuriuose temperatūra yra žymiai mažesnė nei 1300 °C, susidaro pastebimai mažesnės NO_x koncentracijų reikšmės.

Terminiai NO_x laikomi reguliuojamais (kontroliuojamais), nes galima apriboti jų susidarymą degimo technologijomis [9, 10, 11].

Greitieji NO_x

Greitieji azoto oksidai susiformuoja laminarinėse liepsnos zonose, reaguojant atmosferiniam azotui su liepsnoje likusiais nevisiško sudegimo produktais – angliavandenilniais radikalais (C, CH, CH₂ ir kt.). Šį procesą pirmasis aprašė ir analizavo K. Fenimoras [11]. Vykdydamas tyrimus jis pastebėjo, kad fakelo pradinėse zonose azoto oksidų formuojasi pastebimai daugiau nei turėtų. Šis K. Fenimoro modelis vėliau buvo patvirtintas dar kelių mokslininkų, kurie atlikinėjo panašius tyrimus.

Pagrindinės cheminės reakcijos, kurios leidžia numatyti šių greitųjų azoto oksidų formavimąsi angliavandenilinėse liepsnos zonose:



Reakcija (5) yra pati svarbiausia greitųjų azoto oksidų formavimosi metu. Ši reakcija parodo kaip reaguojant degimui reikalingame ore esančiai azoto molekulei su nesudegusiais angliavandenilių radikalais susiformuoja tarpinis junginys HCH. Susidaręs šis junginys toliau gali oksidacijos metu pavirsti į NO arba N₂, priklausomai nuo to, kokio yra vyraujančios sąlygos. Įrodyta, kad HCN turi įtakos maždaug 90 % visų greitųjų azoto oksidų susikūrimui.

Greitieji azoto oksidai yra tiesiogiai proporcingi N₂ koncentracijai ir angliavandenilinių radikalų kiekiui liepsnos zonoje. Kitaip nei terminiai, greitieji azoto oksidai nėra tokie priklausomi nuo temperatūros ir susidaro esant žemesnėms jos vertėms [9, 10, 11].

Kuro NO_x

Kuro NO_x susidaro iš azoto, kuris yra pačiame kure. Priimta laikyti, kad kuro azoto oksidai pradinėje formavimosi eigoje virsta į junginius HCN ir/arba HN₃, kurie toliau sudaro NO ir galiausiai susiskaido į N₂. Šį procesą aprašo tokios cheminės reakcijos:



Lakiųjų medžiagų išsiskyrimo metu kure esantis azotas yra išlaisvinamas. Dalis azoto greitai paverčiama į HCN, o kita, kure likusi azoto dalis, transformuojama į NH₃. Priklausomai nuo toje vietoje esančių sąlygų, toliau šios dvi rūšys reaguoja sudarydamos junginius NO arba N₂. Vykdam heterogenines reakcijas, kuriose dalyvauja anglies dalelėms, susidaręs NO kiekis gali būti sumažintas.

Kuro azoto oksidai, lyginant su kitais jų formavimosi būdais, yra dominuojantys ir sudaro daugiau nei 80 % visų degimo procese susidarantį NO_x. Iš kure esančio azoto susidarantys azoto oksidai formuojasi žymiai paprasčiau ir lengviau, lyginant su terminiais azoto oksidais, nes kure esantis azotas yra susijęs N – C ir N – H ryšiais. Šie ryšiai yra ne tokie patvarūs už ore esančio molekulinio azoto trigubuosius ryšius ir tai leidžia gana lengvai oksiduotis kure esančiam azotui. Energijos kiekis, kuris yra būtinas oksidacijos proceso vyksmui yra net kelis kartus mažesnis, lyginant su terminių oksidų susidarymu, vadinasi, kuro azoto oksidai gali susidaryti žemose temperatūrose.

Dėl to, kad niekaip negalima paveikti kuro azoto oksidų susidarymo, tokios prigimties NO_x yra laikomi nereguliuojamais [9, 10, 11].

1.3 Azoto oksidų mažinimo būdai

NO_x susidarymas priklauso nuo dujų temperatūros ir azoto kiekio kure, kas ir nusako NO_x susidarymo kelius. Terminiai NO_x susidarymas gali būti kontroliuojamas sumažinus liepsnos temperatūrą (pvz.: ribojamas degimo kameros apkrovimas). NO_x koncentracija degimo dūmuose mažėja kartu su oro pertekliumi. Katilo dydis taip pat turi įtakos NO_x koncentracijai.

Visos azoto oksidų mažinimo priemonės skirtos iš dalies pakeisti degimo parametrus katile ir yra skirstomos į dvi pagrindines kategorijas:

1. pirminės priemonės – degimo modifikacijos, kurios mažina azoto oksidų susidarymą degimo metu;
2. antrinės priemonės – jau susidarę azoto oksidai redukuojami į elementinį azotą prieš jiems paliekant katilą.

1.3.1 Pirminės priemonės

Yra žinoma visa eilė techniškai išbandytų procesų ir deginimo technologijos modifikavimo priemonių, siekiant sumažinti azoto oksidų susidarymą: oro kiekio padavimo į kūryklą, liepsnos temperatūros, kuro ir oro proporcijų mišinyje kontrolė ir panašiai.

Naudojama daug įvairių pirminių priemonių (degimo modifikacijų), kuriomis gali būti mažinamas azoto oksidų susidarymas degimo procese.

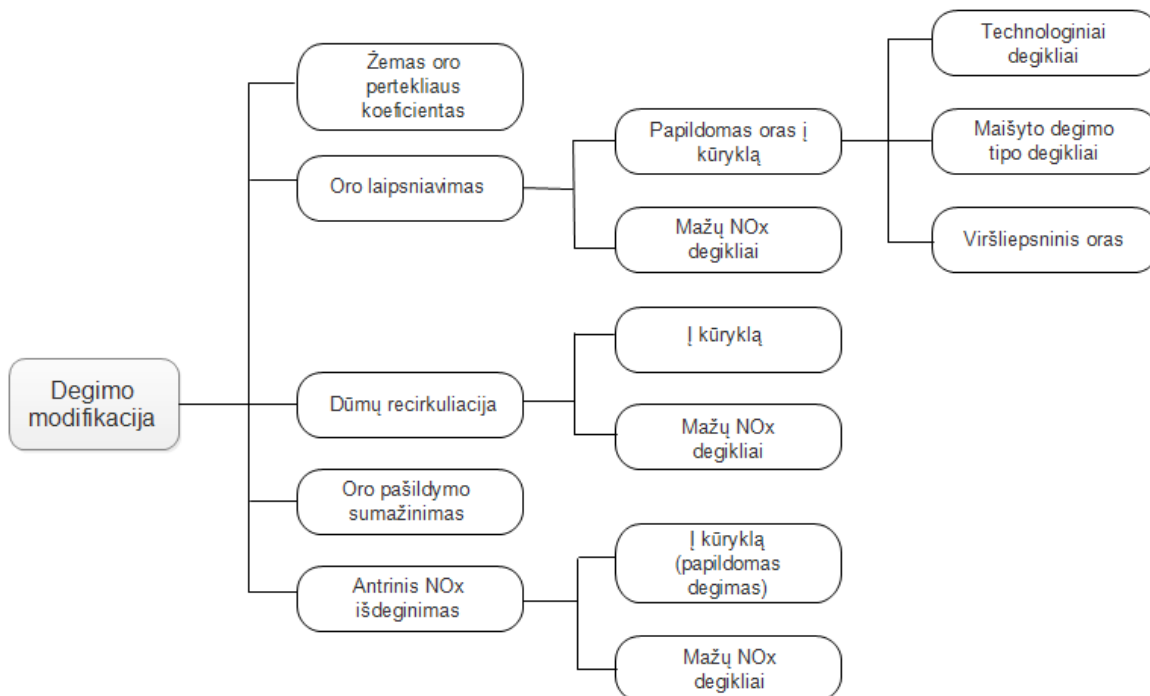
Degimo modifikacijos – tai tokie degimo proceso modifikavimo metodai, kurie yra naudojami degimo proceso pagerinimui (pvz. siekiant pilno sudegimo), gali būti naudojami ir kaip pirminės priemonės kenksmingų teršalų koncentracijų išmetamuosiuose degimo produktuose mažinimui [2, 13].

Naudojamo kuro pakeitimas į tokį, kuris generuoja mažesnes teršalų koncentracijas yra pats paprasčiausias metodas, leidžiantys efektyviai mažinti kenksmingų teršalų emisijas (kurą pakeisti skystuoju ar dujiniu, arba skystą dujiniu). Taigi, mažiau sieros, azoto, anglies, gyvsidabrio ir kt. medžiagų turinčio alternatyvaus kuro pasirinkimas turėtų būti priimama kaip tinkamiausia pirminė priemonė.

Pirminiai degimo procesą keičiantys būdai, kurie mažina azoto oksidų susidarymą:

- Degimas esant mažam oro pertekliaus koeficientui
- Oro laipsniavimas
- Tiekiamo degimui oro temperatūros mažinimas
- Dūmų recirkuliacija
- Vandens ar garo įpurškimas į liepsną
- Kuro laipsniškas deginimas
- Mažų NO_x degikliai
- Galios sumažinimas
- kuro deginimo technologijos keitimas – gazifikacija, pirolizė.

Globaliai naudojamos ir pačios pigiausios pirminės azoto oksidų koncentracijų mažinimo priemonės pateiktos 1.3.1.1 pav.



1.3.1.1 pav. Pirminės azoto oksidų koncentracijos mažinimo priemonės [13].

1.3.2 Antrinės priemonės

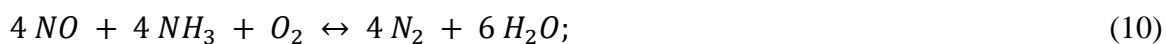
Antrinės azoto oksidų koncentracijų mažinimo technologinės priemonės yra naudojamos jau susiformavusių NO_x pašalinimui iš išeinančių degimo produktų. Prieš naudojant antrines NO_x koncentracijų mažinimo priemones bei metodus, NO_x koncentracijų sumažinimo pradiniam etape visuomet taikomi pirminiai NO_x koncentracijų mažinimo metodai. Visos šiuo metu taikomos dūmų apdorojimo technologijos yra pagrįstos NO_x pašalinimu sausais cheminiais procesais. Šias antrines priemones galima vykdyti nepriklausomai nuo panaudotų pirminių NO_x sumažinimo metodų. Antriniam azoto oksidų kiekio sumažinimui į išmetamųjų dujų srautą įpurškiama amoniako, karbamido ar kito komponento, kuris gali reaguoti su azoto oksidais ir redukuoti juos iki molekulinio azoto. Dažniausiai naudojamos šios antrinės NO_x emisijų mažinimo technologijos [2, 6]:

- Selektyvus katalitinis dūmų valymas (SKV);
- Selektyvus nekatalitinis dūmų valymas (SNKV).

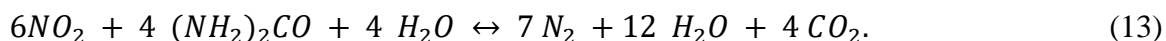
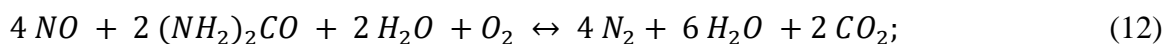
Selektyvus katalitinis dūmų valymas (SKV)

SKV metodas yra grindžiamas tuo, kad degimo produktuose esantis NO_x paverčiamas į vandens garus ir molekulinį azotą, įpurškiant amoniako. Amoniakas įpurškiamas už degimo kameros, kai kuras jau yra sudegęs ir degimo produktų temperatūra yra neaukšta (200 – 400 °C). Degimo produktai prateka pro katalizatorių, kur pašalinami CO ir nesudegę angliavandeniliai, o

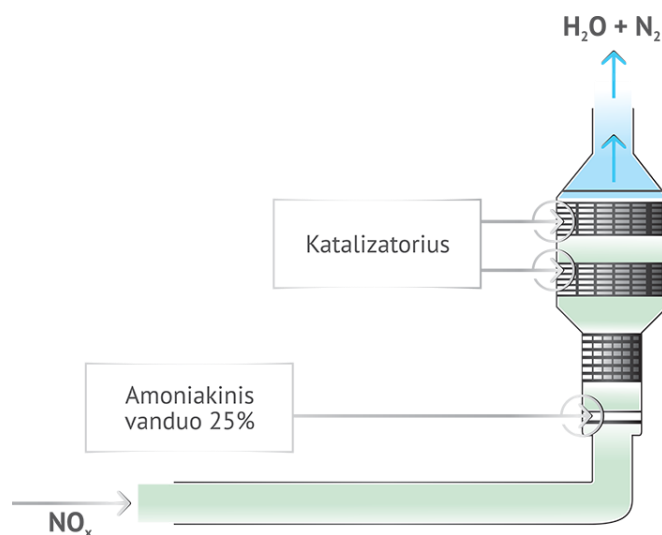
po to sumaišomi su amoniaku. NO_x viršmai vyksta ant katalizatoriaus paviršiaus, esant 300 – 450 °C temperatūrai, vykstant reakcijoms su amoniaku:



arba su karbamiidu:



1.3.2.1 pav. pavaizduotas SKV metodas. Reagentas, 25 % amoniakinis vanduo, šiame procese įpurškiamas ir sumaišomas prieš katalizatorių su degimo produktais (NO_x). Dujų mišinys pereina per katalizatoriaus sluoksnius, kur kenksmingos azoto oksidų dujos paverčiamos nekenksmingomis azoto dujomis (N_2) bei vandens garais [2, 14].



1.3.2.1 pav. Selektyvusis katalitinis redukavimo būdas [14].

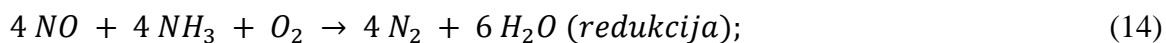
Amoniaiko kiekiui ir tuo pačiu NH_3/NO_x santykiui didėjant, gali iškilti problemų, t.y. per didelis amoniako kiekis degimo produktuose ar pelenuose. Problema gali būti išsprendžiama, naudojant didelio tūrio katalizatorius ar pagerinant NH_3 ir NO_x susimaišymą išmetamosiose dujose. Esant degimo produktuose SO_2 , pradeda formuotis amonio sulfatas, kuris nusėda ant įrengimo dalių (katalizatoriaus, oro pašildytuvų, t.t.). Katalizatoriaus tarnavimo laikas 4 – 5 metai deginant anglį, 7 – 10 metų deginant mazutą ir daugiau kaip 10 metų deginant dujas.

NH_3 lakiuosiuose suodžiuose; amonio druskų formavimasis valesniais technologinio proceso etapais; katalizatoriaus deaktyvavimas; padidėjęs SO_3 iš SO_2 susidarymas.

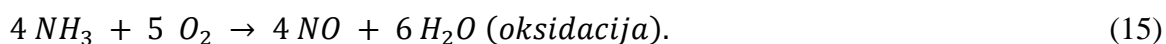
Selektyvus nekatalitinis dūmų valymas (SNKV)

SNKV procesas yra kita antrinė NO_x emisijų mažinimo technologija, joje nenaudojamas katalizatorius. Reakcijos vyksta, esant 850 – 1100 °C temperatūrai. Šios temperatūrinės ribos labai priklauso nuo naudojamo reagento (amoniako, karbamido).

Naudojant amoniaką, degimo produktuose vyksta šios reakcijos:
naudinga:



žalinga:



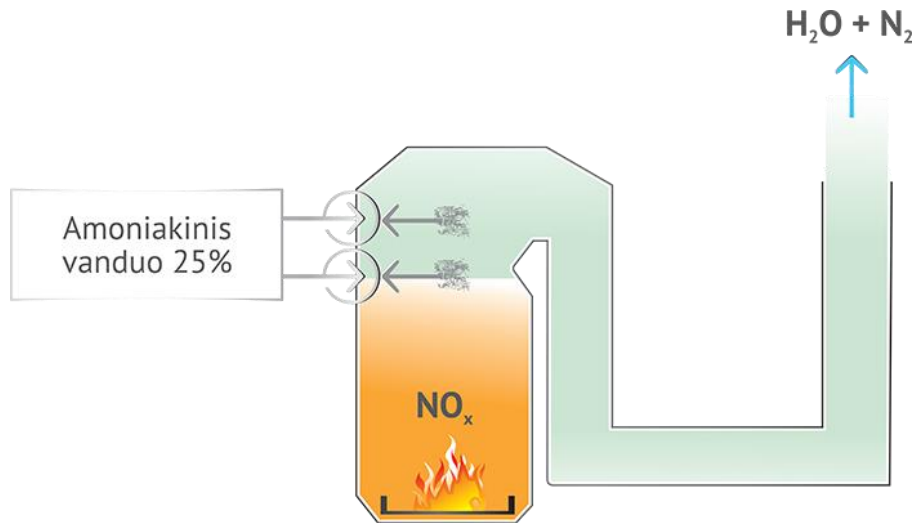
Esant mažesnei kaip 850 °C temperatūrai abi šios reakcijos yra per lėtos todėl neįtakoja NO_x koncentracijų, temperatūrai pakilus virš 1100 °C įsivysta žalinga reakcija ir vietoj NO_x koncentracijų sumažėjimo, jos dar labiau išauga.

