



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Selektyvios nekatalizinės azoto oksidų redukcijos valdymo algoritmo sukūrimas ir tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Oskaras Vilbikas

Projekto autorius

Doc. dr. Gintaras Dervinis

Vadovas

Kaunas, 2025



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Selektyvios nekatalizinės azoto oksidų redukcijos valdymo algoritmo sukūrimas ir tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Valdymo technologijos (6211EX014)

Oskaras Vilbikas

Projekto autorius

Doc. dr. Gintaras Dervinis

Vadovas

Doc. prakt. dr. Darius Ezerskis

Recenzentas

Kaunas, 2025



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Oskaras Vilbikas

Selektyvios nekatalizinės azoto oksidų redukcijos valdymo algoritmo sukūrimas ir tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) 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 (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Oskaras Vilbikas

Patvirtinta elektroniniu būdu

Oskaras Vilbikas. Selektyvios nekatalizinės azoto oksidų redukcijos valdymo algoritmo sukūrimas ir tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Gintaras Dervinis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: azoto oksidai, PID, fuzzy valdymas, Smith prediktorius, emisijų valdymas.

Kaunas, 2025. 59 p.

Santrauka

Baigiamajame magistro projekte ištirtas SNCR proceso valdymas pramoniniame biomasės kuro katile. Šiame katile naudojamas kuras yra medienos granulės ir bagasas - cukranendrių atliekos. Sukurtas proceso imitacinis matematinis modelis *Ovation DCS* paskirstytoje valdymo sistemoje, aprašant azoto oksidų susidarymą iš kuro skilimo, bei šiluminiu būdu, SNCR redukcijos, amoniakinio reagento įpurškimo ir amoniakinio nuotėkio procesus.

Pagrindinis tyrimo tikslas yra sukurti SNCR valdymo metodą, kuris pakeistų esamą ir reaguotų į kuro drėgmę. Tam buvo naudojama fuzzy taisyklių valdymo sistema su Smith prediktoriumi, kuri pakeitė esamą receptinį valdymą. Projektuojamo reguliatoriaus įėjimai yra katilo reakcijos zonos temperatūra, garo srautas (garo apkrova) ir biokuro drėgmė. Reguliatoriaus išduodamas signalas yra amoniakinio reagento srautas. Šis reagentas reaguodamas su azoto oksidais juos redukuoja ir taip sumažina į atmosferą patenkančių teršalų kiekį iki nustatytos ribos.

Oskaras Vilbikas. Development and Research of Control Algorithm for Selective Non-catalytic Reduction of Nitrogen Oxides. Master's Final Degree Project / supervisor doc. dr. Gintaras Dervinis; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Electronics engineering, engineering science.

Keywords: nitrogen oxides, PID, fuzzy control, Smith predictor, emission control.

Kaunas, 2025. 59 p.

Summary

The final master's project investigated the control of the SNCR process in an industrial biomass fuel boiler. The fuel used in this boiler is wood pellets and bagasse - sugarcane waste. A mathematical model of the process was created in the *Ovation DCS* distributed control system, including the formation of nitrogen oxides from burning fuel and thermal, SNCR reduction, ammonia reagent injection and ammonia slip processes.

The main goal of the study is to create a SNCR control method that would replace the existing one and would respond to fuel moisture. For this, a fuzzy logic control system with Smith predictor was used that replaced the existing prescription control. The inputs to the designed controller are the temperature of the boiler reaction zone, steam flow (steam load) and biofuel moisture. The signal output of the controller is urea flow. This urea, reacting with nitrogen oxide, reduces them and thus reduces the amount of pollutants entering the atmosphere to the required limit.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Įvadas.....	11
1. Azoto oksidų susidarymas	12
1.1. Azoto oksidai.....	12
1.2. Pagrindiniai NO _x šaltiniai	12
1.3. Poveikis aplinkai	13
1.4. NO _x emisijų mažinimo metodai.....	13
1.5. SNCR ir SCR palyginimas	15
2. SNCR reguliavimo metodai	18
2.1. PID reguliatorius	18
2.2. Trikščio valdymas (<i>angl. Feed-forward</i>).....	18
2.3. Modelį prognozuojantis valdiklis (MPC).....	19
2.4. Neraiškios logikos valdikliai	19
2.5. Smith prediktorius	20
3. Tiriamasis objektas	21
3.1. Valdymo režimai ir valdymo algoritmas	23
3.2. Receptinis valdymas	25
4. Proceso imitacinio modelio kūrimas.....	27
4.1. NO _x susidarymo matematinis modelis	28
4.2. Drėgmės įtakos modeliavimas.....	30
4.3. Amoniakinio nuotėkio modeliavimas.....	31
5. SNCR valdymas naudojant Fuzzy taisykles ir Smitho prediktorių.....	35
5.1. Fuzzy <i>Ovation</i> aprašymas, galimybės ir apribojimai	35
5.2. Fuzzy taisyklių sudarymas	36
5.3. Valdymo kontūrų sudarymas.....	38
5.4. Eksperimentiniai bandymai	39
5.4.1. Skirtingų valdymo sistemų pereinamojo proceso palyginimas	39
5.4.2. Valdymo sistemų reakcijos į proceso parametrus	44
5.4.3. Reakcija į drėgmės ir kuro santykio pokytį.....	44
5.4.4. Reakcija į temperatūros pokyčius.....	48
5.4.5. Reakcija į garo srauto pokyčius.....	49
5.4.6. Reakcija į kuro srauto pokytį.....	52
Išvados ir rezultatai.....	57
Literatūros sąrašas	58

Lentelių sąrašas

1 lentelė. SCR ir SNCR palyginimas [7]	16
2 lentelė. NO _x šuolinės reakcijos (400-285mg/Nm ³) parametrai	41
3 lentelė. NO _x šuolinės reakcijos (285-340 mg/Nm ³) parametrai	42
4 lentelė. NO _x šuolinės reakcijos (335-395 mg/Nm ³) parametrai	43
5 lentelė. Reakcijos į kuro santykio pokytį (50-60%) parametrai	45
6 lentelė. Reakcijos į kuro santykio pokytį (60-100%) parametrai	47
7 lentelė. Reakcijos į kuro drėgmės pokytį (39-24%) parametrai	48
8 lentelė. Reakcijos į garo srauto pokytį 140-58,5 t/h parametrai	50
9 lentelė. Reakcijos į garo srauto pokytį 58-86 t/h parametrai	51
10 lentelė. Reakcijos į garo srauto pokytį 86-58 t/h parametrai	52
11 lentelė. Reakcijos į kuro srauto pokytį (50-60%) parametrai	54
12 lentelė. Reakcijos į kuro srauto pokytį (60-80%) parametrai	55
13 lentelė. Reakcijos į kuro srauto pokytį (80-50 %) parametrai	56

Paveikslų sąrašas

1 pav. Dulkių, azoto oksidų ir sieros dioksido išmetimas iš didelių kurą deginančių įrenginių ES-27 [21].	13
2 pav. SNCR proceso principinė schema [3]	14
3 pav. SCR proceso principinė schema [4]	14
4 pav. Grįžtamojo ryšio valdymo sistema ir perdavimo funkcija [9]. Čia $G_c(s)$ -PID reguliatorius, $G_s(s)$ – amoniakinio vandens purkštukai, $H(s)$ NO _x jutikliai.	18
5 pav. <i>Feed-forward</i> valdymo struktūrinė schema	18
6 pav. MPC valdymo sistema.	19
7 pav. Įprastinio SNCR ir neraiškios logikos SNCR išeigų rezultatai.	20
8 pav. Tipinė valdymo su Smith prediktoriumi blokinė diagrama	20
9 pav. Degimo katilo zonos. SNCR vyksta mėlynu punktyrų pažymėtoje zonoje.	21
10 pav. Operatoriaus HMI lango fragmentas. SNCR purkštukai ir aktyviosios zonos.	21
11 pav. Principinė SNCR schema	22
12 pav. Operatoriaus HMI. Reagentų maišymo vožtuvai	23
13 pav. Operatoriaus HMI. Kairėje - proceso reguliatoriai, viduryje - valdymo, kairėje - skaičiavimo režimai	23
14 pav. Operatoriaus HMI. NO _x valdymo iššokantysis langas	24
15 pav. SNCR valdymo schema	25
16 pav. <i>Ovation DCS</i> . Receptų funkcijos pagal garą.	25
17 pav. <i>Ovation DCS</i> . Receptų funkcijos pagal temperatūras.	25
18 pav. Operatoriaus HMI langas. Purkštukų atidarymo režiai	26
19 pav. NO _x susidarymo principinė modelio schema	27
20 pav. Temperatūros ir garo srauto istoriniai duomenys	28
21 pav. Temperatūros ir garo srauto duomenys iš imitacinio modelio	28
22 pav. SNCR efektyvumo priklausomybė nuo temperatūros [8]	30
23 pav. Katilo išmetamų dujų temperatūros priklausomybė nuo kuro drėgmės [11]	31
24 pav. NSR santykio įtakos NH ₃ funkcija [14]	32
25 pav. Temperatūros įtakos NH ₃ nuotėkiui funkcija [14]	32
26 pav. NSR įtakos NH ₃ nuotėkiui funkcijos gautos modelyje	32
27 pav. Amoniakinio nuotėkio priklausomybės nuo temperatūros pasiskirstymas iš istorinių duomenų ir teorinė funkcija iš pav. 26	33
28 pav. Pataisyta amoniakinio nuotėkio priklausomybė nuo temperatūros	33
29 pav. Temperatūros ir NSR įtakos NH ₃ nuotėkiui funkcijos gautos imitaciniame modelyje	34
30 pav. SNCR proceso grįžtamojo ryšio (NO _x matavimo) vėlavimo laiko nustatymas	34
31 pav. Garo srauto fuzzy narių funkcijos	36
32 pav. Temperatūros fuzzy narių funkcijos	36
33 pav. Kuro drėgmės fuzzy narių funkcijos	37
34 pav. Sudarytos fuzzy taisyklės	37
35 pav. 1 valdymo sistema. Pradinis SNCR proceso valdymo kontūras su receptais ir PI reguliatoriais	38
36 pav. 2 valdymo sistema. Patobulintas pradinis SNCR proceso valdymo kontūras su receptais, PI reguliatoriais ir Smith prediktoriumi	38
37 pav. 3 valdymo sistema. SNCR proceso valdymo kontūras su fuzzy taisyklių rinkiniu ir PI reguliatoriais	39