SNKV technologiją sudaro dvi pagrindinės dalys:

- reagentų (amoniako, karbamido) saugojimo ir išgarinimo įrengimai;
- reagentų įpurškimo ir dozavimo į katilą įrengimai.

Šioje technologijoje esminį vaidmenį vaidina temperatūrinė zona į kurią įterpiami reagentai ir reagentų prabūvimo laikas šioje zonoje (optimalus 0,2 – 0,5 s). Kaip minėta aukščiau, naudojant amoniaką, jis turi būti įpurškiamas į 850 – 1000 °C temperatūros zoną (optimali 870 °C), o naudojant karbamidą 800 – 1100 °C temperatūros zoną (optimali 1000 °C). Jei didelis kurą deginantis įrenginys (DKDI) dirba pastovia apkrova, tai padaryti nėra sunku, tačiau, keičiantis apkrovai, keičiasi ir temperatūrinių zonų išsidėstymas katilo tūryje todėl yra projektuojamos kelių laipsnių reagentų įpurškimo sistemos, kurios leidžia net kintant apkrovoms reagentus įterpti reikiamoje temperatūroje [2, 6].

1.3.2.2 pav. galime matyti, kad reagentas (25 % amoniakinis vanduo) tiekiamas į degimo kameros viduje išdėstytus įpurškimo elementus. SNKV procesas plačiai taikomas energetikos, stiklo, plieno, naftos perdirbimo, atliekų deginimo, popieriaus ir kitose pramonės šakose. SNKV atveju labai svarbu nustatyti tikslų darbo režimą: optimizuoti reagento įpurškimą į išmetamąsias dujas esant tiksliai apibrėžtai temperatūrai [14].



1.3.2.2 pav. Selektyvnis nekatalitinis dūmų valymas naudojant amoniakinį vandenį [14].

Kitas labai svarbus faktorius užtikrinantis reikiamą NO_x emisijų sumažinimo laipsnį yra amoniako ir NO_x molinis santykis. Kuo šis santykis didesnis (daugiau amoniako tenka vienai NO_x molekulei) tuo pasiekiamas aukštesnis NO_x emisijų sumažinimo laipsnis, tačiau didinant amoniako ir NO_x molinį santykį didėja ir nesureagavusio amoniako koncentracija per kaminą išmetamuose degimo produktuose, kas savo ruožtu didina perkaitintuvų, ekonomizerių ir dūmtakių užnešimą amonio druskomis ir jų koroziją. Optimalus molinis amoniako ir NO_x santykis yra 1,5 – 2,5. Šis reguliavimas pasiekiamas atliekant NH_3 ar NO_x monitoringą degimo produktuose.

Kai kurie gamintojai pateikia NO_x sumažinimo laipsnį net iki 80 %. NH_3 lakiuosiuose suodžiuose; amonio druskų formavimasis valesniais technologinio proceso etapais; galimas N_2O susidarymas [2].

Ekspirimentiniame stende buvo įrengta papildoma įranga tyrimams atlikti panaudojant SNKV technologiją.

2 TIRIAMOJO DARBO METODIKA

2.1 Laboratorinis degimo stendas

Tiriamąo darbo kuro deginimo eksperimentiniai tyrimai atliekami Kauno technologijos universiteto, Šilumos ir atomo energetikos katedros kuro degimo laboratorijoje. Kuro laboratorijoje galima tirti įvairias kuro rūšis, laboratorijoje yra sumontuoti skysto, dujinio ir keli kietojo kuro deginimo katilai. Šiame darbe aktualus kietasis biokuras, kuris buvo deginamas sumontuotame kuro degimo stende (2.1.1 pav.), kurį pagamino ir sumontavo įmonė UAB „Enerstena“. Laboratorinis stendas pagamintas pagal didžiųjų katilų naudojamą darbo schemą ir technologiją, jis atstoja didžiųjų, galingų katilų mažąjį maketą.



2.1.1 pav. Laboratorinis degimo stendas.

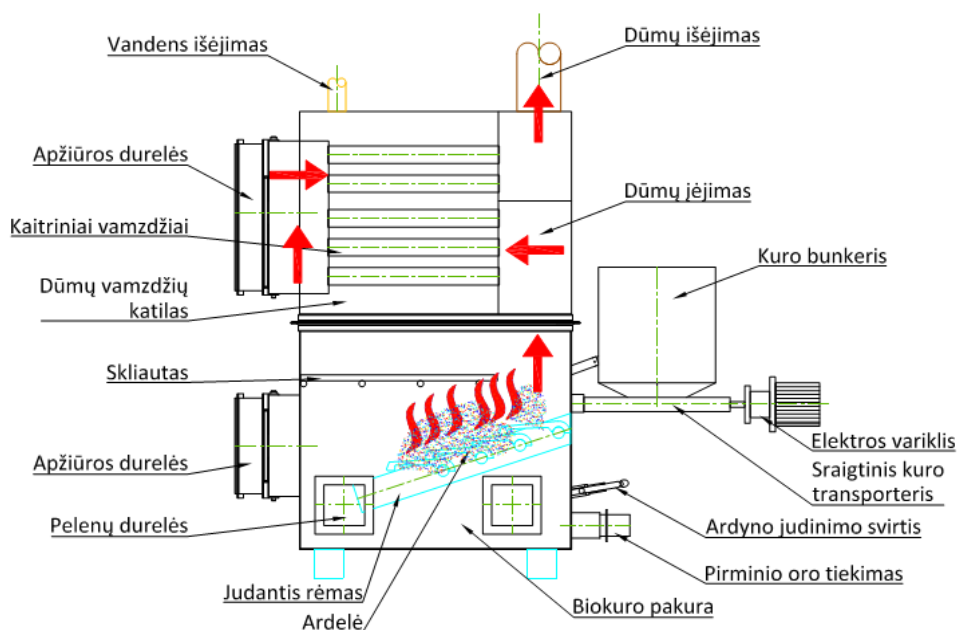
Kuras į pakurą yra paduodamas sraigto pagalba. Jį suka sumontuotas variklis, kuris yra valdomas dažnio keitikliu. Paduodamas į katilą kuras ra kaupiamas kuro bunkeryje, kuris yra sumontuotas katilo gale. Pakura yra komplektuojama su kuro padavimo mechanizmu (bunkeris su sraigtu, žiūr. 2.1.2 pav.), pasvirusiu ardynu, pirminio ir antrinio oro bei dūmų pašalinimo ventiliatoriais, apžiūros durelėmis bei pakuros pelenų šalinimo svirtimi, kuri yra valdoma rankiniu būdu. Iš pakuros į pelenų kaupimo dėžutes pelenai išstumiami pakuroje esančiais skreperiais.

Dūmsiurbis yra naudojamas biokuro degimo produktų pašalinimui per katilą iš pakuros. Dūmsiurbis yra parinktas tokio galingumo, kad galėtų įveikti aerodinaminius nuostolius pakuroje, katile ir visame dūmų tekėjimo trakte. Taip pat kaip ir kūrą į katilą paduodančio sraigto sukimosi greitis, ardelių judėjimas bei pirminio oro padavimas, dūmsiurbis yra valdomas dažnio keitikliu.



2.1.2 pav. Kuro padavimo bunkeris su šneku.

Katilas su pakura yra pavaizduotas principiniame brėžinyje su padarytu katilo pjūviu (2.1.3 pav.).



2.1.3 pav. Pakuros ir katilo principinis vaizdas.

Pagrindiniai katilo techniniai rodikliai:

- Projektinė katilo galia – apie 25 kW.
- Projektinis darbinis slėgis – 4 bar.
- Projektinė darbinė temperatūra – 110 °C.
- Minimali vandens temperatūra prieš katilą – 70 °C.
- Katilo naudingo veikimo koeficientas – ≥ 88 %.
- Dūmų temperatūra už katilo – apie 130 °C.

Visas biokuro degimui naudojamas oras yra tiekiamas pro du skirtingus kanalus ir pagal tai klasifikuojamas į pirminį ir antrinį. Pirminis oras yra tiekiamas po ardynu, toliau tekėdamas pro ardėlių plyšelius susimaišo su kuru ir vyksta degimas. Visas oras, kuris yra reikalingas kuro sudegimui ant ardyno, patenka pro pirminio oro tiekimo angą. Tuo pačiu, pirminis oras atlieka ir ardyno aušinimo funkciją.

Į degimo zoną, esančią virš ardyno, antrinis oras yra paduodamas per specialias tam skirtas angas. Antrinio oro paskirtis – gerai sumaišyti ir sudeginti iš biokuro išsiskyrusias lakiąsias dujas.

Antrinis oras į pakurą yra tiekimas per specialias ertmes esančias abiejose pakuros pusėse. Tiekiamas oras nukreipiamas į pakuros paviršius, kur sušyla ir tuo pačiu vėsina pakuros korpusą.

Šalia katilo sumontuota valdymo spinta pavaizduota 2.1.4 paveiksle. Jos pagalba galima reguliuoti pirminio oro padavimą, kuro padavimą, trauką bei ardyno ardėlių judėjimą.



2.1.4 pav. Valdymo spinta.

20 °C temperatūros oras, kuris reikalingas degimui yra pasiurbiamas iš aplinkos. Katilo vandens temperatūra yra palaikoma temperatūrų intervale 65 °C – 70 °C. Į aušinimo sistemą, sudarytą iš oro šildymo bloko su ventiliatoriumi, visada siurbliu yra tiekiamas karštas vanduo, siekiant užtikrinti pastovų šilumos perdavimą.

Kuro padavimo greitis ir oro kiekis, kuris yra tiekimas į degimo kamerą, pagrinde ir yra du parametrai, kurie reguliuoja kuro degimo procesą pakuroje.

2.2 Tyrimuose naudojamas biokuras

Eksperimentiniuose tyrimuose kaip pagrindinį kuras buvo naudojamas MDP granulės. Norint, kad matytųsi kuo ryškesnis naudojamų azoto oksidų mažinimo priemonių poveikis, naudojamas būtent šis kuras. Jis degdamas išskiria daug azoto oksidų (kuras su dideliu azoto kiekiu viso kuro masėje).

2.2.1 lentelė nurodo šio kuro sudėtį, bei šilumingumo tyrimo rezultatus, t.y. nurodoma žemutinė šiluminė kuro vertė.

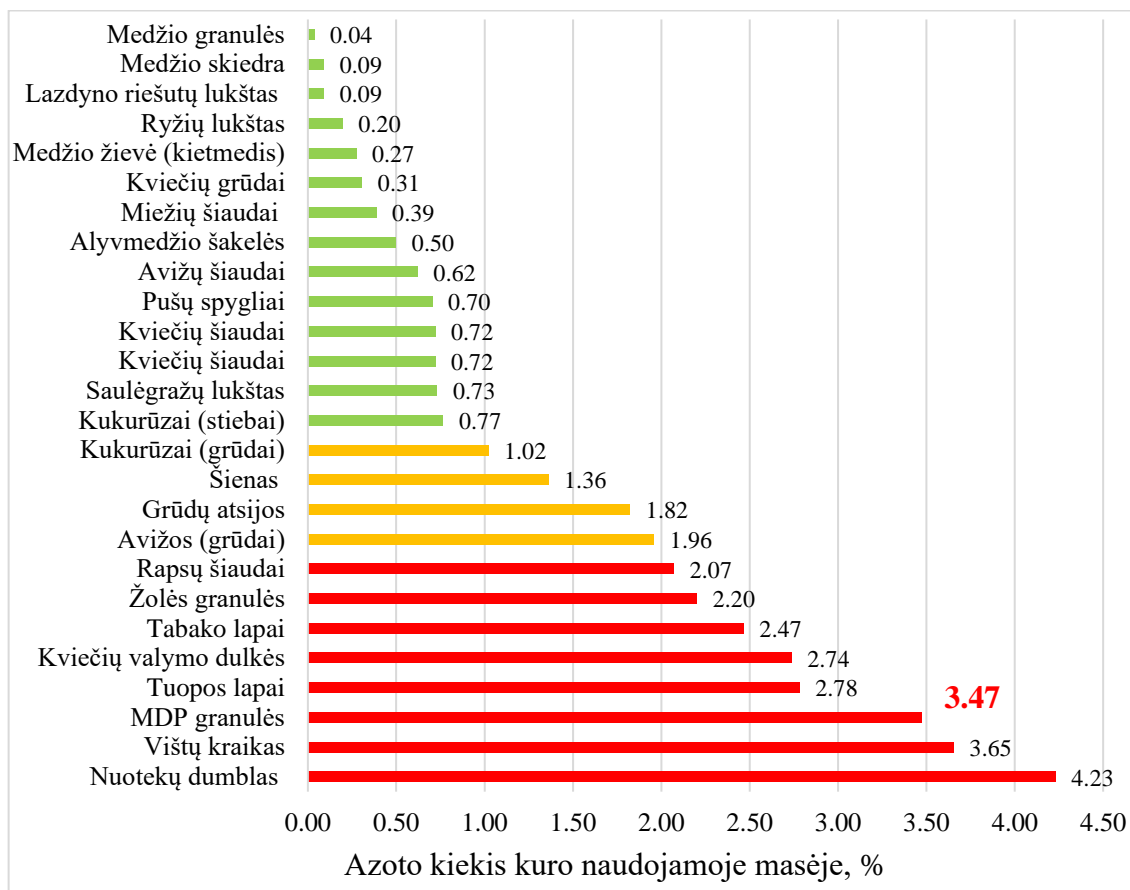
2.2.1 lentelė. Naudojamo kuro sudėtis ir šilumingumas.

MDP granulės	Kiekis, %
Drėgmė W, %	8,13
Anglies kiekis, %	48,74
Azoto kiekis, %	3,47
Vandenilio kiekis, %	5,70
Sieros kiekis, %	<0,01
Žemutinė šiluminė vertė $Q_{\check{z}}$ kJ/kg	17900

MDP granulės gaminamos iš baldų gamybos atliekų, kurios susidaro baldų gamybos įmonėse. Technologinio baldų gamybos proceso metu, kai nepanaudotos medžio drožlių plokštės, pjuvenos ir nekokybiški gaminiai lieka kaip atliekos. Mediena nėra vienintelė medžiaga iš kurios šios atliekos susideda. Cheminių medžiagų, naudojamų medienos apdorojimui, baldų laminatų, kartono ir likučių kitų pakavimo medžiagų gali taip pat būti šiame kure. Todėl, medienos perdirbimo įmonės nori naudoti šias atliekas patenkinant savo energijos poreikius.

Lietuvoje yra daug įmonių, kurios gamina daug tokių atliekų ir problema yra ta, kad atliekos negali būti naudojamos energijos gamybai, nes jų degimo proceso metu išeinančiuose dūmuose susidaro aukštos azoto oksidų koncentracijos.

2.2.1 pav. nurodytos įvairaus biokuro azoto kiekio naudojamoje masėje vertės. Matome, kad yra daug įvairių atliekinio kuro rūšių, turinčių didelį azoto kiekį savo masėje.



2.2.1 pav. Įvairių kuro rūšių azoto kiekio palyginimas naudojamojoje masėje.

Sėkmingai sumažinus kiekį azoto oksidų, kurie susidaro iš kure esančio azoto, daug azoto turintis kuras gali būti naudojamas energijos gamybai. Tai taip pat naudinga ir aplinkai, nes būtų mažiau naudingai nepanaudojamų atliekų ir tai tuo pačiu sumažintų kitų biokuro rūšių poreikį, kuris yra reikalingas energijos gamybai.

2.3 Dūmų recirkuliacinis kontūras

Vienas iš šio tiriamojo darbo tikslų yra patikrinti recirkuliacinių (REC) dūmų tiekimo į pakurą įtaką azoto oksidų susidarymui galutiniuose degimo produktuose. Taigi laboratorinis degimo stendas patobulintas recirkuliacinių dūmų tiekimo į katilą sistema (kontūru) (2.3.1 pav.). REC dūmų generavimo funkciją atlieka toje pačioje laboratorijoje esantis nedidelis buitinis dujinis katilas „Chaffoteux“ (šiluminė galia 23,7 kW), skirtas karšto vandens ruošimui. Prie šio katilo dūmų išmetimo angos pajungiamas vamzdis, kuris pasirinktinai gali būti nuvedamas į laboratorinio degimo stendo pirminio arba antrinio oro tiekimo angas.

Šiame REC dūmų kontūre taip pat įmontuojama:

1. Peteliškinė sklendė, skirta paduodamų REC dūmų kiekio keitimui bei atkirtimui ir nuvedimui į lauką;
2. Trišakis su peleliškine sklende, skirtas oro maišymui su REC dūmais;
3. Anga, skirta dūmų analizatoriaus zondui įkišti.



2.3.1 pav. a) buitinis dujinis katilas; b) REC dūmų kontūras; c) degimo stendas.

2.3.2 pav. vaizduoja kaip tuo pačiu metu buvo matuojama REC dūmų sudėtis bei jų tekėjimo REC dūmų kanale.



2.3.2 pav. REC dūmų sudėties bei greičio matavimas.

2.4 Vandens garo tiekimas į pakurą

Kitas tyrimo uždavinys – patikrinti NO_x mažinimo išmetamuosiuose produktuose efektyvumą, tiekiant vandens garą į pakurą. Šių tyrimų eigoje naudojamas garo generatorius Kärcher SC 1402 (2.4.1 pav.).



2.4.1 pav. Garo generatorius Kärcher SC 1402.

Garo generatoriaus antgalis yra įkišamas į oro padavimo angas ir tuomet vandens garas purškiamas ir tiekiamas į pakurą. 2.4.2 pav. pavaizduotas į antrinio oro padavimo angą įkištas garo generatoriaus antgalis.

Garo generatorius gali dirbti dviem režimais: dideliu ir mažu našumu. Prieš darant tyrimus buvo išmatuotas įrenginio našumas. Talpa pilnai pripildyta ir išgarinta, išmatuojant laiką, per kurį talpa ištuštėja. Išmatuoti našumai yra kelių bandymų rezultatų vidurkiai.



2.4.2 pav. Į antrinio oro padavimo angą įkištas garo generatoriaus antgalis.

2.5 Degių priedų tiekimas į pakurą

Degūs priedai pasirinkti kaip priemonė, skirta pakelti degimo procesų temperatūras, pailginti CO ir NO tarpusavio reakcijų laiką.

Siekiant pasirinkti labiausiai energetikoje paplitusius degius komponentus, kuriuos galima būtų lengvai tiekti į degimo kamerą, buvo pasirinktos degios angliavandenilinės dujos. Dujos pasirinktos ir dėl gero maišymosi su oru [5, 6].

Ekspperimentuose buvo naudojami degūs priedai: metanas (CH_4 tiekiamas iš žemo slėgio dujotiekio linijos), propano/butano mišinys ($\text{C}_3\text{H}_8/\text{C}_4\text{H}_{10}$ – dažniausiai naudojamas kaip dujinis kuras automobiliuose) ir acetilenas (C_2H_2 naudojamas kitų cheminių elementų sintezei).

2.5.1 lentelė. Degių priedų charakteristikos.

Degus priedas	Liepsnos temperatūra, °C	Tankis, kg/m^3	Šilumingumas, kJ/kg
Gamtinės dujos (CH_4)	1950	0,679	47141
Propano/butano mišinys ($\text{C}_3\text{H}_8/\text{C}_4\text{H}_{10}$)	~1970	2,087	46150
Acetilenas (C_2H_2)	2550	1,065	48421

Degūs priedai (angliavandeniliai) yra pasirinkti todėl, kad būtų galima pratęsti reakcijos laiką tarp CO ir NO bei temperatūrų intervalą.



2.5.1 pav. Antrinio oro tiekimo vamzdžio ruožas, per kurį kartu su oru tiekiamos degios dujos.

2.6 Dūmų analizės įranga

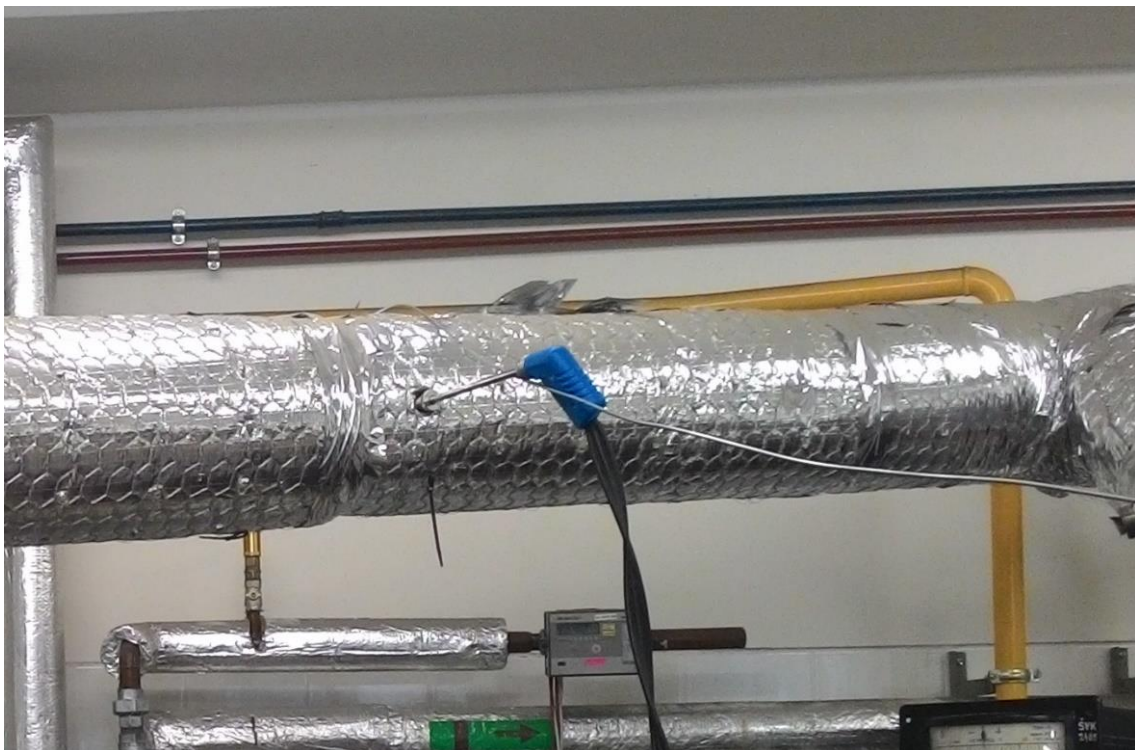
Tyrimo metu į pakurą paduodamo REC dūmų bei oro mišinio sudėtį bei susidariusių teršalų koncentracijoms dūmtakyje matuoti bus naudojamas dūmų analizatorius Multilyzer NG (2.6.1 pav.).



2.6.1 pav. Dūmų analizatorius Multilyzer NG.

Dūmų analizatorius Multilyzer NG yra daug funkcijų atliekantis prietaisas su įdiegta skaičiavimo funkcija. Įrenginys gali būti jungiamas prie kompiuterio laidiniu būdu arba naudojant belaidį ryšį (BlueTooth), gauti rezultatai skaitinėje formoje iškart siunčiami į Microsoft Office programą ir ten išsaugojami. Duomenys taip pat gali būti spausdinami belaidžiu spausdintuvu. Analizatorius registruoja tokių parametrų matavimus: aplinkos bei dūmų temperatūras, O₂ koncentraciją procentais, anglies monoksido, sieros dioksido bei azoto monoksido koncentracijas, taip pat traukos srautą. Kai šie duomenys gaunami prietaisas suskaičiuoja: procentines CO₂ bei smalkių (CO) koncentracijas, oro pertekliaus koeficientą, degimo naudingumo koeficientą, praradimus dujų ištekėjimo kanale bei suminius azoto oksidus (NO_x).

Įstatant dūmų analizatorių į dūmtakyje esančią angą, jis turi sudaryti statmeną kampą su dūmų judėjimo kryptimi. Matavimo pakete yra įdiegti dujų koncentracijos elektrocheminiai davikliai, traukos daviklis, siurblio dūmai mėginiui nusiurbti, kondensato surinktuvas. Zondas yra dedamas į tam tikrą matavimams naudojamą skylę, o siurblys per jį iš dūmtakio traukia tiriamas dujas (2.6.2 pav.). Dūmai išvalomi nuo drėgmės kondensato surinktuve, vėliau jie patenka į filtrą, kuriame sunaikinamos mechaninės priemaišos. Po to dūmai nutekina į elektrocheminius daviklius. K – tipo NiCr – Ni termoporomis yra matuojama temperatūra. Visi signalai iš jautrių daviklių yra žymimi skaitmeniniame kode, pervedami į prietaiso ekraną, gali būti atspausdinti, išsaugoti vidinėje atmintyje arba kompiuteryje.



2.6.2 pav. Į dūmtakį įkištas dūmų analizatoriaus zondas.

2.7 Matavimų automatizavimas

Prieš pradėdant kuro deginimo tyrimus sukuriama svarbiausių dydžių matavimo metodai, kurie tyrimo metu leis reikiamus dydžius nustatyti greičiau bei tiksliau. Taigi sudaryti paduodamo kuro masinio debito, pirminio bei antrinio oro tūrinių debitų ir techninių kuro degimo skaičiavimų modeliai.

2.7.1 Kuro padavimas

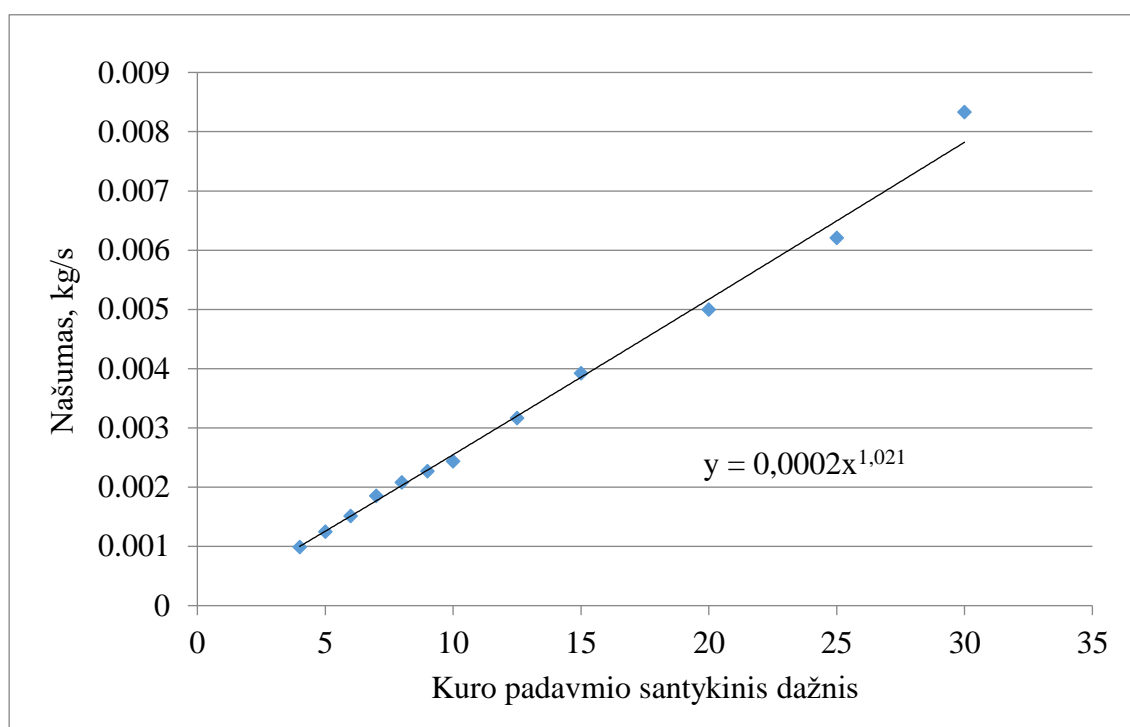
Kuro padavimui į pakurą naudojamas sraigtas, kurį suka sumontuotas variklis su dažnio keitikliu. Dažnio keitiklyje keisdami kuro padavimo sraigto sukimosi santykinį dažnį diapazone nuo 4 iki 30 galime koreguoti į pakurą paduodamo kuro masinį debitą.

Norint sudaryti paprastą paduodamo kuro debito skaičiavimo metodiką 6 mm skersmens MDP granulės buvo sveriamos po 1 kg, beriamos į bunkerį ir, nustatant tam tikrą kuro padavimo sraigto sukimosi santykinį dažnį, buvo skaičiuojamas laikas per kurį kuro bunkeris ištuštėja. Tokie matavimai atlikti visame sraigto sukimosi santykinio dažnio diapazone ir rezultatai pateikti 2.7.1.1 lentelėje.

2.7.1.1 lentelė. Kuro padavimo matavimų rezultatai.

Santykinis dažnis	Laikas, s	Našumas, kg/s
30	120	0,008333
25	161	0,006211
20	200	0,005
15	255	0,003922
12,5	316	0,003165
10	410	0,002439
9	440	0,002273
8	480	0,002083
7	540	0,001852
6	660	0,001515
5	800	0,00125
4	1010	0,00099

Masinis debitas iškart apskaičiuojamas imant laiką, per kurį sraigtas į pakurą padavė 1 kg kuro, kaip atvirkščią dydį. Grafiškai matavimai pavaizduoti 2.7.1.1 paveiksle.



2.7.1.1 pav. Kuro padavimų matavimų rezultatai. Našumo priklausomybė nuo kuro padavimo santykinio dažnio.

Taigi, žinant kuro padavimo dažnį, kuro našumas gali būti randamas iš 2.7.1.1 pav. grafiko arba apskaičiuojamas pagal šią formulę:

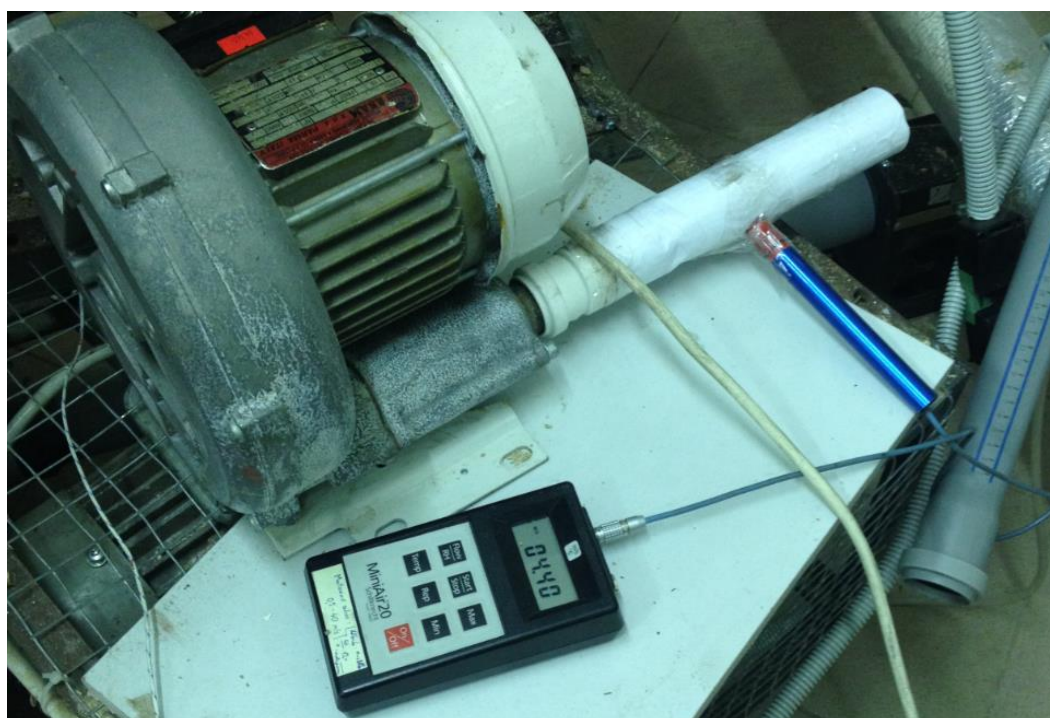
$$m = 0,0002f^{1,021}. \quad (16)$$

Čia: m – našumas, kg/s, f – kuro padavimo santykinis dažnis.

2.7.2 Pirminio ir antrinio oro padavimo matavimai

Kaip jau minėta 2.1 skyriuje, oras, kuris yra paduodamas į katilą, suskirstytas į pirminį ir antrinį. Tiek pirminio/antrinio oro padavimo konfigūravimas, tiek į pakurą patenkančio oro tūris daro didelę įtaką norimo degimo proceso režimo palaikymui bei, svarbiausia, azoto oksidų koncentracijų dūmų produktuose kitimui. Dėl šių priežasčių yra svarbu žinoti, koks yra į pakurą patenkantis oro tūrinis debitas.

Oro greičio matavimams atlikti buvo naudojamas anemometras Mini Air 20, kuris pavaizduotas 2.7.2.1 paveiksle. Anemometro vėjarodis buvo įkištas tiek į pirminio, tiek į antrinio oro padavimo vamzdžius ir gerai užsandarintas.



2.7.2.1 pav. Oro greičio matavimas anemometru Mini Air 20.