38 pav. 4 valdymo sistema. SNCR proceso valdymo kontūras su fuzzy taisyklių rinkiniu, PI reguliatoriais ir NO _x Smith prediktoriumi	39
39 pav. Proceso reakcija į NO _x lygio pokytį	40
40 pav. Proceso reakcijos į NO _x pokytį reguliatorių išėjimo signalai (reagento srautas, l/h)	40
41 pav. Proceso reakcija į NO _x lygio pokytį	41
42 pav. Proceso reakcijos į NO _x pokytį reguliatorių išėjimo signalai (reagento srautas, l/h)	42
43 pav. Proceso reakcija į NO _x lygio pokytį	43
44 pav. Proceso reakcijos į NO _x pokytį reguliatorių išėjimo signalai (reagento srautas, l/h)	43
45 pav. Procesas, kai temperatūra redukcijai yra per aukšta	44
46 pav. Proceso reakcijos į bagaso santykio pokytį 50-60%	45
47 pav. Proceso reakcijos į bagaso santykio pokytį 50-60%. Reguliatorių išėjimai	45
48 pav. Proceso temperatūros, drėgmės ir NO _x prieš SNCR reakcijos į bagaso santykio pokytį 60-100%	46
49 pav. Proceso reakcijos į bagaso santykio pokytį 60-100%	46
50 pav. Proceso reakcijos į bagaso santykio pokytį 60-100%. Reguliatorių išėjimai	46
51 pav. Proceso reakcijos į kuro drėgmės pokytį 39-24%	47
52 pav. Proceso reakcijos į kuro drėgmės pokytį 39-24%. Reguliatorių išėjimai	47
53 pav. Proceso reakcijos į temperatūros pokytis 1116-855-1050°C	48
54 pav. Proceso reakcijos į mažą NO _x lygį	49
55 pav. NO _x koncentracijos reakcijos į garo srauto pokytį 140-58,5 t/h	49
56 pav. Valdymo išėjimas – reagento srautas. Proceso reakcijos į garo srauto pokytį 140-58,5 t/h	50
57 pav. NO _x koncentracijos reakcijos į garo srauto pokytį 58-86 t/h	50
58 pav. Valdymo išėjimas – reagento srautas. Proceso reakcija į garo srauto pokytį 58-86 t/h	51
59 pav. NO _x koncentracijos reakcijos į garo srauto pokytį 86-58 t/h	51
60 pav. Valdymo išėjimas – reagento srautas. Proceso reakcija į garo srauto pokytį 86-58 t/h	52
61 pav. Proceso garo ir temperatūros reakcijos į kuro srauto pokytį (50-60%)	53
62 pav. NO _x koncentracijos reakcijos į kuro srauto pokytį 50-60%	53
63 pav. Valdymo išėjimas – reagento srautas. Proceso reakcija į kuro srauto nuostatos pokytį 50-60%	53
64 pav. NO _x koncentracijos reakcijos į kuro srauto nuostatos pokytį 60-80 %	54
65 pav. Valdymo išėjimas – reagento srautas. Proceso reakcija į kuro srauto nuostatos pokytį 60-80 %	54
66 pav. NO _x koncentracijos reakcijos į kuro srauto nuostatos pokytį 80-50 %	55
67 pav. Valdymo išėjimas – reagento srautas. Proceso reakcija į kuro srauto nuostatos pokytį 80-50 %	55

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

SNCR – (*angl. Selective Non-Catalytic Reduction*) selektyvi nekatalizinė redukcija;

SCR – (*angl. Selective Catalytic Reduction*) selektyvi katalizinė redukcija, dar kitaip deNO_x procesas;

NSR – normalizuotas stochiometrinis santykis;

deNO_x - bendrinis terminas, apimantis visas NO_x valymo technologijas;

DCS – (*angl. Distributed Control System*) paskirstyta valdymo sistema;

MPC – (*angl. Model Predictive Controller*) modelį nuspėjantis valdiklis;

CFD – (*angl. Computational fluid dynamics*) skysčių dinamikos skaičiavimai.

Terminai:

Bagasas – likutinė cukranendrių biomasė po sulčių išspaudimo, naudojama kaip biokuras elektrinėse;

Karbamidas, šlapalas – (*angl. Urea*) amoniakinis reagentas, naudojamas redukuoti azoto oksidus;

Redukcija - reakcija, per kurią cheminio elemento atomai arba didesnio oksidacijos laipsnio elemento jonai priima elektronus (elemento oksidacijos laipsnis sumažėja).

Įvadas

Emisijų valdymas yra viena iš šių laikų pramonės ir transporto sektorių problemų. Šio darbo objektas – termoelektinė, šioje taikomi sprendimo būdai – išmetamų dujų valymas, vadinamomis nuazotinimo, nusierinimo sistemomis, bei įvairūs filtrai sulaikantys kitas kenksmingas medžiagas, kaip kietosios dalelės. Taip pat jėgainėje naudojamas atsinaujinantis energijos šaltinis, biokuras: cukranendrių atliekos ir medienos granulės.

Šiame darbe bus tiriamas SNCR technologinio proceso azoto oksidų emisijų valdymas. Šio proceso valdymo pagrindiniai iššūkiai yra ribotas efektyvaus veikimo temperatūrinis langas, amoniakinis nuotėkis, esant per žemai temperatūrai ir per dideliame reakcijos zonoje paduodamo redukcinio reagento kiekiui. Todėl, norint efektyviai valdyti emisijas svarbu įvertinti visus parametrus turinčius įtaką SNCR procesui. Tokiu būdu bus laikomasi nustatytų aplinkosauginių reikalavimų, ir bus ekonomiškai efektyviai panaudojamas reagentas.

Kita SNCR valdymo problema, tai yra didelis vėlavimas kuris atsiranda, dėl vykstančios cheminės reakcijos ir išmetamųjų dujų ilgo kelio vamzdiniais, katilo geometrijos, dujų maišymosi, reagento purkštukų padėties ir įpurškimo slėgio.

Darbo tikslas – sukurti biomasę deginančios jėgainės azoto oksidų emisijų valdymo sistemą ir ištirti sistemos veikimą imitaciniu modeliu.

Darbo uždaviniai:

- Apžvelgti azoto oksidų emisijų problematiką ir valdymo metodus, bei parinkti kurie metodas bus taikomas;
- Išanalizuoti ALGA jėgainės SNCR valdymo sistemą ir procesus;
- Sudaryti NO_x susidarymo ir SNCR proceso matematinį modelį ir realizuoti panaudojant *Ovation DCS* programinę įrangą;
- Ištirti fuzzy taisyklių su PI reguliatoriumi valdymo ir receptinio su PI reguliatoriumi valdymo proceso reakcijas;
- Ištirti Smith prediktoriaus įtaką valdymo sistemos pereinamajam procesui.

1. Azoto oksidų susidarymas

Išmetamosios dujos (angl. *flue gas*, *exhaust gas* arba *stack gas*) – tai deginant iškastinį kurą susidaranti dujos, kurios išleidžiamos į atmosferą. Jų sudėtyje yra sieros ir azoto oksidų, anglies dioksido ir monoksido, vandens garų, vandenilio sulfido, vandenilio cianido, halogenvandenilių rūgščių, amoniako, taip pat nepilnai sureagavusio azoto ir deguonies, nesudegusių angliavandenilių, dulkių bei sočiųjų [1].

1.1. Azoto oksidai

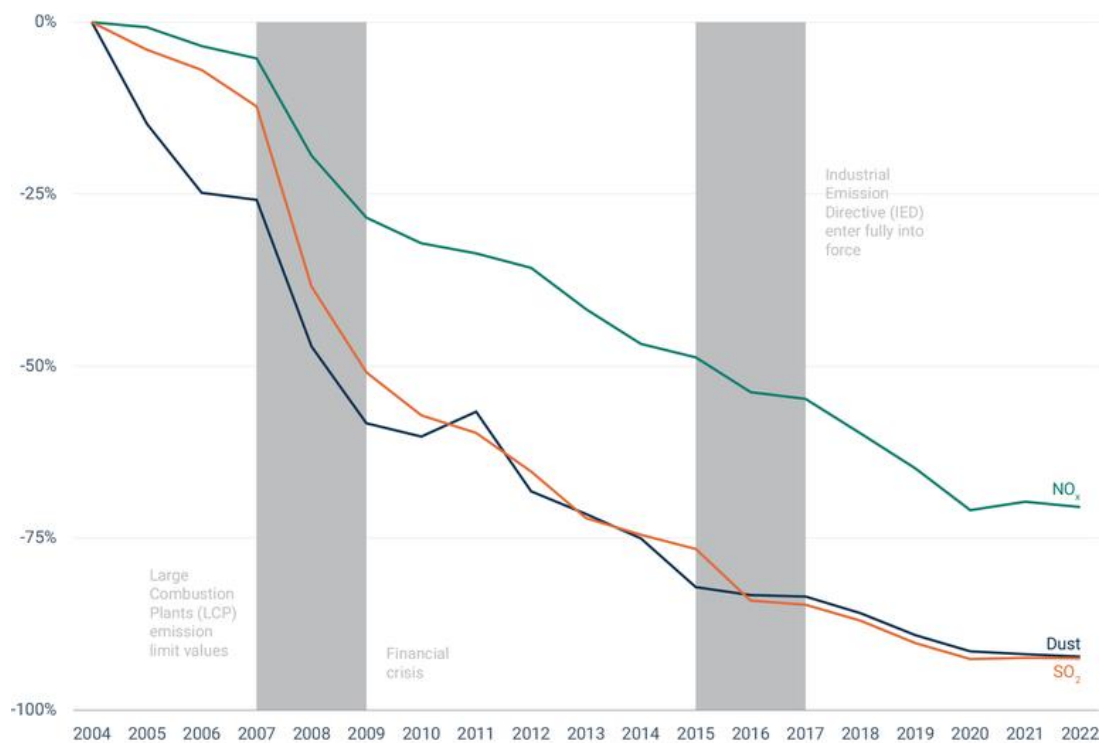
Azoto oksidai (NO_x) – daugiausia azoto monoksidas (NO) ir azoto dioksidas (NO₂), taip pat kiti azoto junginiai su deguonimi. Dauguma NO_x junginių, patenkančių į atmosferą, atsiranda dėl žmogaus veiklos susijusios su degimo procesais – daugiausia dėl iškastinio kuro naudojimo elektros energijos gamyboje, aukštos temperatūros pramoninių procesų bei vidaus degimo variklių transporto sektoriuje [4]. Esant aukštai temperatūrai (~1200 °C) [2], molekulinis azotas (N₂) reaguoja su deguonimi (O₂), sudarydamas azoto oksidus: NO, NO₂, NO₃, N₂O₅.

Nagrinėjama ALGA elektrinė naudoja biokurą, todėl pagrindiniai degimo metu susidarantys produktai yra azoto oksidai, anglies oksidai, vandens garai ir amoniakas – toliau analizėje daugiausia dėmesio skiriama bendrai azoto oksidams.

1.2. Pagrindiniai NO_x šaltiniai

Pagrindiniai azoto oksidų šaltiniai yra šie:

- Degimo procesai, ypač tie kurie vyksta aukštoje temperatūroje, tokie kaip vidaus degimo varikliuose, pramoniniuose įrenginiuose ar pastatų šildymo katiluose. NO_x susidaro deginant įvairių rūšių kurą tokiomis sąlygomis.
- Transporto sektorius – reikšmingiausias teršalų šaltinis, ypač automobilių, laivų, traukinių ir orlaivių vidaus degimo varikliai, iš kurių didžiausią indėlį sudaro dyzeliniai varikliai.
- Žemės ūkis – azoto oksidai netiesiogiai susidaro, kai į atmosferą išskiriamas amoniakas (NH₃) iš trąšų ir gyvulininkystės veiklos reaguojant su kitomis oro dujomis.
- Natūralūs reiškiniai, tokie kaip miškų gaisrai ir žaibai, taip pat prisideda prie NO_x emisijų, tačiau jų kiekis yra nedidelis palyginti su žmogaus veiklos šaltiniais.



1 pav. Dulkių, azoto oksidų ir sieros dioksido išmetimas iš didelių kurą deginančių įrenginių ES-27 [21].

Per paskutinius dešimtmečius leidžiami emisijų kiekiai pagal apribojimus iš didelių kurą deginančių įrenginių sumažėjo apie 70-90% (žr. 1 pav.). Tikėtina jog, šie apribojimai bus griežtinami ir toliau, todėl svarbu tam ruoštis prevenciškai ir numatyti galimus emisijų mažinimo valdymo būdus.

1.3. Poveikis aplinkai

Azoto oksidai daro tiek tiesioginį, tiek netiesioginį neigiamą poveikį žmogaus sveikatai. Ilgalaikis NO_x poveikis gali paveikti kvėpavimo sistemą, sukelti tokius simptomus kaip kosulys, čiaudulys, apsunkintas kvėpavimas ar dusulys. Ypač pažeidžiami yra tie, kurie turi kvėpavimo takų ligų. Azoto oksidai gali pažeisti plaučių alveoles ir sutrikdyti deguonies įsisavinimą kraujyje. Be to, šie junginiai prisideda prie smogo susidarymo.