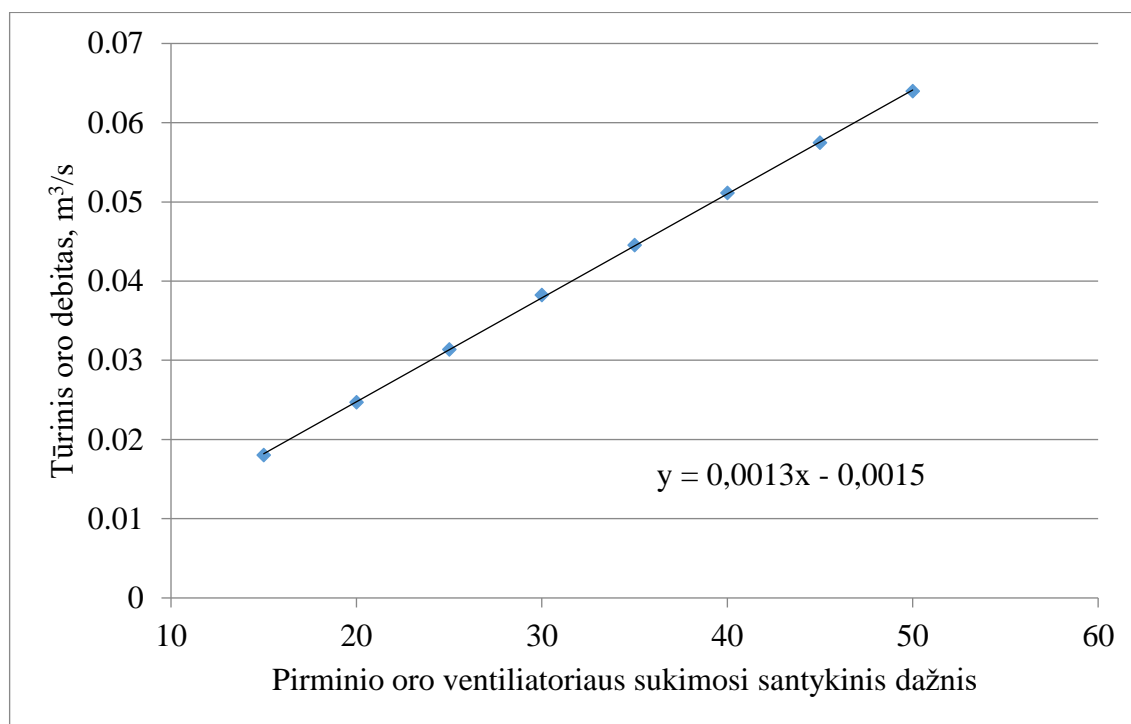
Pirminio oro matavimo rezultatai

Pirminio oro padavimas yra reguliuojamas dažnio keitikliu, kuris keičia pirminio oro ventiliatoriaus sukimosi greitį. Pirminio oro ventiliatoriaus santykinis dažnis gali būti keičiamas diapazone nuo 15 iki 50. Pirminio oro padavimo vamzdžio vidinis skersmuo yra 0,067 m, todėl gauname, kad vidinis vamzdžio skerspjūvio plotas yra $0,0035239 \text{ m}^2$. Matavimų rezultatai pateikiami 2.7.2.1 lentelėje žemiau.

2.7.2.1 lentelė. Pirminio oro matavimų rezultatai.

Santykinis dažnis	Oro greitis, m/s	Tūrinis debitas, m ³ /s
15	5,11	0,01800695
20	7	0,024667055
25	8,9	0,031362399
30	10,85	0,038233935
35	12,64	0,044541654
40	14,5	0,051096043
45	16,3	0,057439
50	18,15	0,06395815

Grafiškai skaičiavimų rezultatai pateikiami 2.7.2.2 paveiksle.



2.7.2.2 pav. Pirminio oro matavimų rezultatai. Tūrinio debito priklausomybė nuo pirminio oro ventiliatoriaus sukimosi santykinis dažnio.

Taigi, žinant pirminio oro ventiliatoriaus sukimosi santykinį dažnį, oro tūrinis debitas gali būti randamas iš 2.7.2.2 grafiko arba apskaičiuojamas pagal šią formulę:

$$m_{t1} = 0,0013f - 0,0015. \quad (17)$$

Čia: m_{t1} – pirminio oro tūrinis debitas, m³/s, f – pirminio oro ventiliatoriaus sukimosi santykinis dažnis.

Antrinio oro matavimo rezultatai

Antrinio oro padavimas yra reguliuojamas sklende, ją atidarinėjant arba uždarinėjant sukant rankenėlę. Sukiojama rankenėlė yra sugraduota padalomis, kurios pasiskirsčiusios diapazone nuo 0 iki 4,5. Antrinio oro padavimo vamzdžio vidinis skersmuo yra 0,0414 m, todėl gauname, kad vidinis vamzdžio skerspjūvio plotas yra 0,0013455 m². Matavimų rezultatai pateikiami 2.7.2.2 lentelėje žemiau.

2.7.2.2 lentelė. Antrinio oro matavimų rezultatai.

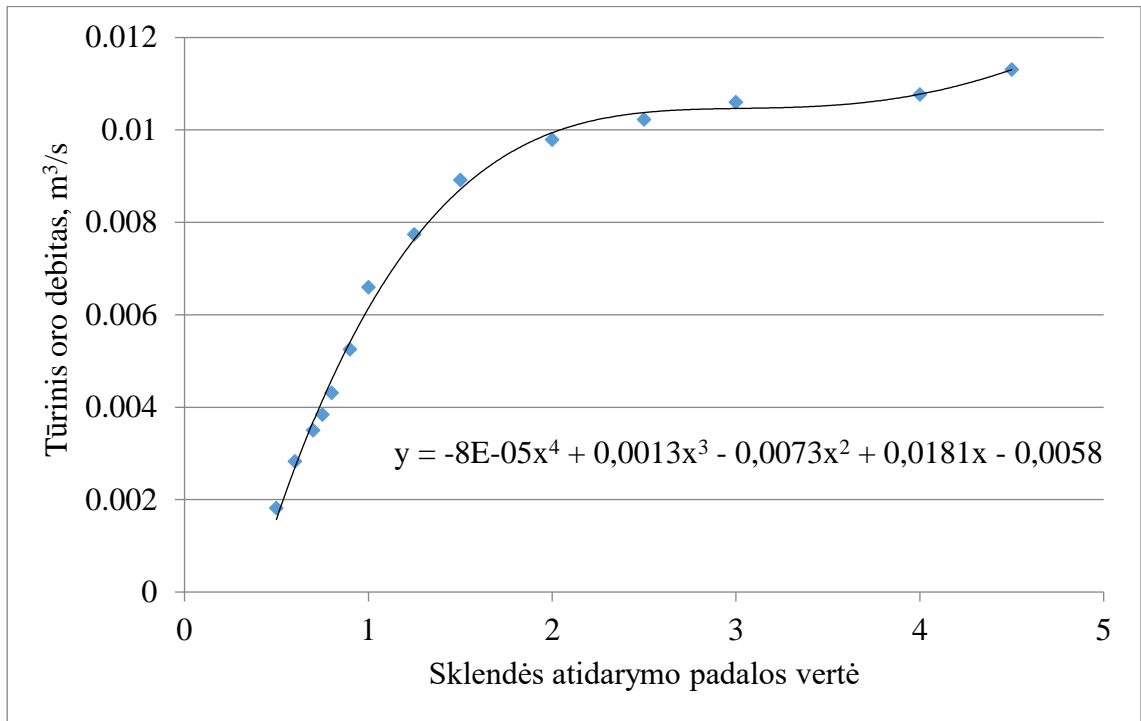
Sklendės atidarymo padalos vertė	Oro grietis, m/s	Tūrinis debitas, m ³ /s
0,5	1,35	0,001816369
0,6	2,1	0,002825463
0,7	2,6	0,003498192
0,75	2,85	0,003834557
0,8	3,2	0,004305468
0,9	3,9	0,005247289
1	4,9	0,006592747
1,25	5,75	0,007736387
1,5	6,625	0,008913663
2	7,275	0,009788211
2,5	7,6	0,010225485
3	7,875	0,010595486
4	8	0,010763669
4,5	8,4	0,011301852

Grafiškai skaičiavimų rezultatai pateikiami 2.7.2.3 paveiksle.

Taigi, žinant antrinio oro sklendės atsukimo padalos vertę, oro tūrinis debitas gali būti randamas iš 2.7.2.3 grafiko arba apskaičiuojamas pagal šią formulę:

$$m_{t2} = -8 \cdot 10^{-5} \cdot x^4 + 0,0013x^3 - 0,0073x^2 + 0,0181x - 0,0058. \quad (18)$$

Čia: m_{t2} – antrinio oro tūrinis debitas, m³/s, x – sklendės atidarymo padalos vertė.



2.7.2.3 pav. Antrinio oro matavimų rezultatai. Tūrinio debito priklausomybė nuo sklendės atidarymo padalos vertės.

2.7.3 Techniniai kuro degimo skaičiavimai

Ankstesniame skyrelyje sudarėme metodikas, kaip tiksliai apskaičiuoti įvairaus kuro deginimo tyrimo metu į pakurą pratenkančio oro tūrinį debitą bei paduodamo kuro masinį debitą.

Tiriamąjį darbo metu bus žadama deginti įvairius kurus, kurių cheminę elementinę sudėtį būsime nusistatę iš anksto, kitaip tariant, ją žinosime. Taigi toliau Excel darbo aplinkoje buvo parengtas techninių kuro degimo skaičiavimų modelis. Naudojantis sukurtu modeliu, įvedus deginamos kuro rūšies naudojamosios masės sudėtį procentais bei oro pertekliaus koeficientą, iškart gauname tikrus bei teorinius degimo produktų (dūmų) ir reikalingo oro kurui sudeginti tūrius [15]. Įvesties duomenų bei rezultatų pavyzdinės lentelės pavaizduotos atitinkamai 2.7.3.1 bei 2.7.3.2 lentelėse.

2.7.3.1 lentelė. Techninių kuro degimo skaičiavimų įvesties duomenys.

Naudojamosios kuro masės sudėtis, %

C ⁿ	H ⁿ	S ⁿ _d	O ⁿ	N ⁿ	A ⁿ	W ⁿ	α
30,9	3,2	0,2	17,8	1,3	6,6	40	1,3

2.7.3.2 lentelė. Techninių kuro degimo skaičiavimų rezultatai.

REZULTATAI vienam kg kuro

Dūmu tūris:	4,80888	m ³ /kg
Teorinis dūmu tūris:	3,884376	
Reikalingo oro tūris:	3,942708	
Teoriškai reikalingo oro tūris:	3,032852	

Tarpiniai skaičiavimai

Iš pradžių galima nustatyti, kiek reikia deguonies, kad visiškai sudegtų kuras:

Pagal masę ore yra 23 % deguonies. Oro tankis normaliomis sąlygomis $\rho = 1,293 \text{ kg/m}^3$.

$$M_{O_2} = 2,66 \frac{C^n}{100} + 8 \frac{H^n}{100} + \frac{S_d^n}{100} - \frac{O^n}{100}, \text{ kg/kg.} \quad (19)$$

Todėl teoriškai degimui reikalingo oro tūris vienam kg kietojo arba skystojo kuro yra:

$$V_O^t = \frac{100M_{O_2}}{23 \times 1,293} = 0,0899(C^n + 0,375 S_d^n) + 0,265H^n - 0,033 O^n, \text{ m}^3/\text{kg.} \quad (20)$$

Visiškai sudeginus kurą su teoriniu oro tūriu, degimo produktuose – dūmuose – būna visiško sudegimo produktų - CO₂, SO₂, H₂O ir oro bei kuro azoto. Deginant su oro pertekliumi, dūmuose dar yra oro pertekliaus deguonies. Kurui sudegant nevisiškai, dūmuose yra anglies viendeginio, vandenilio, metano ir kitų degių komponentų [15].

Toliau skaičiuojamas triatomų dujų tūris:

$$V_{RO_2} = 0,01866(C^n + 0,375 S_d^n), \text{ m}^3/\text{kg.} \quad (21)$$

Kurui sudegus visiškai, degimo produktuose esančių triatomų dujų kiekis yra pastovus ir nepriklauso nuo oro pertekliaus.

Azotas ore sudaro 79 % tūrio, pačiame kure yra Nⁿ % azoto, todėl teorinis azoto tūris, sudegus 1 kg kietojo ar skystojo kuro, bus:

$$V_{N_2}^t = 0,79 V_O^t + 0,008 N^n, \text{ m}^3/\text{kg.} \quad (22)$$

o esant oro pertekliui,

$$V_{N_2} = 0,79 \alpha V_O^t + 0,008 N^n, \text{ m}^3/\text{kg.} \quad (23)$$

Deginant kietąjį ir skystąjį kurą, vandens garo degimo produktuose atsiranda, sudegus kuro vandeniliui, išgaravus drėgmei, taip pat jos įneša atmosferos oras. Degimo produktuose atsirandantis teorinis vandens garas apskaičiuojamas:

$$V_{H_2O}^t = 0,111 H^n + 0,0124 W^n + 0,0161 V_O^t, m^3/kg. \quad (24)$$

Teorinis sausų dūmų tūris, kuris susidaro deginant kurą su teoriniu oro tūriu (t.y., kai $\alpha = 1$), susideda iš triatomų dujų ir azoto tūrių:

$$V_{sd}^t = V_{RO_2} + V_{N_2}^t, m^3/kg. \quad (25)$$

Tuomet teorinis dūmų tūris apskaičiuojamas:

$$V_d^t = V_{sd}^t + V_{H_2O}^t, m^3/kg. \quad (26)$$

Deginant su oro pertekliumi (t.y., kai $\alpha > 1$), dūmų tūris padidėja oro pertekliaus tūriu:

$$V_{sd} = V_{sd}^t + (\alpha - 1)V_O^t, m^3/kg. \quad (27)$$

Degimo produktuose atsirandantis vandens garas:

$$V_{H_2O} = 0,111 V^n + 0,0124 W^n + 0,0161 \alpha V_O^t, m^3/kg. \quad (28)$$

Galiausiai apskaičiuojamas dūmų tūris:

$$V_d = V_{sd} + V_{H_2O}, m^3/kg. \quad (29)$$

Reikiami skaičiavimų išvesties rezultatai pateikiami aukščiau parodytoje 2.3.2 lentelėje.

3 TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ ANALIZĖ

Šio darbo eksperimentiniai tyrimai suskirstyti į du etapus. Pirmajame etape buvo išbandomi NO_x mažinimo metodų efektyvumai naudojant REC dūmų bei vandens garo tiekimą į katilo pakurą. Antrajame etape buvo atliekami azoto oksidų mažinimo tyrimai taikant SNKV technologiją dviem būdais: naudojant tradicinius bei degius priedus. Tiek pirmo, tiek antro tyrimo etapo pradžioje buvo atliekami baziniai NO_x koncentracijų dūmuose tyrimai, kuriuose nebuvo taikomi jokie azoto oksidų mažinimo metodai. Turint šiuos duomenis galime įvertinti naudojamų metodų efektyvumą [15].

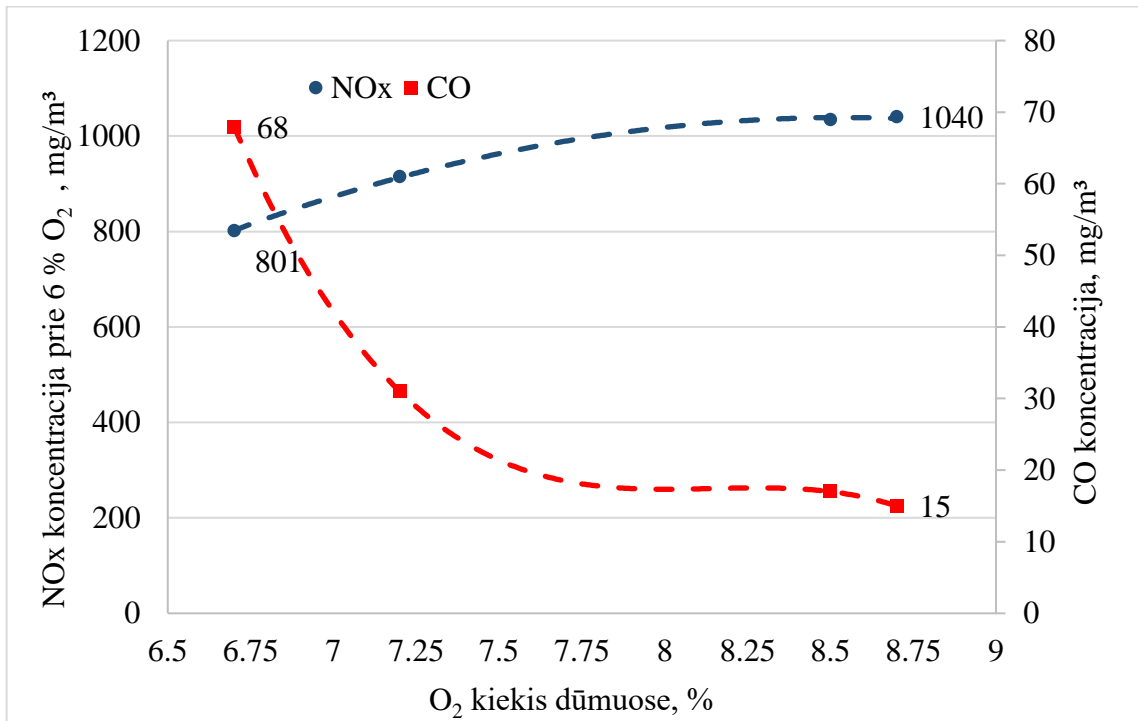
Norint tikslingai vertinti, analizuoti ir lyginti gautus rezultatus, skirtingi kuro deginimo tyrimai buvo atliekami esant toms pačioms sąlygoms, t.y. buvo siekiama išlaikyti vienodus pirminio ir antrinio oro tiekimo, kuro padavimo, traukos, ardymo judėjimo bei katilo galios parametrus. Katilo galios apskaičiavimui reikalingi duomenys (katilo pašildyto vandens temperatūrų skirtumas ir vandens debitas) matuojamas į termofikacinę sistemą integruotu šilumos skaitikliu.

Tyrimai bei rezultatų registravimas pradedamas tik tuomet, kai katilo darbo režimas yra nusistovėjęs.

3.1 I-ojo etapo bazinis NO_x koncentracijų dūmuose tyrimas

Kaip jau minėta tyrimams naudojamas kuras – MDP granulės. Tyrimai pradedami deginant šias granules netaikant jokių NO_x mažinimo priemonių, norint nustatyti bazines teršalų koncentracijas išmetamuosiuose degimo produktuose. Šio bazinio tyrimo teršalų NO_x ir CO koncentracijų priklausomybės nuo deguonies koncentracijos dūmuose rezultatai pateikiami 3.1.1 pav.