Atmosferoje azoto oksidai reaguoja su vandens garais, sudarydami rūgštinius junginius, kurie, susiformavę debesyse, iškrinta su krituliais. Tokiu būdu azoto rūgštys kartu su kitomis rūgščiosiomis medžiagomis patenka į paviršinius vandenis, dirvožemį ir gruntinius vandenis. Dėl rūgštėjimo (pH sumažėjimo) ekosistemose žūsta jautrūs gyvūnai bei mikroorganizmai. Rūgštieji lietūs taip pat ardo miškus ir augmeniją, naikina gyvūnų buveinės. Be to, šios rūgštys spartina pastatų, kelių ir infrastruktūros objektų eroziją. [22]

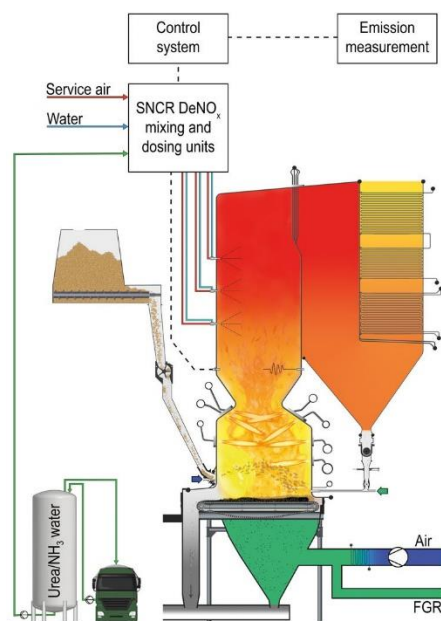
1.4. NO_x emisijų mažinimo metodai

Azoto oksidai ir jų junginiai daro kenksmingą poveikį tiek žmonių sveikatai, tiek aplinkai, todėl būtina taikyti veiksmingas priemones, padedančias reikšmingai sumažinti į atmosferą išmetamą NO_x kiekį.

Pirminės mažinimo priemonės – tai technologiniai sprendimai, taikomi tiesiogiai degimo proceso metu. Vienas svarbiausių būdų – tinkamas degimo proceso valdymas: deginti kurą taip, kad būtų kuo mažiau nesudegusių kuro likučių ir perteklinio deguonies. Naudojant pakopinį deginimą ir išlaikant

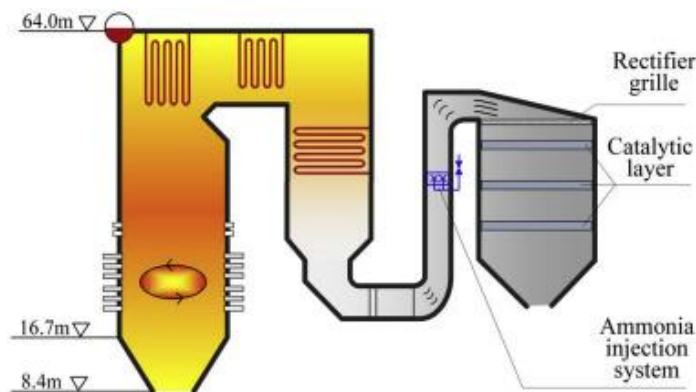
optimalią temperatūrą, vengiant labai aukštų temperatūrų (apie 1200 °C), kai pradeda intensyviai formotis NO, galima sumažinti NO_x emisijas. Be to, dalies degimo produktų grąžinimas atgal į degimo kamerą leidžia sumažinti NO_x emisijas iki 35 % [3].

SNCR (nekatalizinė selektyvioji azoto oksidų redukcija) – tai metodas, kai į degimo kamerą arba išmetamųjų dujų srautą įpurškiamas amoniakas arba karbamidas aukštoje temperatūroje, be katalizatoriaus. Reagentas reaguoja su NO_x ir susidaro nekenksmingi produktai – azotas (N₂) ir vandens garai (H₂O). SNCR yra ekonomiškė alternatyva SCR sistemoms, tačiau jos efektyvumas labai priklauso nuo proceso temperatūros ir sąlygų.



2 pav. SNCR proceso principinė schema [3]

SCR (selektyvioji katalizinė redukcija) – tai pažangi technologija, kurioje amoniakas įpurškiamas į išmetamųjų dujų srautą, o mišinys pereina per katalizatorių. Šio proceso metu NO_x paverčiami nekenksmingais junginiais – N₂ ir H₂O. SCR sistemos pasižymi itin dideliu efektyvumu, todėl dažniausiai taikomos, kai reikia pasiekti itin mažus emisijų lygius. Vis dėlto, šių sistemų įrengimas ir eksploatavimas yra brangesnis nei kitų technologijų.



3 pav. SCR proceso principinė schema [4]

EGR (išmetamųjų dujų recirkuliacija) – dažnai naudojama vidaus degimo varikliuose, ypač dyzeliniuose. Šioje sistemoje dalis išmetamųjų dujų grąžinama atgal į degimo kamerą, taip sumažinant degimo temperatūrą. Tokiu būdu sumažėja ir susidarančių azoto oksidų kiekis.

1.5. SNCR ir SCR palyginimas

Tiek SNCR tiek SCR yra efektyvūs ir dėl to populiarūs būdai mažinti NOx emisijas termoelektrinėse deginant iškastinį ir biokurą.

SCR pranašumai:

- Didelis efektyvumas: SCR gali pasiekti 70–90% arba didesnį NOx mažinimo efektyvumą.
- Temperatūros lankstumas: Katalizinis procesas leidžia efektyviai sumažinti NOx plačiame temperatūrų diapazone, todėl jis tinkamas įvairioms reikmėms.
- Patvarumas: SCR sistemos paprastai turi ilgesnę eksploatavimo trukmę dėl naudojamų katalizinių medžiagų tvirtumo.

SCR trūkumai:

- Didelės kapitalo ir eksploatacinės sąnaudos: SCR sistemos yra brangu įdiegti ir prižiūrėti dėl katalizatorių kainos ir tikslų valdymo sistemų poreikio.
- Sudėtingumas: technologija reikalauja sudėtingos infrastruktūros ir veiklos priežiūros, kad būtų galima valdyti reduktoriaus įpurškimą ir užtikrinti, kad katalizatorius laikui bėgant išliktų veiksmingas.

SNCR pranašumai:

- Mažesnė kaina: SNCR sistemos paprastai yra pigesnės įdiegti ir eksploatuoti, nes joms nereikia katalizatorių ir yra paprastesnės konstrukcijos.
- Paprastumas: katalizatoriaus nebuvimas reiškia, kad SNCR sistemos yra ne tokios sudėtingos ir lengviau prižiūrimos. Paprasta integracija į katilus be denox sistemų. Užima mažiau vietos nei SCR.

SNCR trūkumai:

- Mažesnis efektyvumas: SNCR paprastai pasiekia 50–85 % NOx redukcijos efektyvumą, o tai yra mažesnis nei SCR.[3]
- Temperatūros jautrumas: procesas reikalauja tikslios temperatūros kontrolės, nes reakcija veiksmingai vyksta tik siaurame temperatūros lange. Šiek tiek sumažina boilerio efektyvumą.
- Didesnis amoniakinio reagento suvartojimas, dėl to yra ir didesnė tikimybė turėti NH3 nuotėkj.

1 lentelė. SCR ir SNCR palyginimas [7]

Sąlygos	SCR	SNCR
Temperatūra ir tolerancija	250-450C (klasikinis TiO ₂ / V ₂ O ₅ / WO ₃) +- 90C	800-1100C
Temperatūros svyravimai	Mažos apkrovos operacijoms išmetamųjų dujų temperatūrai padidinti gali būti naudojamas ekonomaizeris	Ekonomiškai efektyvus sezoniniam arba kintamos apkrovos naudojimui. Norint atlikti operacijas esant mažoms apkrovoms, reikia papildomų įpurškimo taškų / stiprintuvų
Reagento įpurškimas	Vykdomas pasroviui nuo degimo įrenginio	Degimo katilo viduje
Reagento kiekis		3–4 kartus daugiau reagento, kad būtų sumažintas NO _x kiekis, panašus į SCR
NH ₃ /NO _x santykis	0,8-1	1,5–2,5
Išlaikymo reakcijai laikas temperatūros diapazone / erdvės poreikis	Sekundžių dalys / minimali erdvė	Sekundės / didelė erdvė
Reakcijos zona	Katalizatoriaus naudojimas ir reakcijos kamera yra atskirta nuo degimo įrenginio	Reakcijos kamera = degimo įrenginys
NH ₃ -nuotėkis		2 kartus didesnis nei SCR Aukštas NH ₃ nuotėkis esant mažai emisijai
Investicijos kaina	Aukštesnė dėl padidėjusio energijos suvartojimo:	Mažesnė
Eksploatacijos kaina	<ul style="list-style-type: none"> • Ventilatorius kompensuoja slėgio kritimą, • išmetamųjų dujų pakartotinis pašildymas • katalizatorių regeneravimas arba keitimas 	Didesnės amoniakinio reagento sąnaudos
Dizainas	Ekonomiškesnis šaltiniams, kurie išskiria mažiau NO _x Be didelių katilo konstrukcijos pakeitimų.	Labai sudėtingas srauto dizainas, kontrolė privaloma
deNO _x efektyvumas	Aukštesnis	Mažesnis NO _x efektyvumas, nei SCR
Poveikis aplinkai	<ul style="list-style-type: none"> • katalizatorių gamyba • didesnės energijos sąnaudos • panaudotų katalizatorių šalinimas 	

SNCR dažnai pirmenybė teikiama elektrinėse dėl kelių priežasčių, nepaisant mažesnio efektyvumo:

Ekonominis efektyvumas: daugeliui elektrinių, ypač senesnėms arba turinčioms mažesnę biudžetą, mažesnės SNCR kapitalo ir eksploatacinės sąnaudos daro jį patrauklesniu pasirinkimu. SCR sistemų įrengimas gali būti pernelyg brangus, ypač mažesnėse arba senstančiose gamyklose, kur investicijų grąža yra labai svarbi.

Lengvas modifikavimas: SNCR sistemas galima lengviau modifikuoti esamose elektrinėse be didelių pakeitimų. Šis lankstumas yra labai svarbus gamykloms, kurios nori laikytis aplinkosaugos taisyklių nesiimdamos didelės renovacijos.

Naudojimo paprastumas: SNCR sistemų eksploatavimo ir priežiūros reikalavimai yra paprastesni, todėl jos yra praktiškas pasirinkimas daugeliui įrenginių. Jiems nereikia sudėtingų valdymo sistemų ir nuolatinės priežiūros, susijusios su SCR katalizatoriais, todėl sumažėja specializuoto personalo poreikis ir sumažėja veiklos rizika.

Teisės aktų laikymasis: Nors SNCR yra mažiau efektyvus nei SCR, jis dažnai užtikrina pakankamą NOx mažinimą, kad atitiktų norminius standartus, ypač kai jis derinamas su kitomis išmetamųjų teršalų kontrolės technologijomis.

Apibendrinant galima teigti, kad nors SCR užtikrina didesnę NOx mažinimo efektyvumą ir tinka naujiems įrenginiams ar gamykloms, turinčioms didelį biudžetą, SNCR yra ekonomišką, paprastesnis ir lankstus sprendimas esamoms elektrinėms, norinčioms sumažinti NOx emisiją ir laikytis aplinkosaugos taisyklių. Pasirinkimas tarp SCR ir SNCR priklauso nuo įvairių veiksnių, įskaitant biudžetą, gamyklos dizainą ir konkrečius reguliavimo reikalavimus.[5]

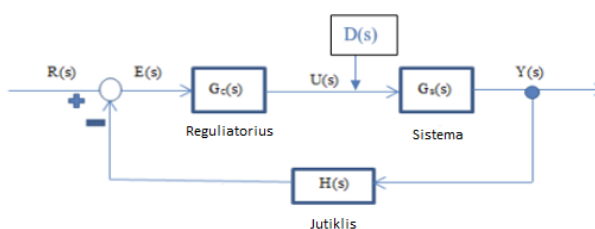
2. SNCR reguliavimo metodai

SNCR gali būti reguliuojamas kelias valdymo metodais, šiame skyriuje jie bus trumpai pristatyti.