Didžiausia NO_x koncentracija 1040 mg/m³. Didžiausia išmatuota CO koncentracijos reikšmė 68 mg/m³. Mažiausios teršalų NO_x ir CO koncentracijos atitinkamai 801 mg/m³ ir 15 mg/m³.



3.1.1 pav. NO_x ir CO koncentracijų priklausomybė nuo deguonies, deginant MDP granules.

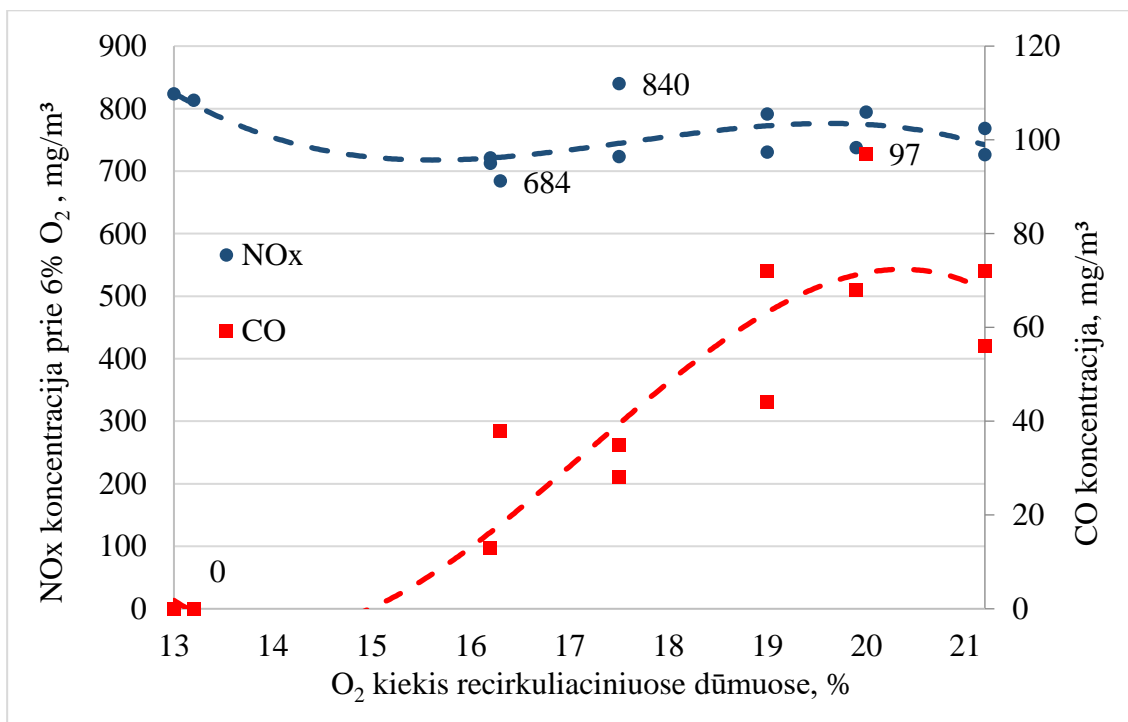
3.2 NO_x koncentracijų mažinimas tiekiant REC dūmus į pirminio/antrinio oro padavimo zoną

Tyrimai buvo atliekami naudojantis recirkuliacinių dūmų kontūru aprašytu 2.3 skyrelyje. REC dūmų kiekis, kuris yra tiekiamas į katilo pakurą per pirminio arba antrinio oro angas, keičiamas sukiojant dujinio katilo dūmų bei oro padavimo/uždarymo peteliškines sklendes, taip pat aptartas 2.3 skyrelyje. Nusistovėjus degimo režimui pirmiausia dūmų analizatoriumi yra matuojamas deguonies kiekis, esantis REC dūmuose, dar prieš jam patenkant į katilo degimo kamerą. Nustačius šį dydį, matavimo zondas yra perdedamas į matavimo angą, esančią katilo dūmtakyje, ir matuojamos iš katilo išeinančiuose dūmuose esančių teršalų koncentracijos.

Dūmų recirkuliacija veikia temperatūros mažinimo principu. Tiekiant recirkuliacinius dūmus yra sumažinamas deguonies kiekis ore. Dėl šios priežasties atšaldomas fakelas, REC dūmai veikia kaip papildomas žemesnės temperatūros balastas. Atšalus fakelui sumažėja degimo temperatūra, todėl išvengiama terminių azoto oksidų susidarymo. Recirkuliuojamuose dūmuose yra nedidelė dalis nepilno sudegimo produktų (C_xH_y, CO), kurie dalinai mažina NO_x koncentraciją išmetamuosiuose dūmuose [16].

REC dūmai į pirminio oro padavimo zoną

NO_x ir CO koncentracijų priklausomybės nuo deguonies koncentracijos REC dūmuose tyrimo rezultatai, kai į pirminio oro padavimo zoną tiekiami įvairios koncentracijos REC dūmai, pateikiami 3.2.1 pav.



3.2.1 pav. NO_x ir CO koncentracijų priklausomybė nuo deguonies kiekio REC dūmuose, deginant MDP granules, kai REC dūmai tiekiami į pirminio oro padavimo zoną.

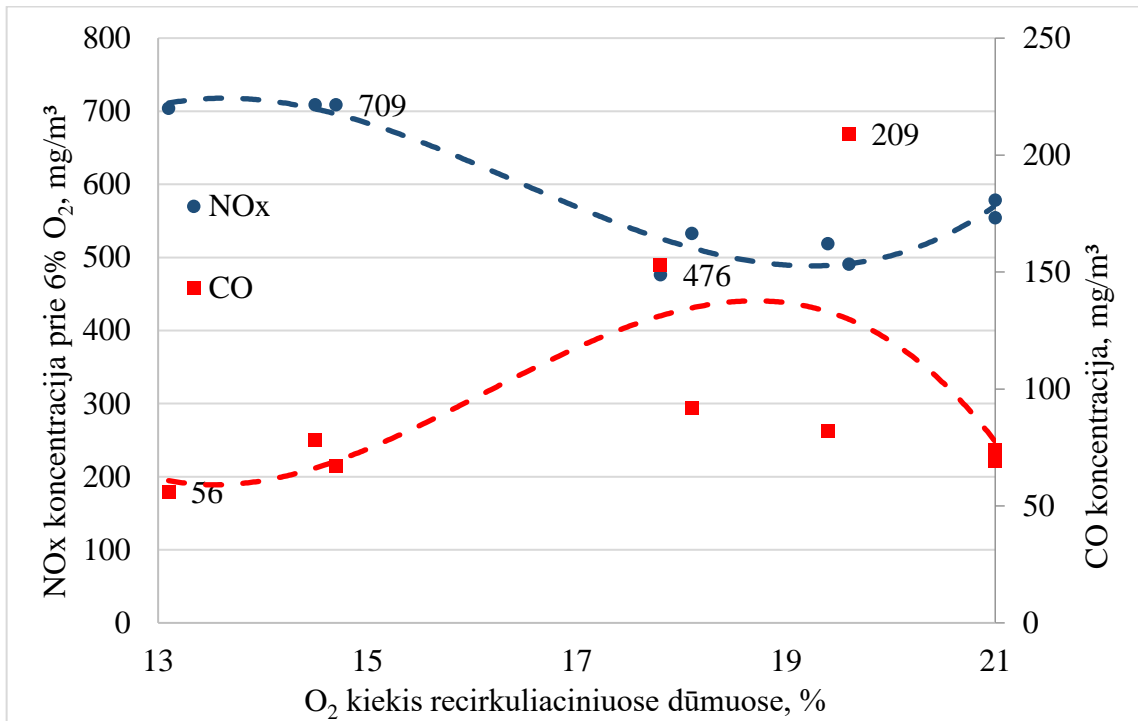
Pasiekta maksimali NO_x koncentracija 840 mg/m³, minimali 684 mg/m³. Mažiausia pasiekta CO reikšmė yra 0 mg/m³. Didžiausia CO koncentracijos reikšmė lygi 97 mg/m³.

REC dūmai į antrinio oro padavimo zoną

NO_x ir CO koncentracijų priklausomybės nuo deguonies koncentracijos REC dūmuose tyrimo rezultatai, kai į antrinio oro padavimo zoną tiekiami įvairios koncentracijos REC dūmai, pateikiami 3.2.2 pav.

Pasiekta maksimali NO_x koncentracija 709 mg/m³, minimali 476 mg/m³. Mažiausia pasiekta CO reikšmė yra 56 mg/m³. Didžiausia CO koncentracijos reikšmė lygi 209 mg/m³.

Lyginant bazinius rezultatus su rezultatais gautais, kai į katilo pakurą buvo tiekiami REC dūmai, pastebime, kad REC dūmų tiekimas sumažina azoto oksidų koncentracijas išmetamuosiuose dūmuose. Tačiau, remiantis šiais rezultatais, negalime patvirtinti tendencijos, kad tolygus REC dūmų koncentracijos didėjimas lemia tolygų azoto oksidų koncentracijos mažėjimą.

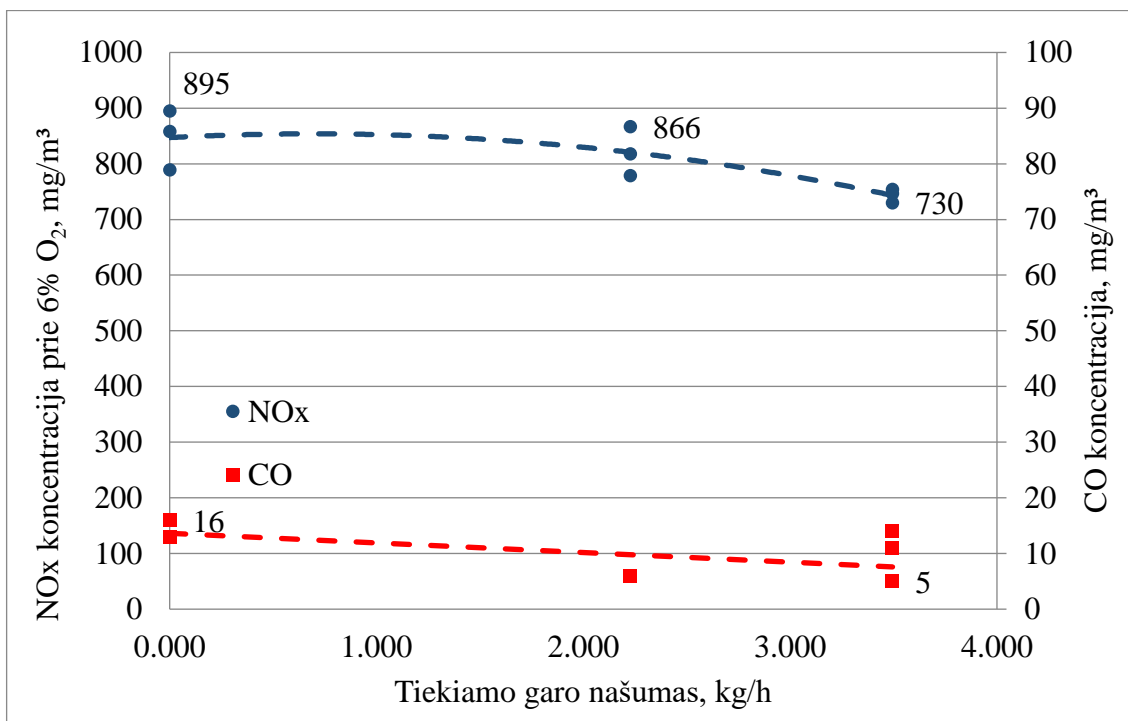


3.2.2 pav. NO_x ir CO koncentracijų priklausomybė nuo deguonies kiekio REC dūmuose, deginant MDP granules, kai REC dūmai tiekiami į antrinio oro padavimo zoną.

3.3 NO_x koncentracijų mažinimas purškiant vandens garą į antrinio oro padavimo zoną

Tyrimo atlikimo metodika aptarta 2.4 skyrelyje. Garo tiekimas į pakurą taip pat žemina temperatūrą kūrykloje, taip pat atšaldomas fakelas. Esant žemesnei temperatūrai sulėtėja reakcijų laikas, todėl ilgesnį laiką išlieka tie patys nepilno degimo produktai (C_xH_y, CO), kurie redukuoja NO_x. Esmė ta, kad vietoje normalaus greito degimo, leidžiama ilgiau angliavandeniliams ir CO sąveikauti su NO_x.

NO_x ir CO koncentracijų išmetamuose dūmuose priklausomybės nuo tiekiamo garo našumo tyrimo rezultatai pateikiami 3.3.1 pav.



3.3.1 pav. NO_x ir CO koncentracijų išmetamuose dūmuose priklausomybės nuo tiekiamo garo našumo.

Pasiekta maksimali NO_x koncentracija 895 mg/m³ (garas tuo metu nebuvo tiekiamas), minimali 730 mg/m³ (maksimalus garo našumas 3,5 kg/h). Mažiausia pasiekta CO reikšmė yra 5 mg/m³. Didžiausia CO koncentracijos reikšmė lygi 16 mg/m³.

Lyginant bazinius rezultatus su rezultatais gautais, kai į katilo pakurą buvo tiekiamas vandens garas, pastebime, kad vandens garo įpurškimas į antrinio oro padavimo zoną šiek tiek sumažino azoto oksidų koncentraciją išmetamuosiuose dūmuose. Didėjant paduodamam vandens garo kiekiui, azoto oksidų koncentracija mažėja, tačiau labai nežymiai. Deguonies koncentracija išmetamuosiuose dūmuose palaikoma apie 9 %.

3.4 II-ojo etapo bazinis NO_x koncentracijų dūmuose tyrimas

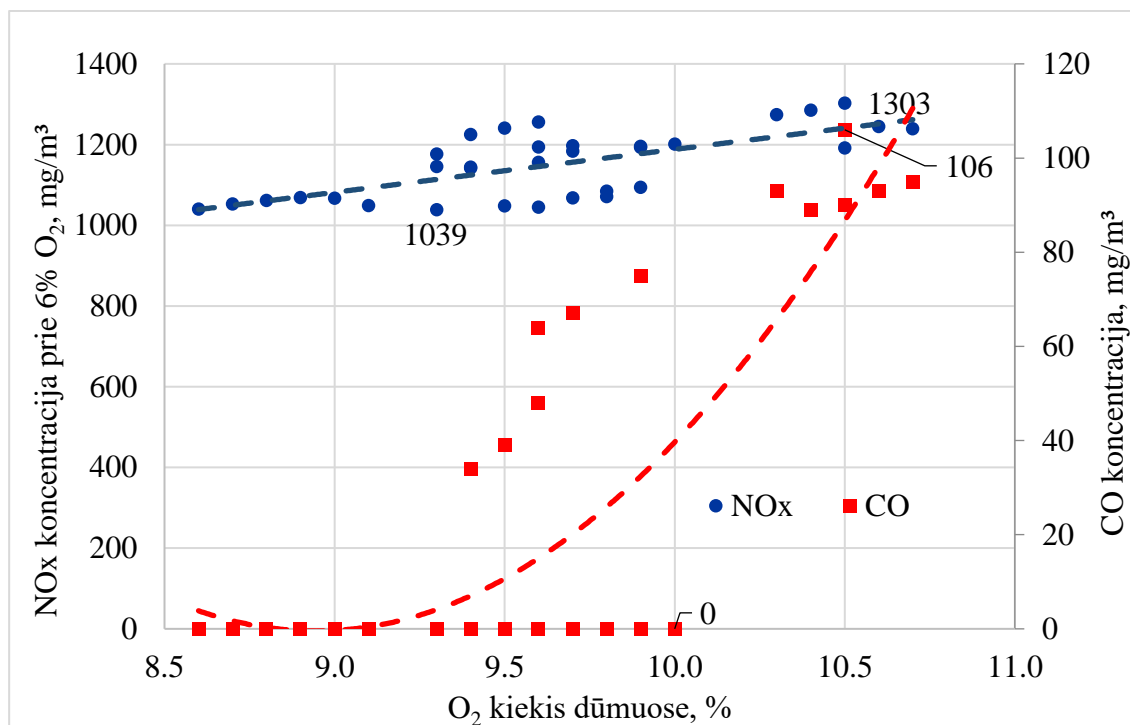
Antrojo etapo tyrimai pradami deginant MDP granules netaikant jokių NO_x mažinimo priemonių, norint nustatyti bazines teršalų koncentracijas išmetamuosiuose degimo produktuose.

Kuras stende buvo deginamas taip, kad degimo temperatūra neviršytų 1200 °C. Šioje temperatūroje beveik nesusidaro terminiai azoto oksidai, o susitarusiųjų kiekis yra toks mažas, kad galima jų iš viso nevertinti. Dėl šios priežasties galima analizuoti azoto oksidų susidarymą tik iš kure esančio azoto.

Į pakurą tiekiamas oras santykiu 40/60. 40 % degimui reikalingo oro tiekama iš po ardyno į apatinį kuro sluoksnį. Likusi dalis 60 % tiekama virš kuro sluoksniu, kur degimo produktai vis dar yra aukštos temperatūros apie 1100 °C.