2.1. PID reguliatorius

PID valdikliai yra plačiai naudojami pramoninių procesų valdymui dėl savo paprastumo ir efektyvumo. Jie reguliuoja valdymo kintamąjį (pvz., reduktoriaus įpurškimo greitį) pagal skirtumą tarp norimos nustatytos vertės ir išmatuoto proceso kintamojo (pvz., NO_x koncentracijos). Šio metodo privalumas – tai paprastas įgyvendinimas ir suderinimas, PID reguliatorius veiksmingas tiesinėms sistemoms.

$$\frac{R_s}{Y_s} = \frac{G_s(s) \cdot G_c(s) \cdot H(s)}{1 + G_s(s) \cdot G_c(s) \cdot H(s)}$$

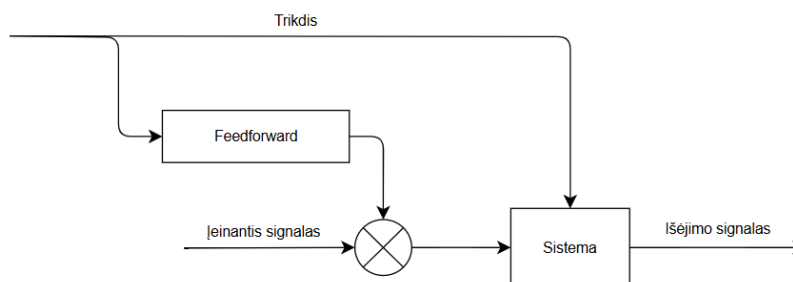


4 pav. Grįžtamojo ryšio valdymo sistema ir perdavimo funkcija [9]. Čia $G_c(s)$ -PID reguliatorius, $G_s(s)$ – amoniakinio vandens purkštukai, $H(s)$ NO_x jutikliai.

2.2. Trikdžio valdymas (*angl. Feed-forward*)

Trikdžio kompensavimas arba dar kitaip tiesioginis valdymas, yra viena iš rečiau naudojamų strategijų, kuri veiksmingai sprendžia įvairias proceso problemas, tokias kaip pavyzdžiui vėlavimas, didelis pereinamojo proceso laikas. Jis veikia pagal prevencinės apkrovos neutralizavimo principą: stebint visas reikšmingas proceso kintamojo apkrovas ir suprantant jų poveikį, valdymo sistema gali būti užprogramuota imtis korekcinį veiksmų, pagrįstų signalo pokyčiais. Šis iniciatyvus valdymas užtikrina, kad proceso kintamasis liktų nepaveiktas galimų trikdžių.

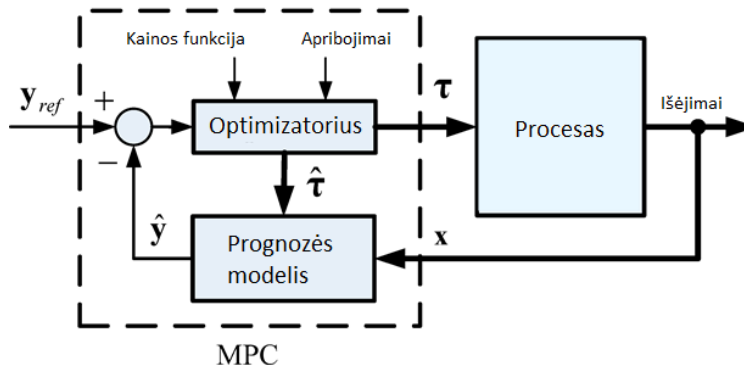
Šis metodas skiriasi nuo grįžtamojo ryšio valdymo sistemų, kurios reaguoja į pokyčius po to, kai jie įvyksta, o *feed-forward* veikia be grįžtamojo ryšio, t.y. atvira valdymo sistema (žr. 5 pav.). Valdymo sistemos su grįžtamoju ryšiu veikia laukdamos pokyčių, taip yra užtikrinamas sklandesnis veikimas.



5 pav. *Feed-forward* valdymo struktūrinė schema

2.3. Modelį prognozuojantis valdiklis (MPC)

MPC (angl. *Model Predictive Controller*) naudoja proceso modelį, kad prognozuotų proceso esamas būsenas. Tuomet vyksta kainos funkcijos minimizacija tuo pačiu sprendžiant apribojimus aprašytą optimizacijos uždavinį (žr. 6 pav.). Toks valdiklis gali spręsti kelių kintamųjų valdymo problemas su apribojimais.



6 pav. MPC valdymo sistema

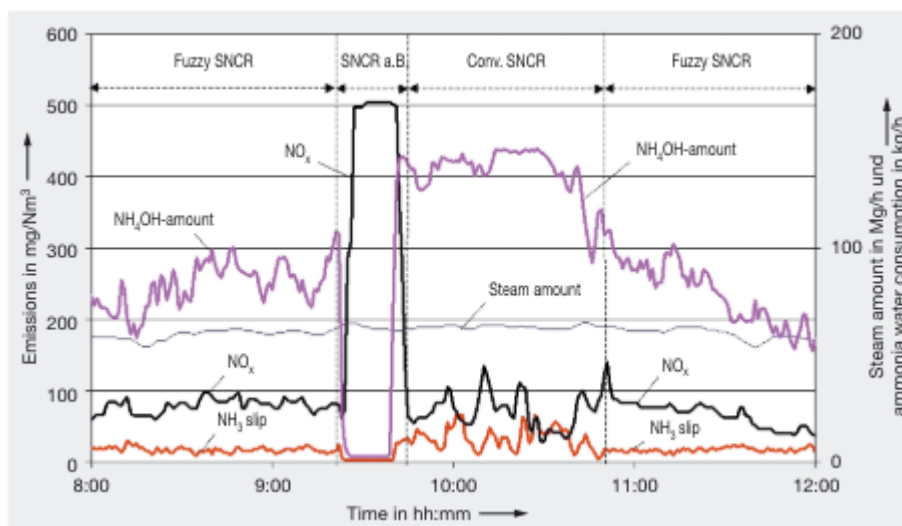
Toks valdymas, sprendžiant apribotą optimizavimą realiu laiku, reikalauja daugiau procesorinio resurso, nei įprasti ir kiti šiame skyriuje aprašyti valdymo metodai.

2.4. Neraiškios logikos valdikliai

Neraiškios logikos valdikliai (angl. *Fuzzy logic*) naudoja kalbines taisykles ir neraiškius rinkinius, kad galėtų valdyti neapibrėžtumą ir apytikslius samprotavimus, todėl jie tinka sudėtingoms, netiesinėms sistemoms, kuriose tradiciniai valdymo metodai gali būti netinkami.

Straipsnyje [10] teigiama, kad norint efektyviai perduoti didelį informacijos tankį iki greito, arti proceso, valdymo, specialiai tam buvo sukurtas neraiškus valdiklis. Pagrįstas pagal turimus proceso kintamuosius, tokius kaip temperatūros pasiskirstymas, amoniako padavimas, amoniako nuotėkis keturiuose matavimo taškuose- reakcijos zonos pradžioje ir pabaigoje, NOx koncentraciją katile ir po DeNOx, valdymas suteikia geriausią aktyvios įpurškimo angos pasirinkimą, atskiros zonos azoto oksidų kiekio kontrolę ir ribinių verčių stebėjimą realiuoju laiku.

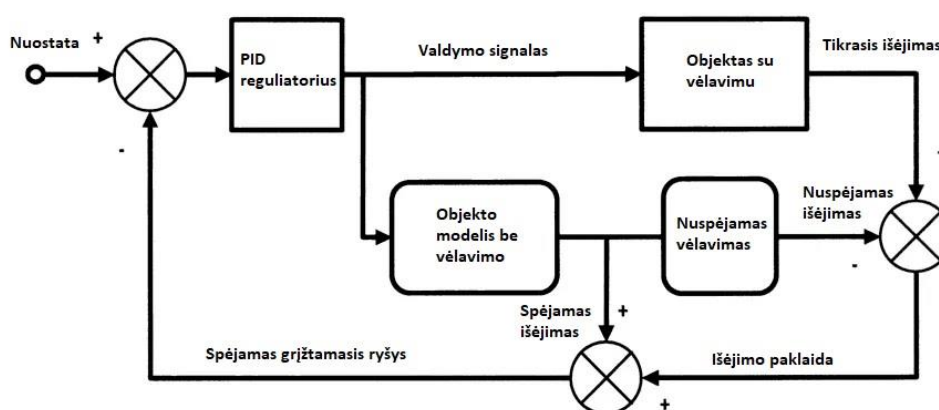
Iš 7 pav. diagramos matome, kad fuzzy reguliatoriaus NOx išeigos buvo panašios, tačiau stabilesnės, nei be fuzzy. Visgi, sunaudoto amoniakinio reagento kiekis ir nuotėkis su fuzzy buvo ženkliai mažesnis, daugiau, nei 60%.



7 pav. Įprastinio SNCR ir neraiškios logikos SNCR išėigų rezultatai.

2.5. Smith prediktorius

Vienas iš būdų valdyti procesus su dideliu vėlavimu yra Smith prediktorius. Ženklūs vėlavimai yra dažnai sutinkami valdymo procesuose, tokiuose kaip cheminiai reaktoriai. Smith prediktorius padeda kompensuoti vėlavimo laiką (*angl. deadtime delay*) ir paduoda grįžtamąjį ryšį be vėlavimo atgal į reguliatorių, įprastai PID ar PI. Tipinė valdymo diagrama pateikta 8 pav.



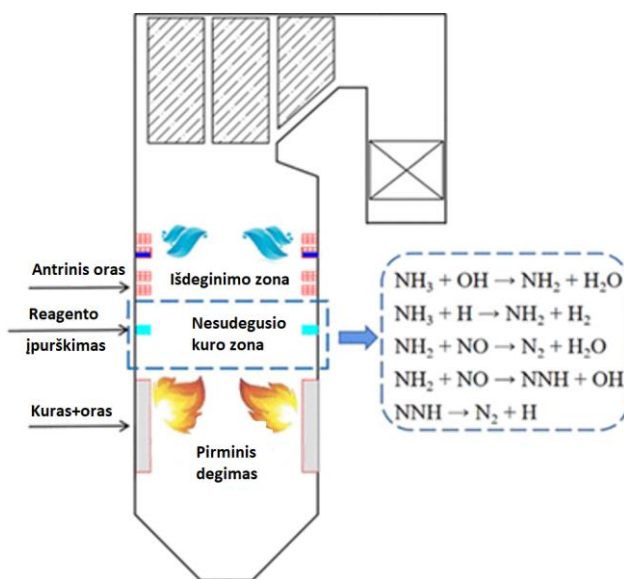
8 pav. Tipinė valdymo su Smith prediktoriumi blokinė diagrama

Smith prediktorius gali sumažinti proceso svyravimus ir vėlavimą, tačiau sudarant valdymo kontūrą, svarbu tiksliai nustatyti proceso vėlavimą.

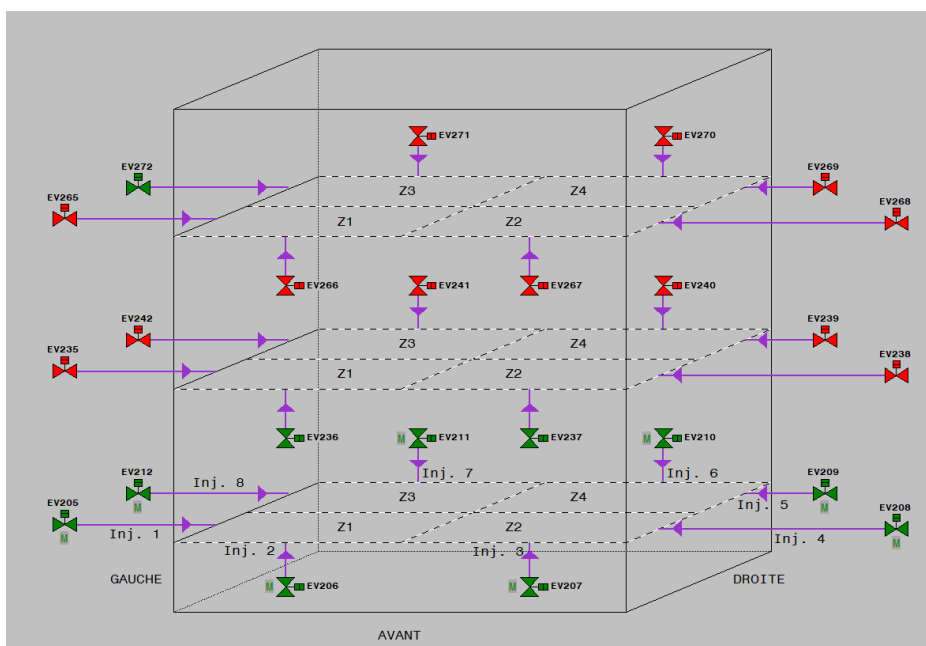
3. Tiriamasis objektas

Šiame darbe tiriamas *Albioma Le Gol* jėgainės A blokas (sutrumpintai - ALGA). Šis yra kūrenamas medienos granulėmis ir bagasu. Elektrinės nominali galia yra 60MW, maksimalus garo srautas 130 t/h. Per sezoną sunaudojama iki 300 tūkst. tonų bagaso iš šalia esančios cukraus gamyklos susidarančių atliekų.