Prieš atliekant azoto oksidų mažinimo tyrimus taikant SNKV technologija su įvairiais priedais, nustatomas azoto oksidų kiekis, esant 40/60 oro santykiu, pastoviai katilo galiai 20 kW ir mažam kuro nesudegimui, kurį nusako CO kiekis dūmuose.

3.4.1 pav. pateikiami pagrindinio kuro deginimo metu susidariusios CO ir NO_x koncentracijos dūmuose priklausomai nuo oro pertekliaus, t.y. deguonies kiekio išmetamuosiuose dūmuose.



3.4.1 pav. NO_x ir CO koncentracijų priklausomybė nuo deguonies, deginant MDP granules.

Azoto oksidų koncentracijos auga didėjant oro pertekliui dūmuose. Mažiausios NO_x koncentracijos 1039 mg/m³ užfiksuotos esant 9,3 % oro pertekliui. Didžiausia NO_x koncentracija 1303 mg/m³, kai MDP granulėse azoto kiekis yra 3,47 %. Galime spręsti, kad didelė dalis kure esančio azoto virsta į azoto oksidus.

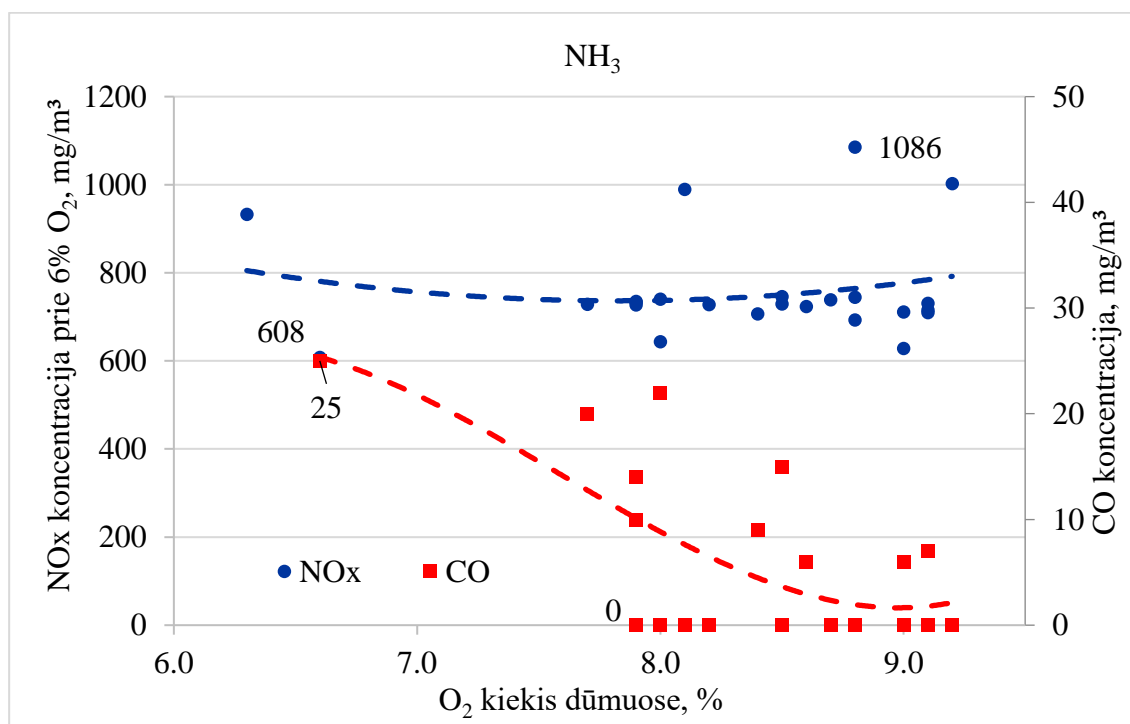
3.5 SNKV technologijos pritaikymas naudojant tradicinius priedus

Selektyvinio nekatalitinio valymo metu, vykstančiose cheminėse reakcijose dominuoja NH₂ ir OH. Esant amoniakui NH₃, jis turi reaguoti su OH, kad pirmiausia susidarytų NH₂. Tuomet NH₂ reaguoja su NO ir taip mažina jų koncentraciją išeinančiuose dūmuose.

SNKV reakcijos yra veiksmingos temperatūros diapazone 900 – 1100 °C, kuris yra vadinamas „temperatūriniu langu“. Šis „temperatūrinis langas“ yra toks siauras, kad amoniako reagentams neužtenka laiko tinkamai išsimaišyti tarp išeinančių dūmų ir tinkamai sureaguoti su NO_x, kas veda prie gana žemo azoto oksidų mažinimo naudingumo (30 – 50 %) [5, 6, 15].

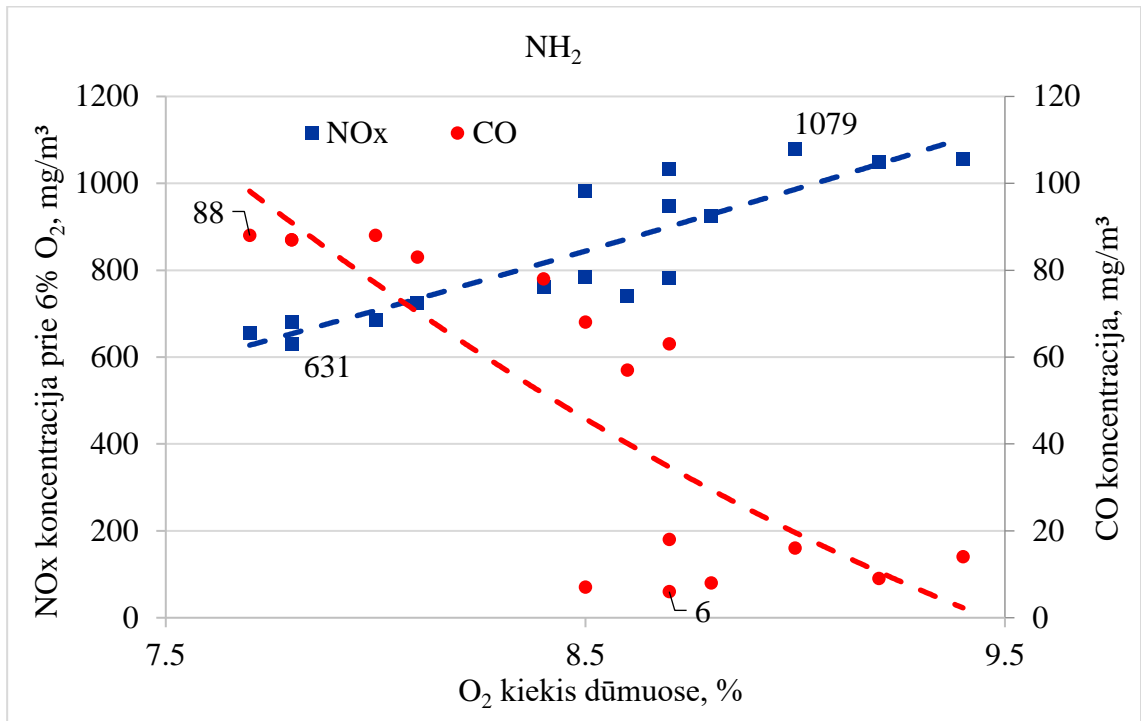
Siekiant eksperimentiškai nustatyti NO_x mažino įtaką naudojant tradicinius priedus (NH_3 ir NH_2) selektyvinio nekatalitinio valymo procese buvo atlikti eksperimentiniai tyrimai naudojant tą patį kūrą, bei išlaikant tuos pačius degimo parametrus kaip nurodyta 3.4. skyriuje.

Priedai buvo tiekiami kartu su antriniu oru, jie susimaišę pateka į antrinę kuro degimo zoną kurioje temperatūra siekė apie $1100\text{ }^\circ\text{C}$.



3.5.1 pav. NO_x ir CO koncentracijų priklausomybė nuo deguonies, deginant MDP granules, kai naudojamas priedas NH_3 .

Tyrimams buvo paruošti tirpalai su vandeniu (NH_2 – 9 % ir NH_3 – 10 %). Eksperimento metu lašintuve buvo nustatytas tiekiamo tirpalo kiekis, patenkantis į antrinio oro kanalą. NH_2 tirpalo lašinimo kiekis buvo nustatytas 11 % nuo naudojamos kuro masės, o NH_3 tirpalo lašinimo kiekis buvo nustatytas 0,7 %, 1,0 %, 2,2 %, 7,4 % nuo naudojamos kuro masės. Po kiekvieno eksperimento etapo, lašinant skirtingus kiekius amoniakinio arba amidinio vandens, buvo laukiama katilo darbinio režimo ir emisijų koncentracijų nusistovėjimo.

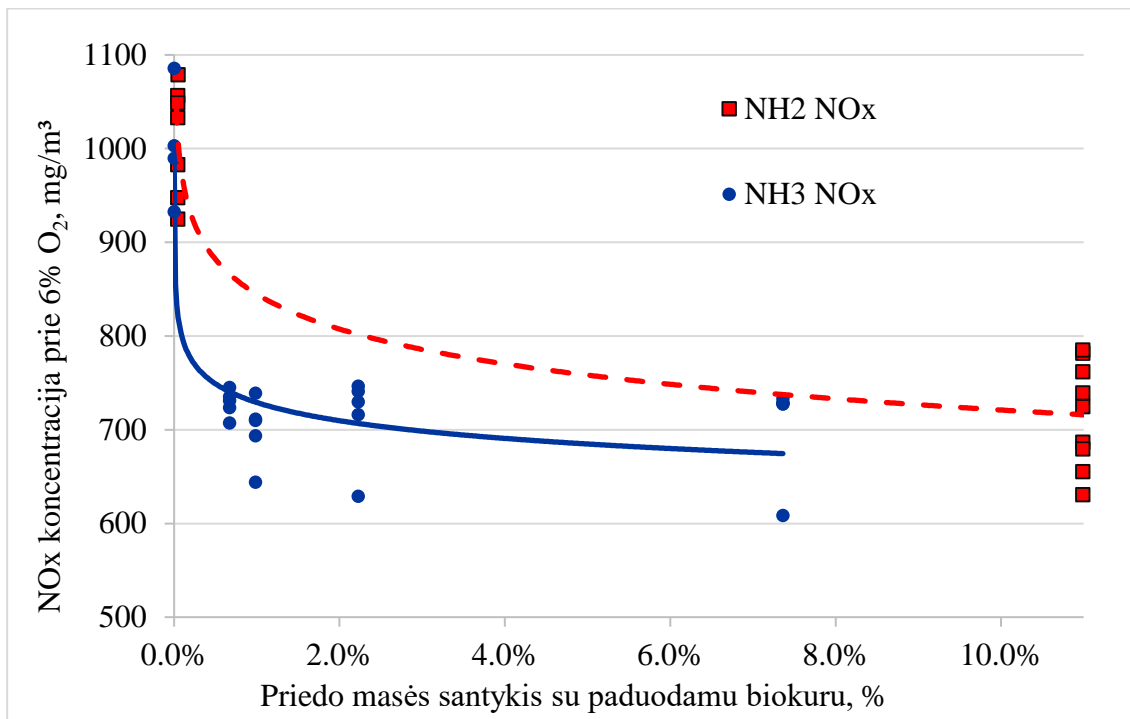


3.5.2 pav. NO_x ir CO koncentracijų priklausomybė nuo deguonies, deginant MDP granules, kai naudojamas priedas NH₂.

3.5.3 pav. parodo SNKV technologijos taikymo azoto oksidų mažinimui rezultatus, kai įpurškiami skirtingos koncentracijos tradicinių priedų tirpalai.

Eksperimentų rezultatai rodo, kad kuo didesnis NH₂ ar NH₃ junginių kiekis tiekimas į degimo kamerą tuo didesnis azoto oksidų mažinimo efektas pasiekiamas. Nors į kamerą buvo tiekiami skirtingų koncentracijų tirpalai su vandeniu (NH₂ – 9 % ir NH₃ – 10 %) efektas stebimas vienodas – NO_x emisijų sumažėjimas iki 45 %. Naudojant šiuos priedus didesnėmis koncentracijomis jų veiksmingumas mažėja. Tad remiantis atliktais tyrimais racionalu naudoti šiuos priedus NO_x sumažinimui iki 40 % panaudojant tik iki pusę tirpalų kiekio kurio reikėtų NO_x koncentracijai sumažinti iki 45 %.

Žiūrint į 3.5.3 pav. rezultatus galime pastebėti, kad kai kurios NO_x reikšmės yra žymiai mažesnės lyginant su bendru vidurkiu. Taip yra dėl to, kad būtent tuo degimo momentu nepildo degimo produktų CO kiekis buvo padidėjęs. Kaip žinome, anglies monoksidas taip pat redukuoja azoto oksidus, taigi tuose momentuose vyksta dvigubo efekto azoto oksidų redukavimas. Tai galime pastebėti naudojant tiek NH₂, tiek NH₃ priedus (žiūr. 3.5.1 ir 3.5.2 pav.).



3.5.3 pav. NO_x priklausomybė nuo tradicinio priedo masės santykio su paduodamu kuru.

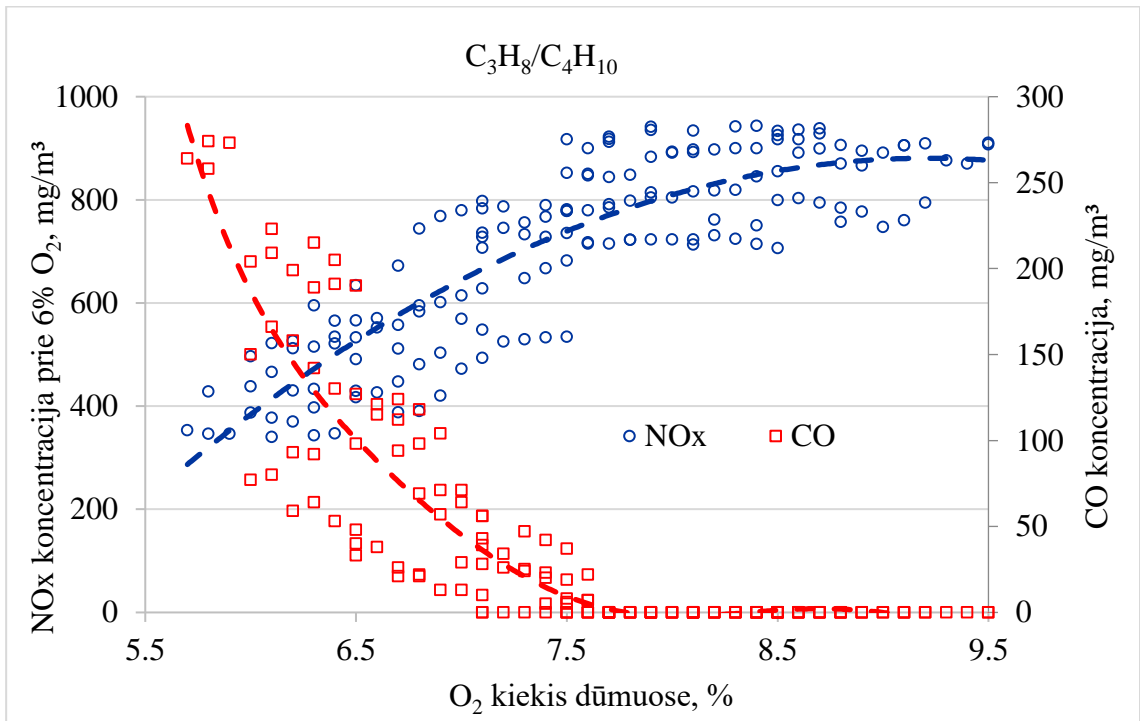
Rezultatai parodo, kad SNKV efektas naudojant tradicinius priedus yra šiek tiek mažesnis nei kitų mokslininkų atliktuose tyrimuose. Tai galima paaiškinti tuo kad: tyrimuose buvo naudojami priedų tirpalai, o ne grynos medžiagos, kaip realiuose objektuose, naudota universali priedų tiekimo sistema ir priedai išpurkšti vienoje zonoje, ne keliose vienu metu. Taigi dalis dūmų srauto galėjo nepatekti į įpurškimo zoną ir praeiti be poveikio.

3.6 SNKV technologijos pritaikymas naudojant degius priedus

Atlikus eksperimentinius tyrimus sudaryti grafikai, kuriuose pateikiama NO_x bei CO koncentracijos keičiantis deguonies kiekiui dūmuose, taip pat NO_x ir CO koncentracijų priklausomybė nuo į degimo kamerą tiekiamų degiųjų priedų kiekio (išreikšto procentais nuo naudojamo pagrindinio kuro įnešamo energijos kiekio bei priedų energijos kiekio santykio).

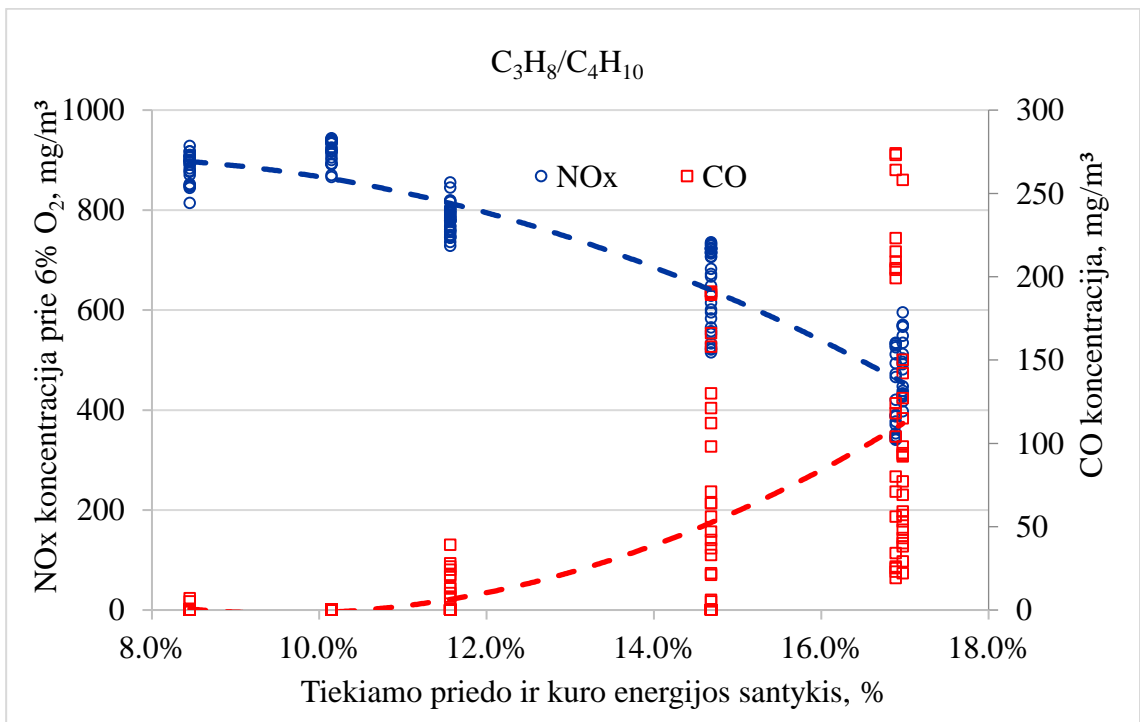
Propano-butano dujų mišinio (C₃H₈/C₄H₁₀) efektas

Tik pradėjus eksperimentus su propano – butano dujomis galime pastebėti gana ryškų NO_x koncentracijos sumažėjimą (3.6.1 pav.). Nenuostabu ir tai, kad pastebimas taip pat ir katilo šiluminės galios padidėjimas. Katilo šiluminė galia tyrimo pradžioje siekė 17,3 kW, o pradėjus tiekti dujas galia pakilo iki 21,0 kW. Tai galime paaiškinti tuo, kad propano butano dujų mišinio šilumingumas yra daugiau nei du kartus didesnis nei šio tyrimo metu naudojamų MDP granulių. Dujų tiekimas taip pat sumažino deguonies perteklių.



3.6.1 pav. NO_x ir CO koncentraciju priklausomybė nuo deguonies, deginant MDP granules, kai naudojamas priedas C₃H₈/C₄H₁₀.

3.6.2 pav. galime matyti NO_x ir CO koncentraciju priklausomybė nuo priedo ir kuro energijos santykio, deginant MDP granules, kai naudojamas priedas C₃H₈/C₄H₁₀.

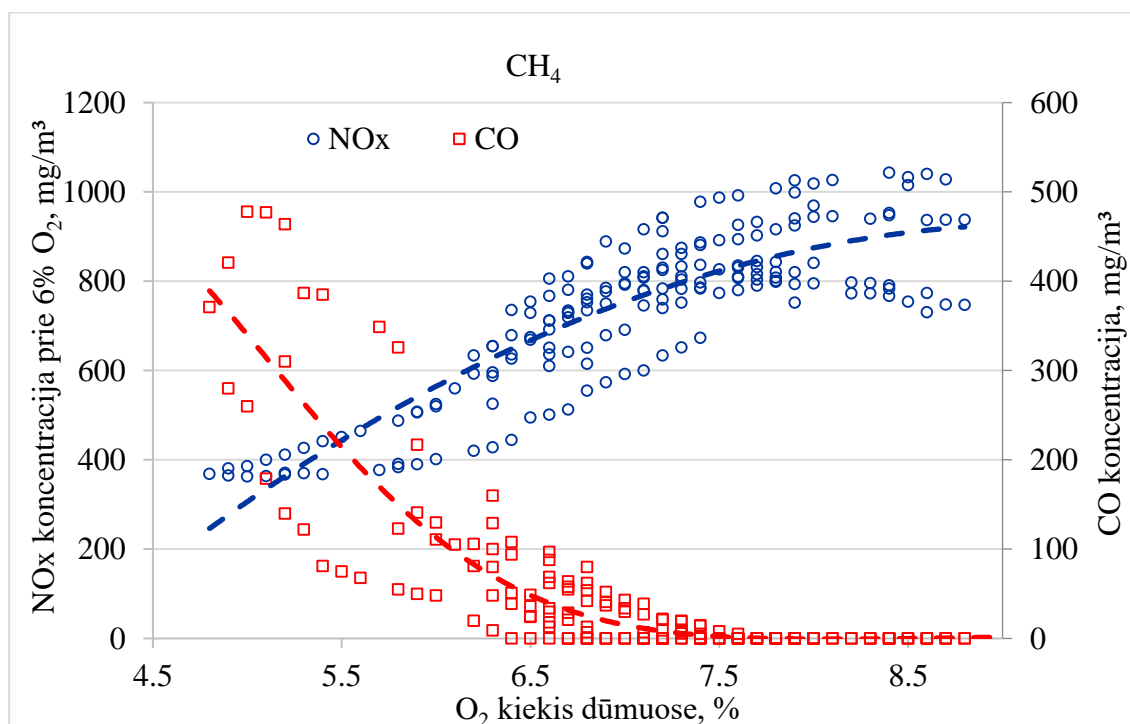


3.6.2 pav. NO_x ir CO koncentraciju priklausomybė nuo priedo ir kuro energijos santykio, deginant MDP granules, kai naudojamas priedas C₃H₈/C₄H₁₀.

Propano/butano dujos buvo tiekiamos į antrinio oro kanalus kartu su antriniu oru. Atsižvelgiant į kitų, anksčiau darytų eksperimentinių tyrimų išvadas, buvo pasirinkta tiekti nuo 130 iki 300 l/val debitą. Pradžioje, dujų skaitikliu Gallus 2000, nustatytas tiekiamų dujų tūris per numatytą laiko trukmę. Paskui buvo apskaičiuotas pratekančių dujų debitas. Priimant, kad naudojamų propano/butano dujų santykis yra 1:1 ir remiantis dujų 1 m³ mase esant normalioms sąlygoms, skaičiavimo būdu rasta tiekiamų dujų masė.

Tyrimo metu, kai tiekiamas 17 %, masės kuro atžvilgiu, propano/butano dujų mišinys, NO_x vidutiniškai sumažėjo nuo 960 mg/m³ iki 450 mg/m³. Sumažėjimą lemia aktyviųjų angliavandenilių tiekimas į antrinę degimo zoną. Aktyvieji angliavandeniliai cheminių reakcijų metu skyla į lengvesnius tarpinius angliavandenilius, tarp kurių yra ir CH₄, kuris cheminės reakcijos metu su NO_x verčia azoto oksidus disocijuoti į elementinio azoto ir dviatomio deguonies molekules.

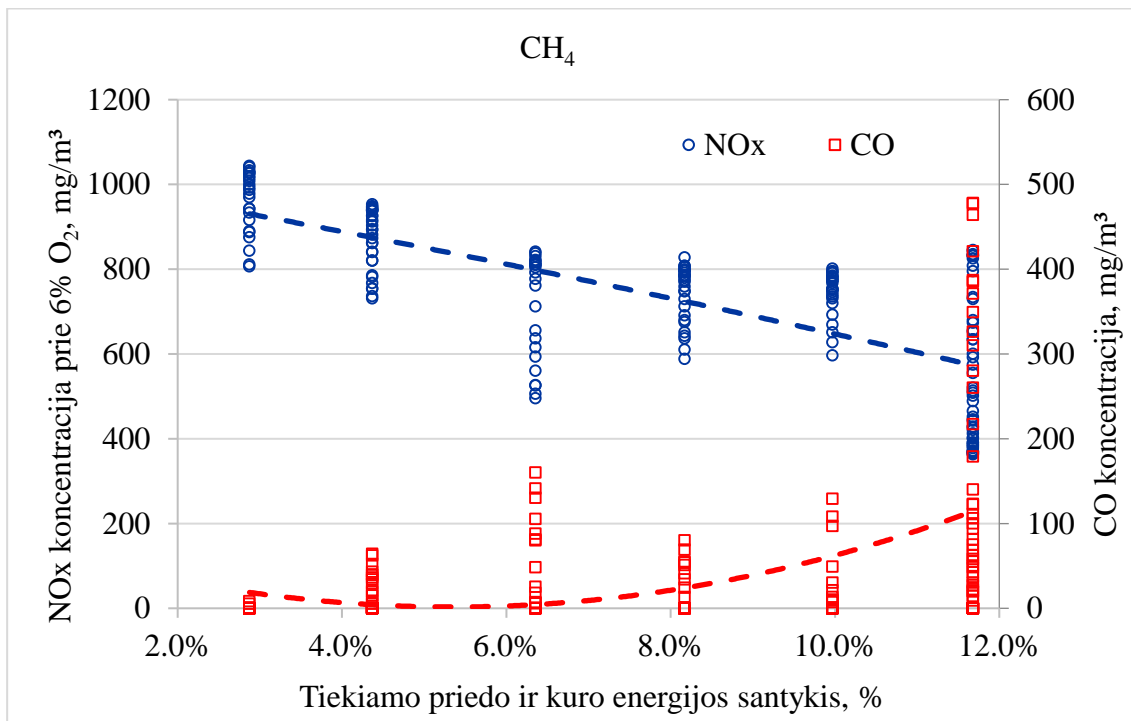
Gamtinių dujų (CH₄) efektas



3.6.3 pav. NO_x ir CO koncentracijų priklausomybė nuo deguonies, deginant MDP granules, kai naudojamas priedas CH₄.

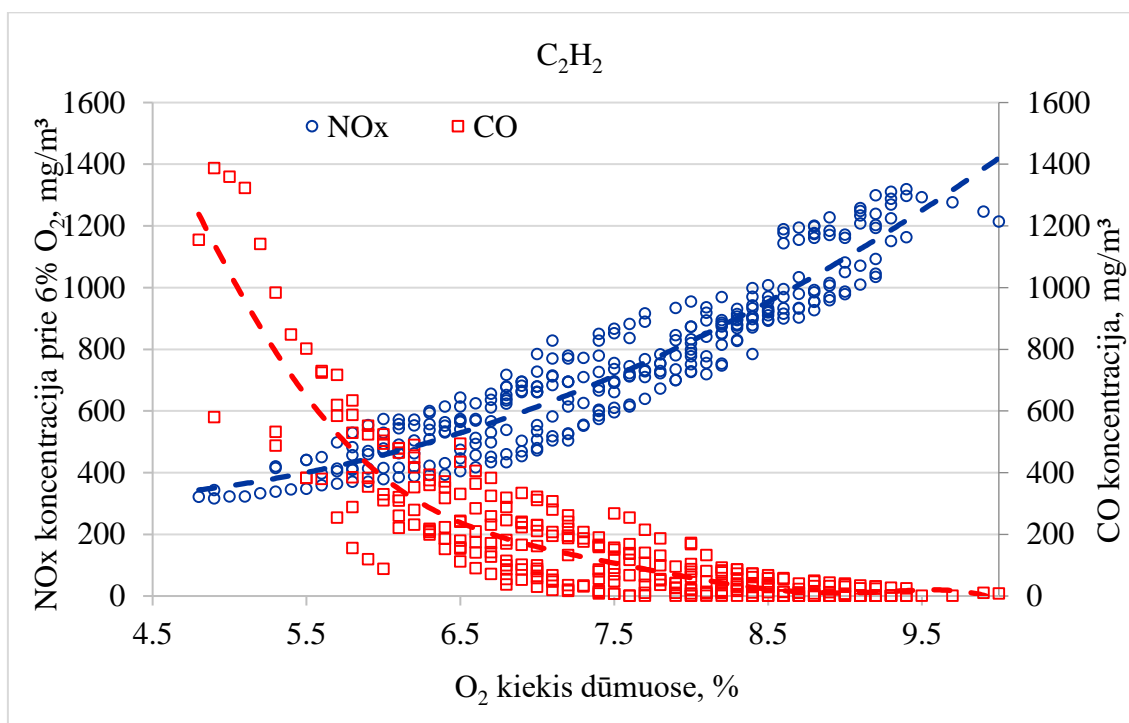
Metanas buvo tiekiamas į pakurą pro antrinio oro padavimo vamzdžius. Tiekiamo debito diapazonas nuo 130 iki 560 l/h.

Tiekiant 11,7 % metano dujų mišinio masės kuro atžvilgiu, NO_x vidutiniškai sumažėjo nuo 1010 mg/m³ iki 390 mg/m³.

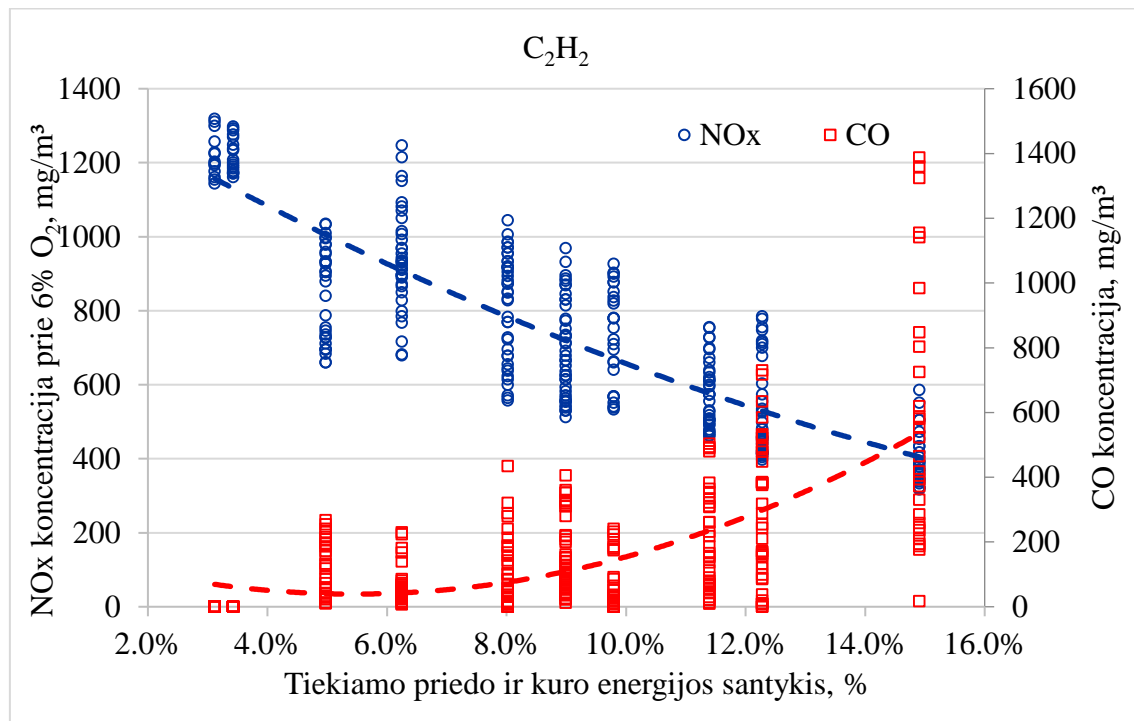


3.6.4 pav. NO_x ir CO koncentracijų priklausomybė nuo priedo ir kuro energijos santykio, deginant MDP granules, kai naudojamas priedas CH_4 .

Acetileno (C_2H_2) efektas



3.6.5 pav. NO_x ir CO koncentracijų priklausomybė nuo deguonies, deginant MDP granules, kai naudojamas priedas C_2H_2 .



3.6.6 pav. NO_x ir CO koncentracijų priklausomybė nuo priedo ir kuro energijos santykio, deginant MDP granules, kai naudojamas priedas C₂H₂.

Apibendrinimas

Mažiausios užfiksuotos NO_x koncentracijos naudojant acetileną (316 mg/m³). Į degimo kamerą tiekiant metaną ir propano/butano mišinį, azoto oksidų koncentracijos sumažėjo atitinkamai iki 363 mg/m³ ir 340 mg/m³.

Mažiausios NO_x koncentracijos susidaro esant didžiausioms anglies monoksido koncentracijoms bei mažiausiam oro pertekliui. Prie NO_x mažinimo sąlygų prisideda ir aukštesnė degimo zonos temperatūra. Tiekiant maksimalų dujų kiekį iki 17 % pagal energijos kiekį degimo zonos temperatūra pakyla nuo 1100 °C iki beveik 1300 °C.

Naudojant degius priedus pastebimas ne tik oro pertekliaus reikšmingas sumažėjimas, bet ir CO kiekio padidėjimas. Priešingai negu naudojant SNKV tradicinius NO_x mažinimo priedus, CO koncentracijos didinant naudojamų priedų kiekį keitėsi nežymiai arba net mažėjo, tai degių priedų atveju didinant naudojamo priedo kiekį didėjo ir CO koncentracija.