SNCR sistema sumontuota biomasės kuro katilo viduje trimis aukštais, virš degimo kameros zonos (pav. 1). Pirmoji purkštukų eilė yra 6 metrų aukštyje, antroji - 15 metrų, o trečioji - 27 metrų. Kiekvienas iš lygmenų turi po 8 purkštukus, kurie purškia amoniakinio vandens mišinį, sumažinantį NO_x emisijas. Purkštukai yra sumontuoti po du ant kiekvienos iš keturkampio katilo sienų (pav. 2), tokiu būdu padalinant katilo aktyviają SNCR dalį į skirtingas zonas.

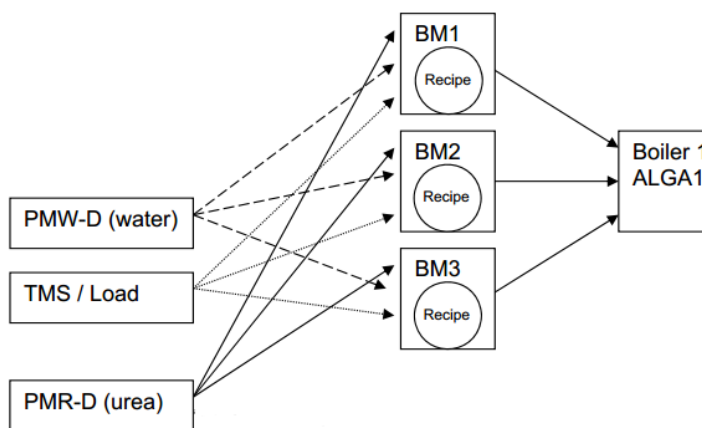


9 pav. Degimo katilo zonos. SNCR vyksta mėlynu punktyrų pažymėtoje zonoje.



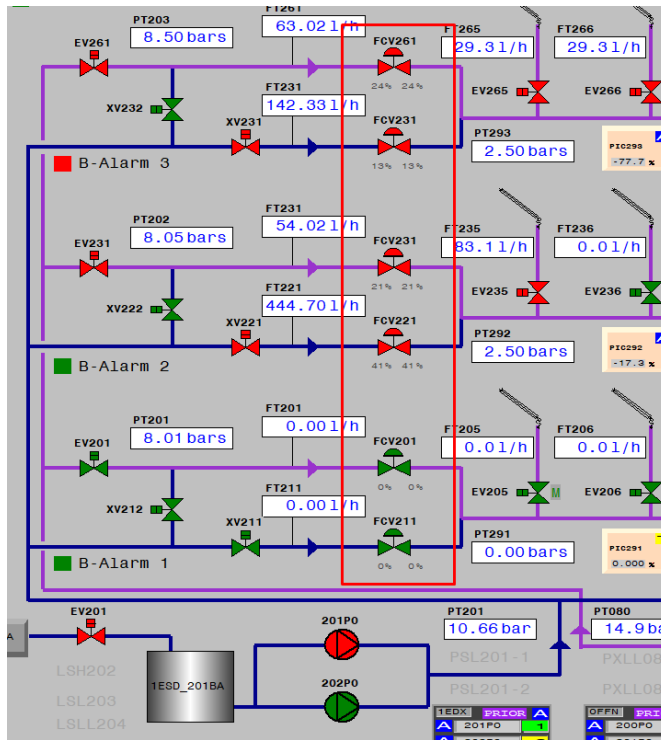
10 pav. Operatoriaus HMI lango fragmentas. SNCR purkštukai ir aktyviosios zonos.

Maišymosi modulis (BM) yra trijuose skirtinguose katilo lygiuose ir dengia horizontalų skerspjūvį krosnyje su purkštukais. Maišymo modulis dozuoja vandenį ir reagentą pagal tam tikrą receptūrą ir tiekia į purkštukus. 8 purkštukai yra vienodai paskirstyti, po du sumontuoti kiekvienoje katilo šoninėje sienelėje. Skerspjūvis yra padalintas į 4 zonas. Kiekviena zona yra padengta dviem purkštukais, esančiais kiekviename katilo kampe. Žemiau pateiktame paveikslėlyje (pav. 3) taip pat parodyta, kad kiekvienas maišymo modulis turi savo receptą. Kad veiktų, kiekvienas maišymo modulis turi gauti nuolatinį temperatūros ir apkrovos signalą iš katilo. Temperatūros atvaizdavimo sistema (TMS) pateiks temperatūros signalą, tačiau katilo apkrovos signalas (0–100 % kaip garo srautas) turi būti pasiekiamas DCS. Temperatūros stebėjimo sistema (TMS) montuojama horizontaliame krosnies skerspjūvyje tarp degimo gardelių ir BM. TMS matuoja vidutinę išmetamųjų dujų temperatūrą kiekvienoje iš 4 zonų ir po vieną visame skerspjūvyje. Remiantis tuo, kiekvienos BM skerspjūvyje apskaičiuojamos atitinkamos išmetamųjų dujų temperatūros. Kiekvieno BM temperatūra naudojama atitinkamiems purkštukams įjungti arba išjungti.



11 pav. Principinė SNCR schema

Amoniakinio reagento ir vandens maišymasis reguliuojamas, kiekviename aukšte DCS valdomais vožtuvais FCV261, FCV231, FCV201 amoniakiniam reagentui, atitinkamai 3, 2 ir 1 aukštuose, ir FCV231, FCV221, FCV211 vandeniui, atitinkamuose aukštuose (pav. 14).

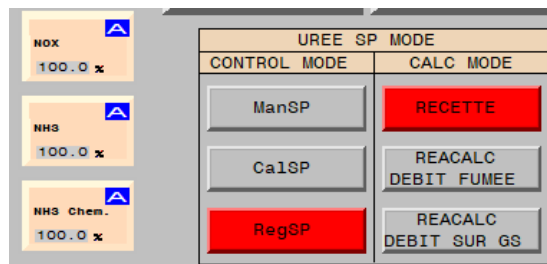


12 pav. Operatoriaus HMI. Reagentų maišymo vožtuvai

3.1. Valdymo režimai ir valdymo algoritmas

Redukcijos reagento regulatoriaus nuostatos taškas (matuojamas l/h) parenkamas pagal vieną iš šių nuostatų:

- Ranka įrašyta nuostata („*ManSP*“);
- Iš formulės skaičiuota nuostata („*CalcSP*“);
- $\text{NO}_x - \text{NH}_3$ Regulatoriaus nustatyta nuostata („*RegSP*“) (žr. pav. 15)

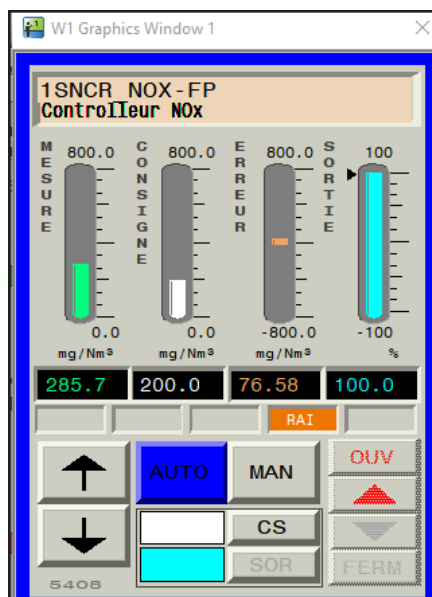


13 pav. Operatoriaus HMI. Kairėje - proceso regulatoriai, viduryje - valdymo, kairėje - skaičiavimo režimai

Svarbiausias ir dažniausiai naudojamas režimas – „*RegSP*“. Tai reguliavimo režimas, kurio nuostata parenkama palyginant NO_x ir NH_3 (matuojami mg/Nm^3) matavimus po SNCR reakcijos zonos, išmetamųjų dujų sraute. Tai atliekama 2 pažymėtoje dalyje (15 pav.), valdymas veikia taip, kad iš trijų įėjimų parenkamas mažiausias (žr. 1 formulę).

$$F_{\text{urea out}} = \min(\text{IN1}, \text{IN2}, \text{IN3})$$

(1)



14 pav. Operatoriaus HMI. NOx valdymo iššokantysis langas

Parinkus mažiausią įėjimą, tai yra didžiausią nuokrypį nuo nuostatos reikšmių, toliau sumatoriuje gaunamas amoniakinio reagento srautas (l/h) reikalingas NOx emisijoms neutralizuoti. Gauta srauto reikšmė keliauja į paskirstytoją, kuriame pagal parinktą receptą paskirstomas srautas tarp tryjų purkštukų lygmenų (15 pav. 5 dalis), santykinai, pagal tai kiek purkštukų yra atidaryti (žr. 2 formulę). Toliau kiekviename iš trijų lygmenų paskaičiuojamas reikiamas vandens slėgis pagal amoniakinio reagento srautą.

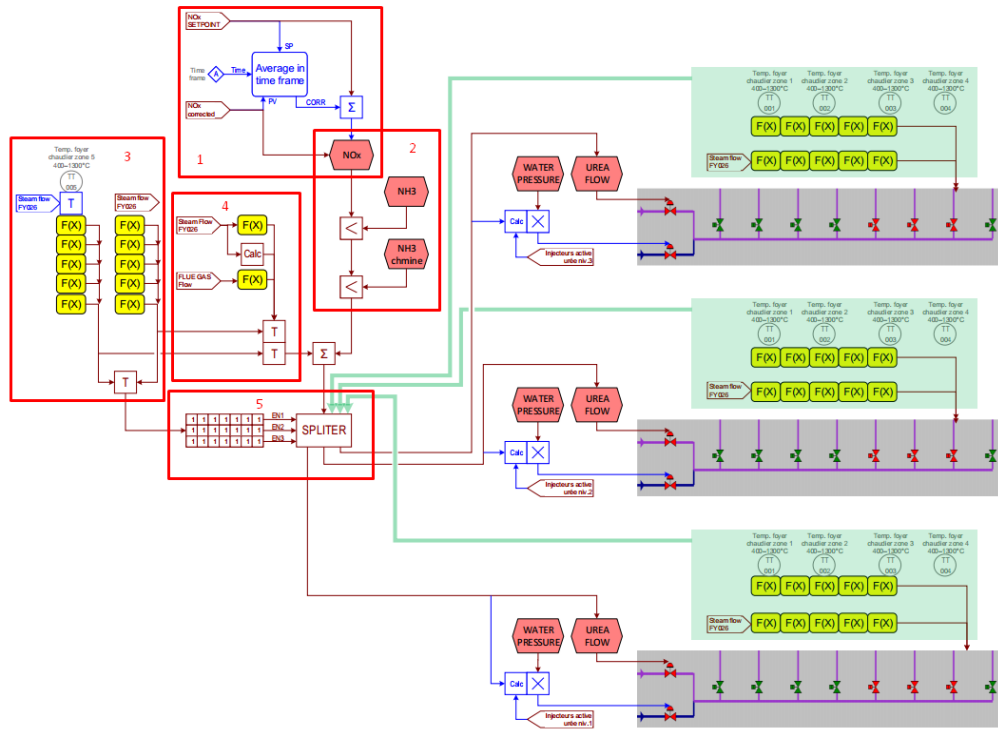
$$F_{\text{level1}} = F_{\text{urea_out}} \cdot \frac{n_{\text{level1}}}{N_{\text{total}}}$$

$$F_{\text{level2}} = F_{\text{urea_out}} \cdot \frac{n_{\text{level2}}}{N_{\text{total}}}$$

$$F_{\text{level3}} = F_{\text{urea_out}} \cdot \frac{n_{\text{level3}}}{N_{\text{total}}}$$