Remiantis gautais rezultatais galima daryti išvadą, jog oro perteklius sumažėja dėl tiekiamų degių dujų. Vadinasi, kuo daugiau dujų tiekama į degimo zoną tuo mažiau laisvo deguonis lieka. Sumažėjus deguonies kiekiui mažiau nei 6 %, nepakanka deguonies, kad visiškai sudegtų visi degūs elementai pradeda augti anglies monoksido koncentracijos.

Nesant laisvam deguonies kiekiui nuo kieto kuro atsiskyres azotas sunkiau gali sudaryti junginius su deguonimi NO ir NO₂. Todėl viena iš priežasčių kodėl mažėja NO_x koncentracija dūmuose mažėjant oro pertekliui yra sumažėjęs laisvo deguonies kiekis.

Kita priežastis veikianti mažesnes NO_x koncentracijas – didesnis CO kiekis degimo zonoje, kuris neigiamai veikia NO_x susidarymą. CO įtaka azoto oksidams didėja didėjant degimo zonos temperatūrai ir laikui, praleistam šioje temperatūroje. Taigi šiuo atveju taip pat vyksta dvigubo efekto azoto oksidų redukavimas.

Tyrimuose naudojant degius priedus, azoto oksidų koncentracijos dūmuose sumažėjo nuo 68,4 iki 72,5 %. Priklausomai nuo naudojamų dujų ir jų kiekio.

NO_x mažinimo efektas jau yra pastebimas tiekiant į degimo kamerą dujas iki 3 % pagal energijos kiekį. Tokiu atveju NO_x koncentracija dūmuose sumažėja apie 15,74 %. Tačiau tiekiant dujas iki 6 % pagal energijos kiekį, gaunamas toks pats efektas kaip į degimo kamerą tiekiant tradicinius priedus iki 2,5 % pagal masės santykį.

Didinant tiekiamų tradicinių priedų kiekį, jų efektyvumas auga nežymiai. Todėl tradiciniais priedais negalima žymiai sumažinti NO_x koncentracijas dūmuose. Ir dažnu atveju siekiant didesnio mažinimo efekto patiriami amoniako nutekėjimai, ne visas amoniakas spėja sureaguoti su NO_x.

Degūs priedai pranašesni nei tradiciniai dėl didesnio NO_x koncentracijų sumažinimo iki 73 %. Nėra taršių degių priedų nutekėjimų, galimi tik nepilno degimo produktai (CO). Naudojant degius priedus gaunamas papildomas energijos kiekis, kuris gali būti naudingai panaudotas.

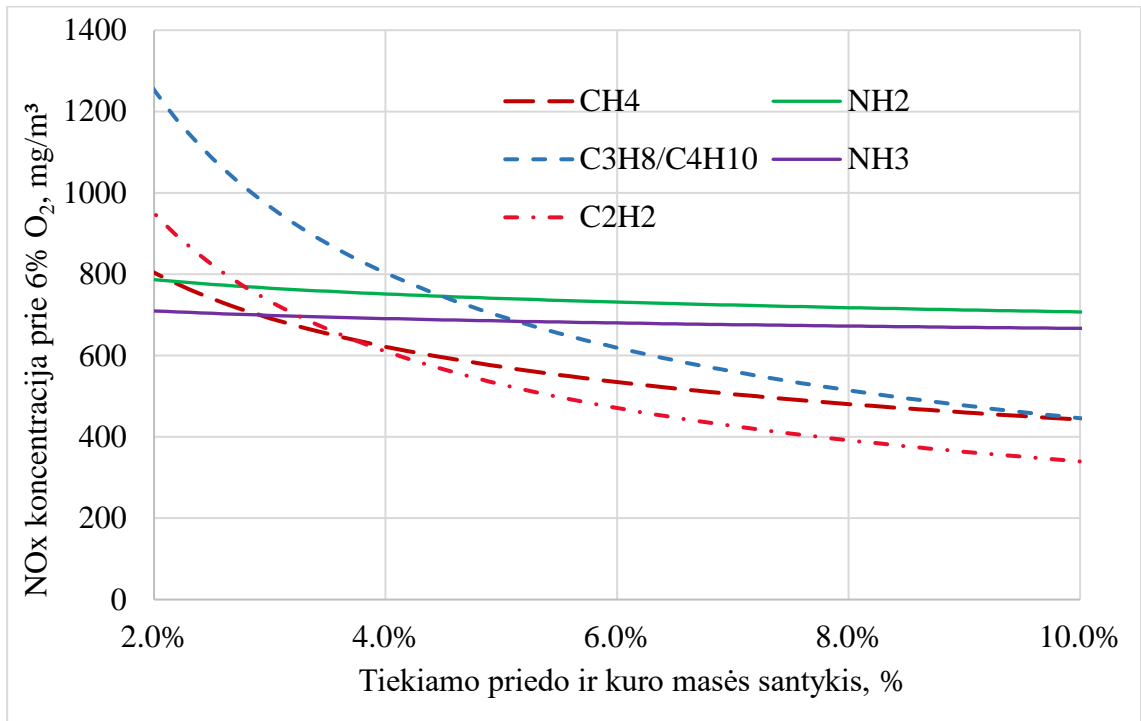
Degių priedų naudojimo privalumai: nereikia papildomos įrangos NH₃ saugojimui, dozavimui, paprasta integruoti į esamus katilus, lengvas valdymas, papildomai gaunama energija.

Recirkuliacinių dūmų arba vandens garo tiekimas į pakurą nežymiai sumažina azoto oksidų koncentracijas.

3.7 Azoto oksidų mažinimo efektyvumo palyginimas

SNKV mažinimo technologijoje pritaikius degius priedus, būtų pasiektas didesnis NO_x mažinimo efektyvumas, nei su tradiciniais priedais. Todėl siekiant palyginti tradicinius bei degius priedus sudarytas grafikas kuriame tiekiami į degimo kamerą priedai matuojami pagal santykinės masės dalimis priklausomai nuo pagrindinio kuro.

Tradiciniai priedai, kaip matyti 3.7.1 pav., pasižymi dideliu efektyvumu esant nedideliems kiekiams (iki 2,5 %). Tiekiant didesnius kiekius priedo NO_x koncentracija mažėja tolygiai apie 10 mg/m³ su kiekvienu papildomu procentu priedo. Tai reiškia, kad šios sistemos su tokia degimo lauko temperatūra ir degimo produktų sąveikos laiku maksimali tradicinių priedų riba ir siekia 2,5 %. Tiekiant daugiau priedo, didžioji jo dalis nsureaguoja ir pasišalina amoniako pavidalu su dūmais.

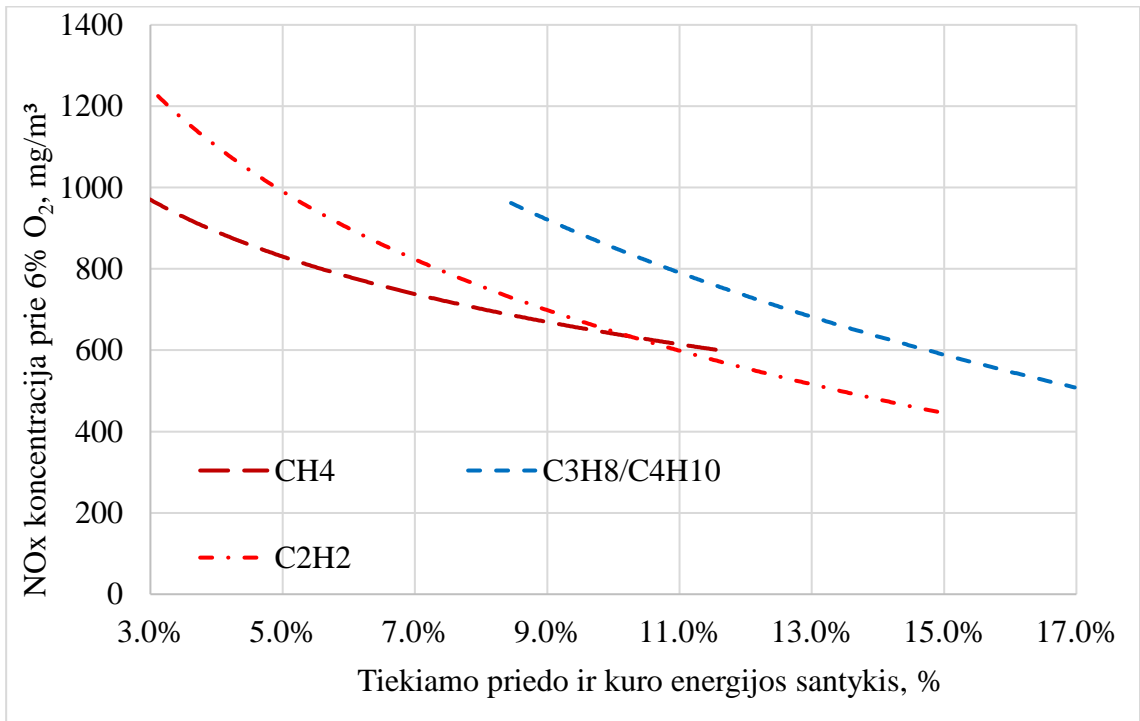


3.7.1 pav. NO_x sumažinimo efektyvumo palyginimas taikant degius ir tradicinius priedus. NO_x koncentracijos priklausomybė nuo kuro masės santykio tiekiamo į degimo kamerą.

Degūs priedai lyginant su tradiciniais esant mažiems kiekiams ne tokie efektyvūs, tačiau, kai tiekama daugiau nei 3 %, NO_x mažinimo efektyvumas pralenkia tradicinius priedus. Degių priedų tiekimą padidinus nuo 3 % iki 10 % NO_x koncentracija sumažėja apie 300 mg/m³. Todėl degūs priedai veikia efektyviai didesniame tiekimo diapazone.

3.7.2 pav. pateikiamas NO_x sumažinimo efektyvumo palyginimas tiekiant degias dujas. Grafike vaizduojama NO_x koncentracijos priklausomybė nuo priedo ir kuro energijos santykio. Matome, kad, kai degių dujų energetinis santykis su tiekiamu kuru yra iki 10 %, efektyviausiai azoto oksidus mažina metanas. Acetilenas, lyginant su metanu, esant mažesniems tiekiamų dujų kiekiams, ne toks efektyvus, tačiau, kai tiekama daugiau nei 10 %, NO_x mažinimo efektyvumas pralenkia metano daromą efektą. Tiekiant acetileno dujas 15 % santykiu pagal energetinę vertę su pagrindiniu kuru, azoto oksidų koncentracija sumažėja maždaug iki 420 mg/m³.

Taigi, taikant šią technologiją bei pasirenkant naudojamų degių dujų rūšį reikėtų atsižvelgti į patį azoto oksidų mažinimo poreikį bei katilo technologinį išpildymą, nes, kaip ir minėta, tiekiant dujas gaunama papildoma energija.



3.7.2 pav. NO_x sumažinimo efektyvumo palyginimas tiekiant degias dujas. NO_x koncentracijos priklausomybė nuo priedo ir kuro energijos santykio.

IŠVADOS

1. Recirkuliuojamų dūmų tiekimas kartu su antriniu oru yra efektyvesnis nei juos tiekiant kartu su pirminiu oru ir sumažina azoto oksidų koncentracijas išmetamuosiuose dūmuose 38 %, vidutiniškai nuo 950 mg/m³ iki 590 mg/m³. Tačiau didėjant recirkuliuojamų dūmų kiekiui, jų poveikis NO_x koncentracijai mažėja.
2. Vandens garo įpurškimas į antrinio oro padavimo zoną nedaro didelės įtakos NO_x koncentracijai. Tiekiant vandens garą našumu 2,23-3,5 kg/h, t.y. 30–46 % nuo paduodamo kuro masės, azoto oksidų koncentracija vidutiniškai sumažėja 13 %, nuo 850 mg/m³ iki 780 mg/m³.
3. Amoniakų įvedimas nedideliais kiekiais (iki 2,5 %) į pasibaigusio degimo zoną, efektyviai mažina NO_x koncentraciją 40 %. Gauti rezultatai rodo, kad tiekti amoniaką didesniu nei 2,5 % kiekiu yra neracionalu, nes net ir padidinus amoniakų įvedimą dvigubai, poveikis NO_x papildomai padidėja tik 5 %.
4. Degiųjų dujų įvedimas į baigiamojo degimo zoną sudarant redukcinę aplinką yra pats efektyviausias, iš nagrinėtų, NO_x mažinimo metodas ir leidžia sumažinti azoto oksidų koncentraciją 73 %. Degiųjų dujų priedai, tiekiant juos nedideliais kiekiais (iki 2,5 % nuo kuro masės) yra mažiau efektyvūs už amoniaką, tačiau, kai jų tiekama daugiau nei 3 %, azoto oksidų koncentracijų mažinimo efektyvumas tampa ženklaus. Degūs priedai yra veiksmingesni tiekiant didesnius jų kiekius – nuo 3 % iki 10 %, tai leidžia sumažinti azoto oksidų koncentraciją nuo pradinių 800 – 1200 mg/m³ iki 360 – 420 mg/m³.
5. Lyginant degiųjų dujų poveikį NO_x mažinimui pagal dujų ir kuro degimo šilumos santykį, esant šiam santykiui iki 10 %, efektyviausiai azoto oksidus mažina metanas. Tačiau, kada tiekama daugiau nei 10 % dujų pagal degimo šilumą, acetileno efektyvumas tampa didesnis, lyginant su metanu.
6. Apibendrinus tyrimų rezultatus matome, kad azoto oksidų mažinimo metodai turėtų būti parenkami atsižvelgiant į NO_x mažinimo poreikį ir sąlygas, nes analizuoti NO_x mažinimo metodai skiriasi savo sudėtingumu, įrengimo bei eksploatavimo kaštais.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. „Biosferos apsauga šiluminėje energetikoje“ P Švenčianas, Kauno technologijos universiteto senato patvirtintas vadovėlis šiluminės energetikos specialybės studentams, Kaunas, Technologija, 1994.
2. „Aplinkosauginių reikalavimų įtakos šilumos tiekimo įmonių rezervinio kuro kaupimui analizė ir rekomendacijos įmonėms dėl rezervinio kuro optimalaus panaudojimo“ Doc.dr. K. Buinevičius, M.Sc. J. Mockuvienė, Doc.dr. E. Puida, Mokslo tiriamasis darbas, Kauno technologijos universitetas, Kaunas, 2007.
3. „Kietojo biokuro naudojimas Lietuvos šilumos gamybos sektoriuje, tolesnės perspektyvos ir poveikis aplinkai“ D. Verbickas, R. Juknys, A. Kleišmantas, Lietuvos mokslų akademija, Energetika, 2013.
4. „Išmetamų teršalų iš kurą deginančių įrenginių normos LAND 43-2013“ patvirtinta Lietuvos Respublikos aplinkos ministro 2013 m. balandžio 10 d. įsakymu Nr. D1-244.
5. „Experimental and modeling study of the effect of CH₄ and pulverized coal on selective non-catalytic reduction process“ Y. Zhang, N. Cai, J. Yang, B. Xu, Chemosphere 650-656 p., 2008.
6. „Control of combustion-generated nitrogen oxides by selective non-catalytic reduction“ M. Tayyeb Javed, N. Irfan, B.M. Gibbs, Aplinkosaugos vadybos leidinys. 251-289 p., 2007.
7. „NO_x emission reduction by staged combustion in grate combustion of biomass fuels and fuel mixtures“ E. Houshfar, Ø. Skreiberg, D. Todorovic, A. Skreiberg, T. Løvås, A. Jovovic, L. Sørum, Kuras 29-40p., 2012.
8. „Ammonia Conversion and NO_x Formation in Laminar Coflowing Nonpremixed Methane-Air Flames“ N. Sullivan, A. Jensen, P. Glarborg, M. S. Day, J. F. Grcar, J. B. Bell, C. J. Pope, R. J. Kee, Degimo institutas, 2002.
9. „Fuel nitrogen conversion in solid fuel fired systems“ P. Glarborg, A.D. Jensen, J.E. Johnsson, Technical University of Denmark 2002.
10. „Influence of process parameters on nitrogen oxide formation in pulverized coal burners“ R. P. van der Lans, P. Glarborg and K. Dam-Johansen, Technical University of Denmark 1997.
11. „Modeling of nitrogen oxides formation and destruction in combustion systems“ S.C. Hill, L. Douglas Smoot, Brigham Young University 2000.

12. Taršos integruota prevencija ir kontrolė (TIPK), Informacinio dokumento apie geriausius prieinamus gamybos būdus (GPGB) dideliems kurą deginantiems įrenginiams anotacija, 2005.
13. <http://www.azo.lt>
14. „Šiluminė technika“, G.Gimbutis, K. Kajutis, A. Pranckūnas, P. Švenčianas, Vilnius „Mokslas“ 1993.
15. „NO emissions and combustion efficiency during biomass co-firing and air-staging“ Y. Wang, X. Wang, Z. Hu, Y. Li, S. Deng, B. Niu, Bioištekliai 3987-3998p., 2003.
16. „Influence of multiple air staging and reburning on NO_x emissions during co-firing of low rank brown coal with woody biomass and natural gas“ N. Hodžic, A. Kazagic, I. Smajevic, 38-47 p., 2016.