(2)

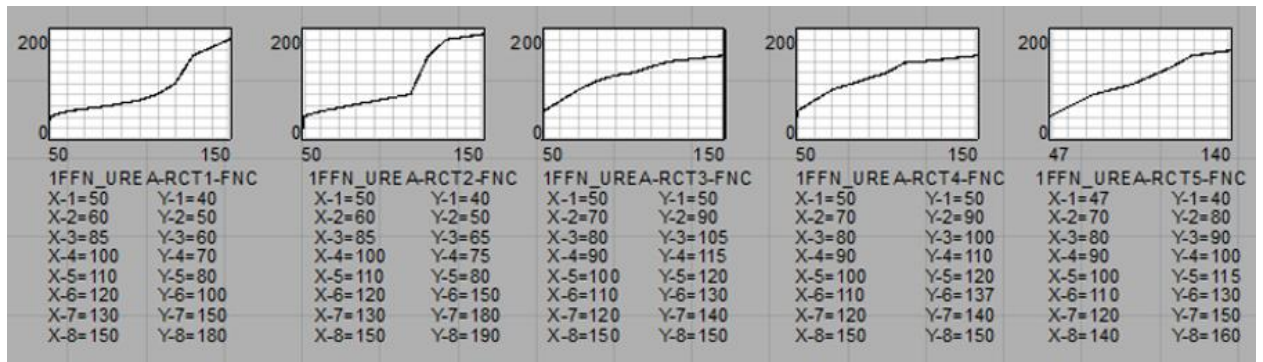
Čia F_{level} – aukštui tenkantis reagento srautas, n_{level} – atidarytų purkštukų skaičius aukšte, N_{total} – visų atidarytų purkštukų suma.



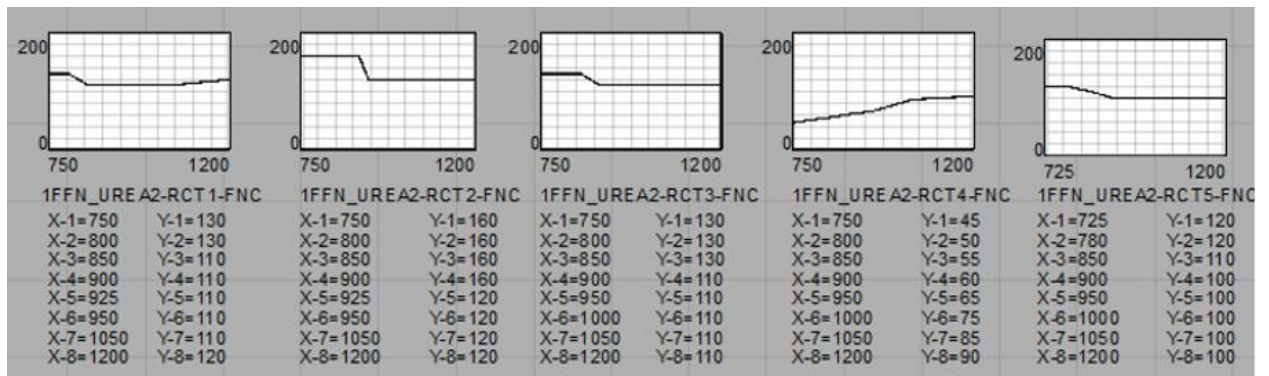
15 pav. SNCR valdymo schema

3.2. Receptinis valdymas

Pirminiame SNCR valdyme naudojami 6 temperatūros ir 6 garo apkrovos receptai. Jų funkcijos atvaizduotos 18 ir 19 paveikslėliuose.

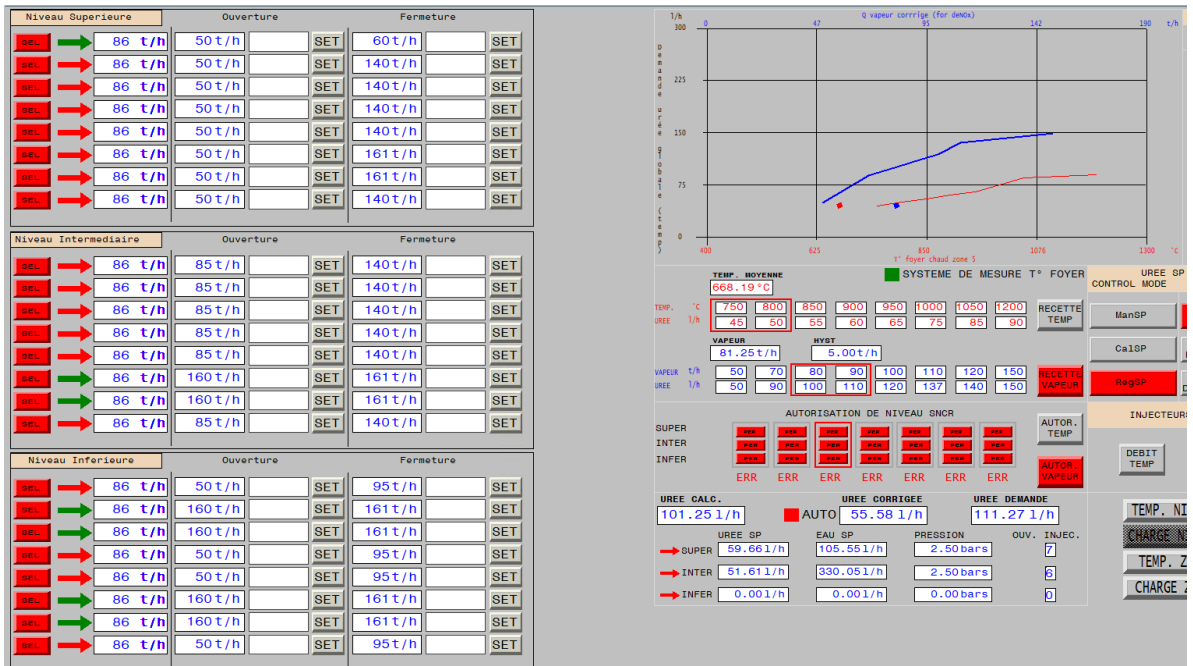


16 pav. Ovation DCS. Receptų funkcijos pagal garą.



17 pav. Ovation DCS. Receptų funkcijos pagal temperatūras.

Receptas nustato teorinį redukcijos reagento kiekį, kurio reikia procesui. Prieš perduodant nuostatos tašką į PID reguliatorių pagal receptą, jis gali būti koreguojamas NO_x-NH₃ reguliatoriaus. Ši korekcija sumažina išpurškiamo reagento kiekį, jei NO_x matavimas yra per žemas (t.y. žemiau nuostatos) arba jei NH₃ nuotėkis yra per aukštas (t.y. aukščiau nuostatos). NH₃ nuotėkio reguliatorius yra pagrindinis reguliatorius, tai reiškia, kad jei NH₃ nuotėkis yra aukštesnis nei nustatytas, pagrindinis reguliatorius sumažins reagento kiekio nuostatą. Kitu atveju, kol NH₃ nuotėkis išlieka žemiau nuostatos taško, tol procesą reguliuoja NO_x reguliatorius. Taip pat, jei NO_x matavimas yra žemiau NO_x nuostatos, NO_x reguliatorius sumažins amoniakinio reagento kiekį paduodamą į reakcijos zonas.



18 pav. Operatoriaus HMI langas. Purkštukų atidarymo režiai

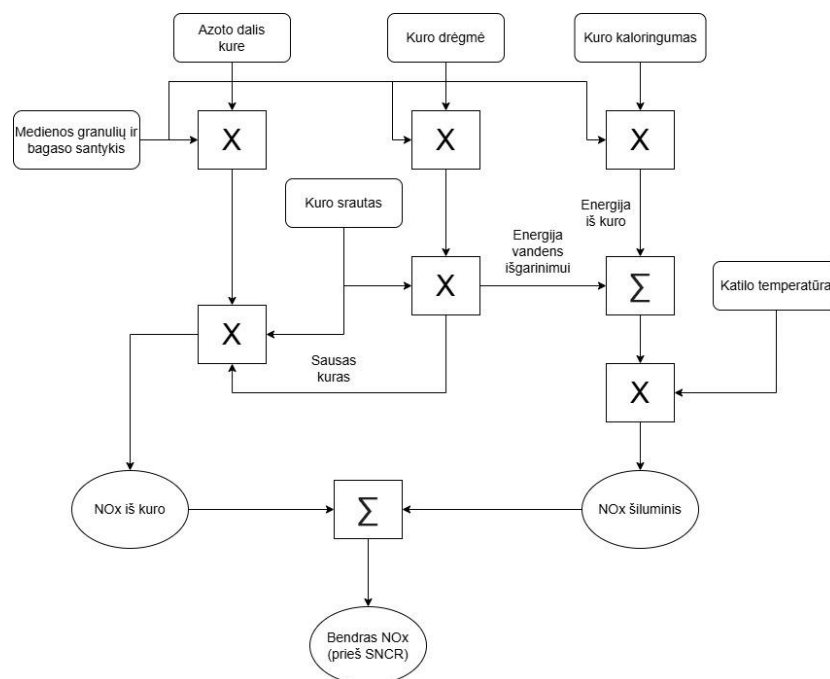
4. Proceso imitacinio modelio kūrimas

Ištestuoti nemodifikuotą ir kuriamą programinio kodo veikimą, *Ovation DCS* aplinkoje sudarytas SNCR proceso modelis, papildantis jau esamą biomasės katilo, vandens boilerio ir turbinos modelius. Modelis kuriamas *Emerson Ovation 3.8 DCS* aplinkoje, tokiu būdu ištestuojant realų fuzzy funkcionalumą ir pritaikomumą egzistuojančioje paskirstytos valdymo sistemos programinėje įrangoje. Funkciniais blokais aprašomas degimo procesas, t.y. kuro terminis skilimas, NO_x susidarymas iš degančio kuro, bei šiluminis NO_x susidarymas. Taip pat, funkciniais blokais aprašomas azoto oksidų reakcijos su amoniakiniu reagentu ir amoniakinio nuotėkio modeliavimas.

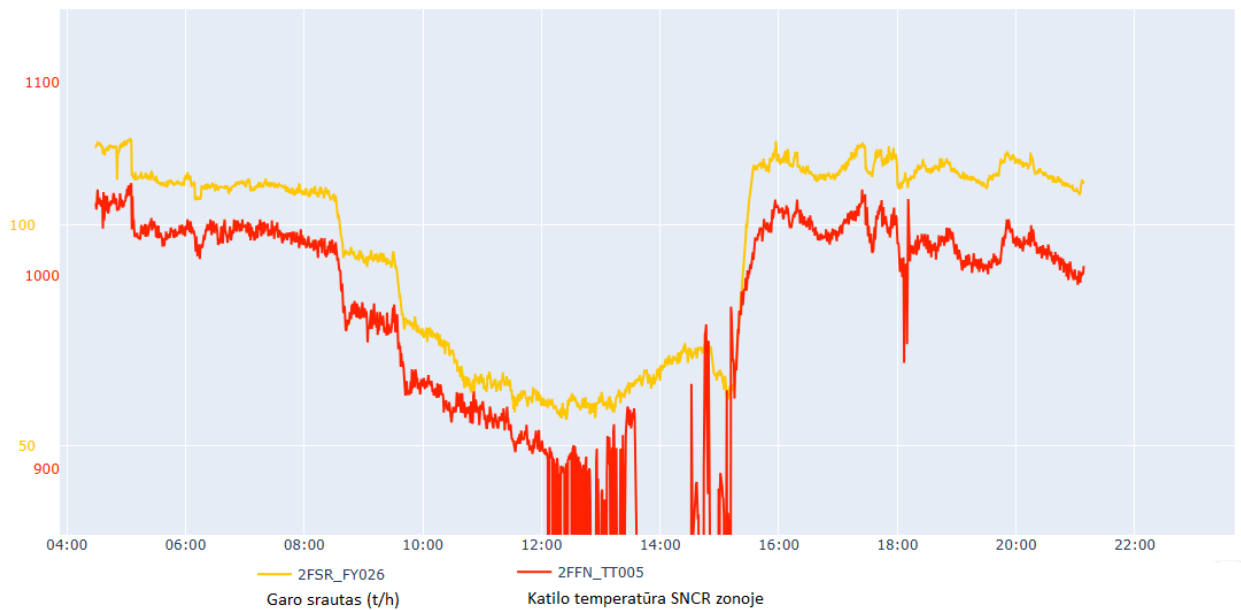
Skaičiuojant NO_x emisijas prieš SNCR turi būti įvertinta: reakcijos zonos temperatūra, kuro drėgmė, srautas, santykis, ir rūšis, įeinančio oro į degimo kamerą srautas. Skaičiuojant NO_x redukciją SNCR proceso metu, reikalingas NO_x ir NH_3 molinis santykis. NO_x susidarymo schema pateikta 19 pav., o programinis kodas *Ovation* aplinkoje 1 priede.

Norint susimuliuoti NO_x išeigas reikalingi parametrai:

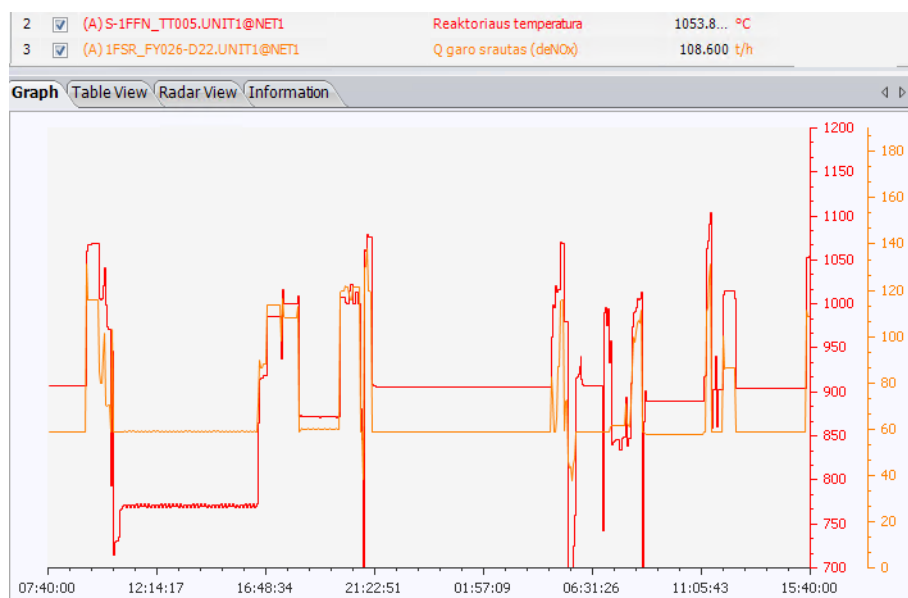
- Kuro srautas ir kuro rūšies paskirstymas;
- Išmetamųjų dujų srautas (kg/s arba Nm^3/s);
- Išmetamųjų dujų temperatūra;
- Deguonies koncentracija išmetamosiose dujose;
- Garo arba katilo apkrova (MW arba t/h);
- Kuro drėgmės matavimas (%).



19 pav. NO_x susidarymo principinė modelio schema



20 pav. Temperatūros ir garo srauto istoriniai duomenys



21 pav. Temperatūros ir garo srauto duomenys iš imitacinio modelio

4.1. NO_x susidarymo matematinis modelis

Katile azoto oksidai gali susiformuoti dviem būdais: 1. Terminis NO_x, susidarantis dėl aukštos temperatūros katilė apie 1000-1200°C temperatūroje; 2. Kuro NO_x susidarantis iš kure esančio azoto, kai šis skyla degimo metu.

Susidaręs NO_x srautas iš kuro, degimo metu, skaičiuojamas pagal 3 formulę:

$$F_{NOx} = N_{kuro} * \eta_{konv.} * F_{kuro} \quad (3)$$

Čia N_{kuro} – azoto masės dalis kure, sauso (%); $\eta_{konv.}$ – konversijos efektyvumas (%); F_{kuro} – kuro srautas (t/h).

Skaičiavimuose laikyta, kad azoto kiekis sausose medienos granulėse (*Pellets*) yra 0,3%, o bagaso – 1% nuo masės. Konversijos efektyvumas laikytas 70%. Taip pat modelyje įvertintas maišytas kuras, kai kuro rūšies procentine dalis padauginama iš atitinkamo kuro azoto dalies.

Modelio NO_x iš kuro skaičiavimas su kintamųjų pavadinimais *Ovation* programiniame kode (žr. 1 priedą):

$$(1FFF_RMP_PELLET*0,003) + (1FFF_RMP_BAGASSE*0,01)*0,7*(S1-FUEL-HR) = S-NOX-FUEL-CALC$$

Šiluminis NO_x formavimas yra sudėtingesnis, nei iš kuro, tam naudojamas pusiau empirinis *Zeldovich* mechanizmas:

$$\frac{d[NO]}{dt} = f_C \times k_{prompt} \times [O_2]^2 [N_2][F] \exp(-E_a/R/T). \quad (4) [12]$$

Toks supaprastintas emisijos mechanizmas dažnai randamas CFD skaitmeniniame modeliavime:

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_1[O_2][N_2] \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (5) [12]$$

$$NO_x = A \cdot e\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (6) [12]$$

Čia k_1 – reakcijos greičio eksponentinė konstanta; E_a – aktyvacijos energija (J); R – universali dujų konstanta (8,314 J/mol*K); T – absoliutinė temperatūra (K).

Aproksimuotam skaičiavimui modeliavime, emisijos faktoriui gauti naudojama ši formulė:

$$E_{NOx \text{ šilum.}} = 2 * 10^{-11} * T^{3,3} \quad (\text{g/MJ}) \quad (7)$$

Imitaciniame modelyje naudojant vidinius kintamuosius NO_x šilum. gaunamas iš įeinančios energijos ir emisijos faktoriaus (žr. 1 priedą):

$$(((1FRG_PEL-PCI*1FFX_RMP_PELLET+1FRG_BAG-PCI*1FFX_RMP_BAGASSE)*0,004184)*S1-FUEL-HR(sausas)*0,0002778)-(S1-FUEL-HR*S-FUEL-MOISTURE*2257)/(3,6*1000)=S-FUEL-ENERGY-INPUT (MW)$$

$$2*10^{-11}*(1FTA_TT001B-FLT+273)^{3,3}=S-NOX-EMISSION-FACTOR [g/MJ]$$

Gaunama energija iš kuro padauginama iš emisijos faktoriaus ir gaunamos šiluminės NO_x išeigos (žr. 1 priedą):

$$(S-FUEL-ENERGY-INPUT * S-NOX-EMISSION-FACTOR)*0,0036=S-NOX-THERMAL [t/h]$$

Gautus kuro ir šiluminio azoto oksidų srautus (t/h) sumuojami ir perskaičiuojami į NO_x koncentraciją išmetamosiose dujose (mg/Nm³), normalizuotą pagal 6% (O₂) deguonies.

Ovation programoje tai atitinka (žr. 1 priedą):

$$S_NOX_FUEL + S_NOX_THERMAL = S_NOX_COMB_TOTAL [t/h]$$

$$\frac{1FAF_FY001_A [t/h]* 0,06}{S_NOX_COMB_TOTAL [t/h]*10^9} = S_NOX_COMB_RECALC [mg/Nm^3] \quad (9)$$

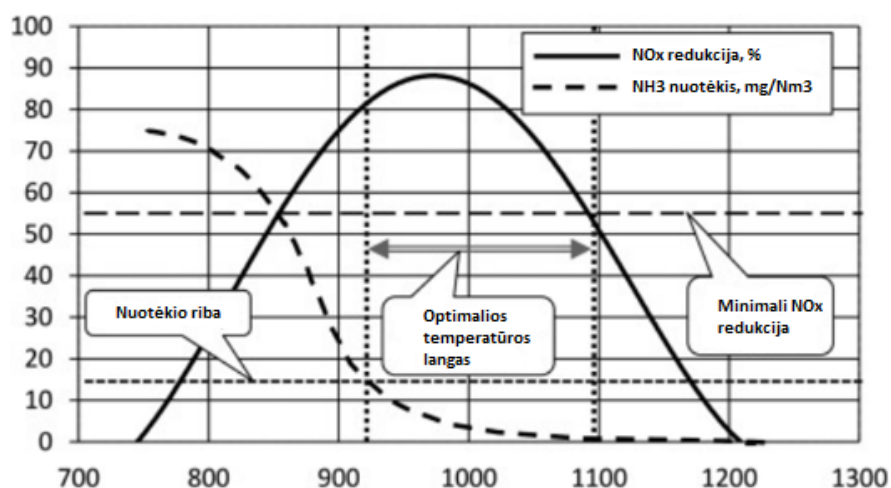
SNCR redukcijos skaičiavimas:

$$n_{NOx} = \frac{C_{NOx} * Q_{išmet. duj.}}{M_{NOx} * 1000} \quad (10)$$

Čia n_{NOx} – NO_x kiekis (mol); n_{NOx} – koncentracija (mg/Nm₃); $Q_{išmet. duj.}$ – išmetamų dujų srautas (t/h); M_{NOx} – molinė masė (g/mol)

Ovation programoje tai atitinka (žr. 1 priedą):

$((S-NOX-COMB-TOTAL-RECALC * IFTA_FQI_ENVSA-6GS * 0,001) - (IFFN_FIC20X-SPE-FZ3)) / (S-IFTA_AT905-FZ)$

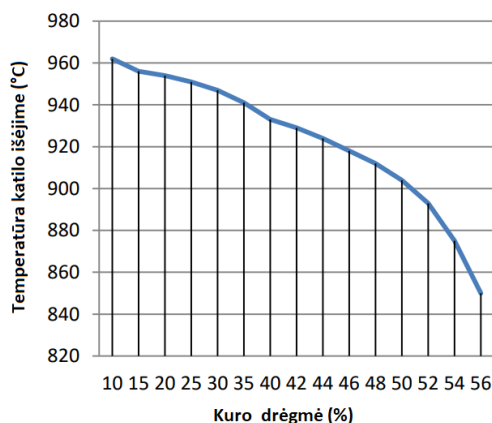


22 pav. SNCR efektyvumo priklausomybė nuo temperatūros [8]

4.2. Drėgmės įtakos modeliavimas

Imitaciniame modelyje taip pat reikalingas drėgmės, arba kitaip sakant – vandens masės kuro įvertinimas. Nors medienos granuliu drėgmė yra nereikšminga 8-10%, tačiau bagaso gali siekti net iki 60% ir kartais daugiau. Toks didelis kiekis drėgmės kiekis reiškia, kad norint sudeginti kurą, reikės išgarinti apie pusę masės nuo kuro vandens. Taigi, ženkliai sumažėja energijos kiekis gaunamas iš to paties kiekio kuro palyginus su medienos granulėmis, dėl to krenta degimo kameros temperatūra, ko pasekoje mažėja azoto dujų kiekis susidarantis šiluminiu būdu. Visgi, bagaso sudėtyje būna iki 1% azoto, o medienos granulėse iki 0,3%. Taip pat, dėl mažesnės energijos kiekio palaikyti stabilią boilerio apkrovą reikia daugiau kuro. Sumažėjusi degimo kameros temperatūra gali turėti įtaką ir pačiam SNCR procesui, jei ženkliai išeinama iš optimalaus azoto oksidų redukcijos lango. Taigi, didesnė biokuro drėgmė gali lemti mažesnę NO_x kiekį, tačiau tuo pačiu gali kristi SNCR efektyvumas, dėl žemesnės temperatūros.

Temperatūros priklausomybė nuo drėgmės, perskaiciuota, pagal (23 pav.) grafiką. Šie temperatūros duomenys iš tyrimo „The effects of bagasse moisture variations on the performance of a 105 TPH boiler“ [11] buvo gauti su bagasu, kaip ir šiame darbe tiriamame katile naudojamas vienas iš kuro, tiesa ALGA tiriamas katilas yra galingesnis.



23 pav. Katilo išmetamų dujų temperatūros priklausomybė nuo kuro drėgmės [11]

4.3. Amoniakinio nuotėkio modeliavimas

Toliau įvertinamas amoniakinis NH_3 nuotėkis, tam reikia apskaičiuoti normalizuotą stochiometrinį santykį NSR (*angl. Normalized Stoichiometric Ratio*). Tai teorinis santykis kuris parodo molinį santykį tarp azoto oksidų ir amoniakinio reagento. Iš šio santykio galima įvertinti SNCR efektyvumą ir nepageidaujamą NH_3 nuotėkį. Teoriškai 1 molis NO yra redukuojamas 1 moliumi NH_3 , bet 1 molis karbamido gali pilnai sureaguoti su 2 moliais NO. [13]. Modelyje naudojamas 60% karbamido tirpalas, t.y. tik 0,6 masės dalis nuo tirpalo masės yra grynas redukcinis reagentas.

Normalizuotas stochiometrinis santykis apskaičiuojamas:

$$NSR = \frac{n_{\text{NH}_3}}{n_{\text{NO}_x}} \quad (11)$$

Čia n_{NH_3} - įpurkšto NH_3 kiekis (mol); n_{NO_x} - NO_x kiekis išmetamosiose dujose (mol).

Amoniakio ir azoto oksidų molinis kiekis paskaičiuojamas:

$$\text{mol } \text{NH}_3 = \frac{F_{\text{reag.}} \cdot \rho \cdot C_{\text{NH}_3} \cdot 1000}{M_{\text{reag.}}} * 2 \quad (12)$$

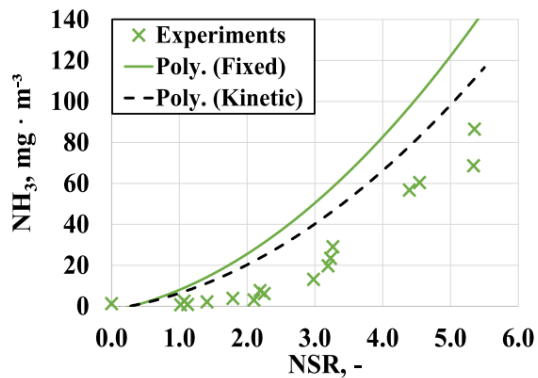
$$\text{mol } \text{NO}_x = \frac{C_{\text{NO}_x} \cdot F_{\text{išmet.duj.}}}{M_{\text{NO}_x}} \quad (13)$$

Čia C - koncentracijos (mg/Nm^3); F – srautas (l/h); M – molinė masė,

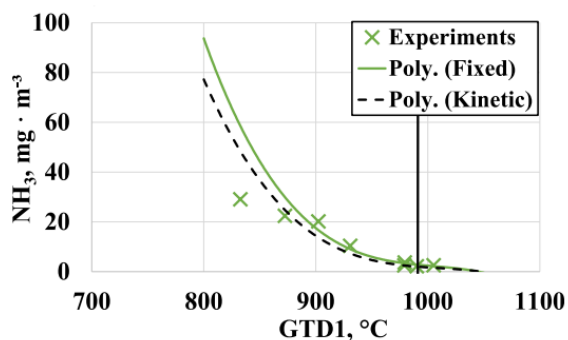
Šias NH_3 nuotėkio formules atitinka skaičiavimai programiniame kode (žr. 2 priedą):

```
(((1FFN_FIC20X-SPE-FZ3*1,1*0,6)/60,06)*2)*17,03)/((S-NOX-COMB-TOTAL-RECALC*1FTA_FQI_ENVSA-6GS)/(30*100))=NSR
```

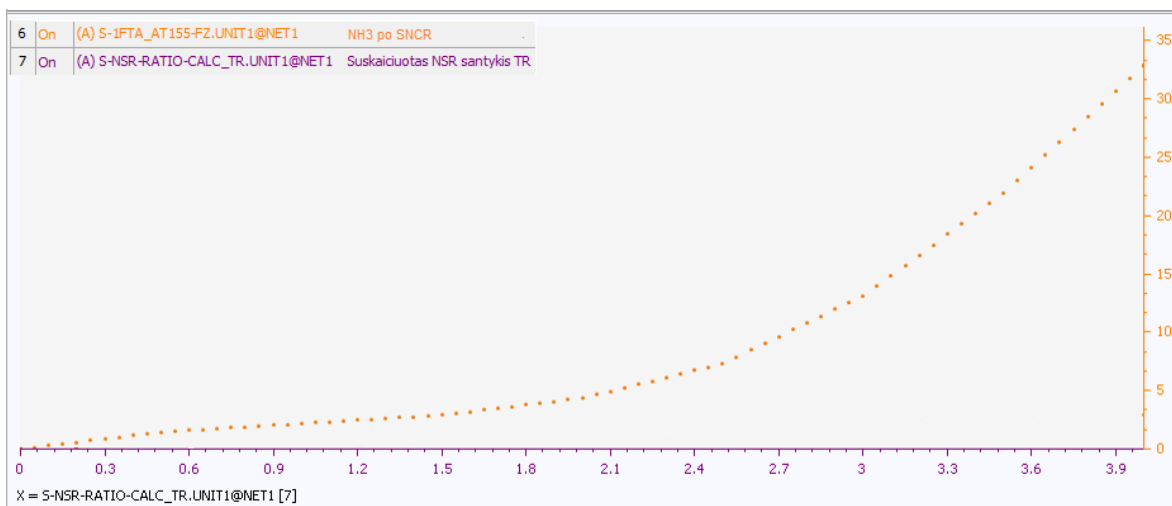
```
function(NSR)*function(1FFN_TT005)=S-1FTA_AT155-FZ
```



24 pav. NSR santykio įtakos NH₃ funkcija [14]

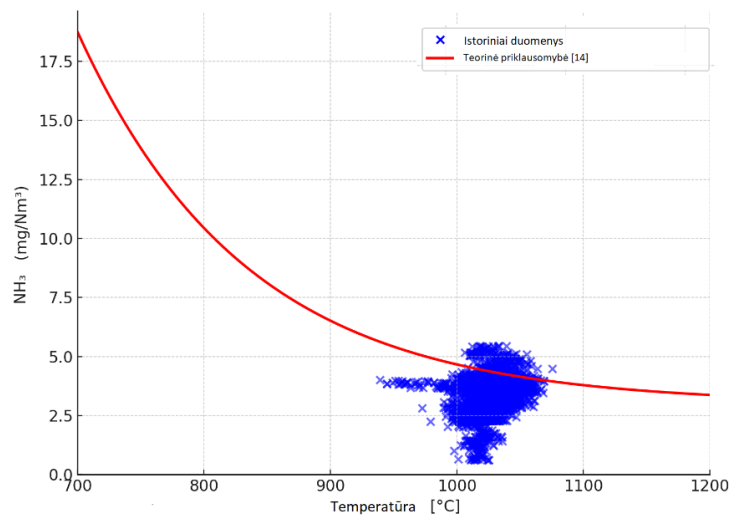


25 pav. Temperatūros įtakos NH₃ nuotėkiui funkcija [14]



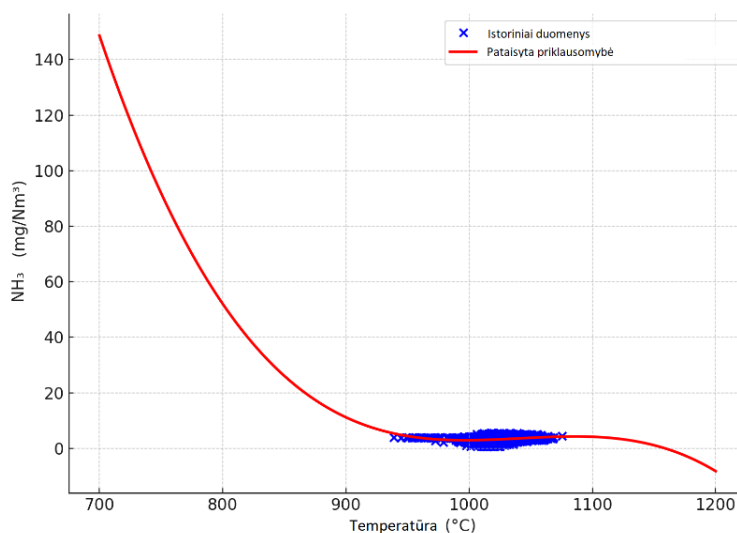
26 pav. NSR įtakos NH₃ nuotėkiui funkcijos gautos modelyje

Toliau grafiškai atvaizduojama amoniakinio nuotėgio priklausomybė nuo temperatūros iš jėgainės eksploatavimo istorinių duomenų ir teorinė priklausomybė iš 25 pav.



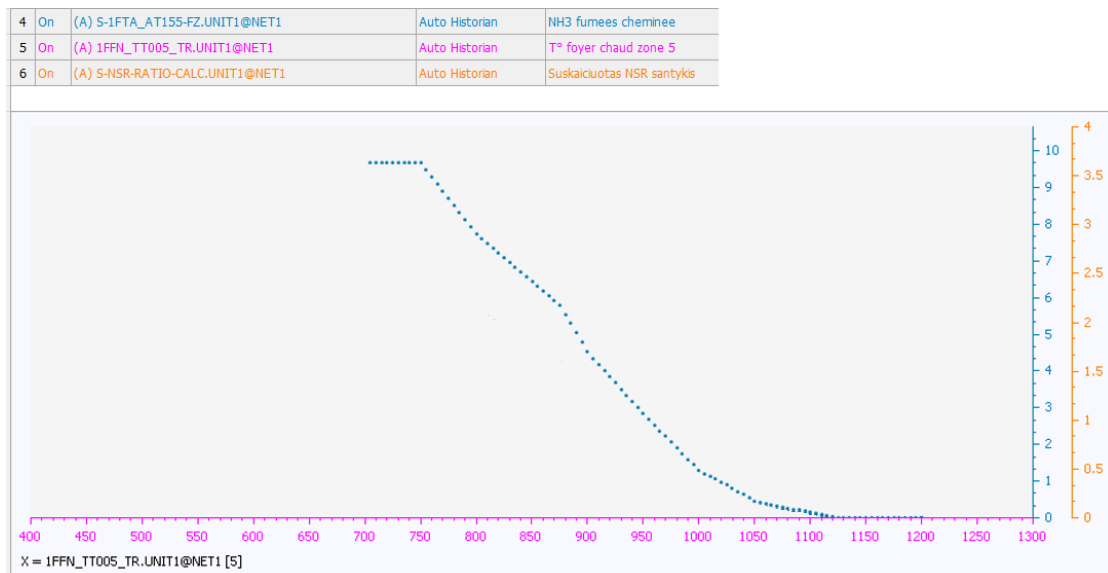
27 pav. Amoniakinio nuotėkio priklausomybės nuo temperatūros pasiskirstymas iš istorinių duomenų ir teorinė funkcija iš pav. 26

Matomas platus duomenų pasiskirstymas, priklausomybės funkcija aproksimuojama atsižvelgiant į istorinių duomenų išsibarstymą:



28 pav. Pataisyta amoniakinio nuotėkio priklausomybė nuo temperatūros

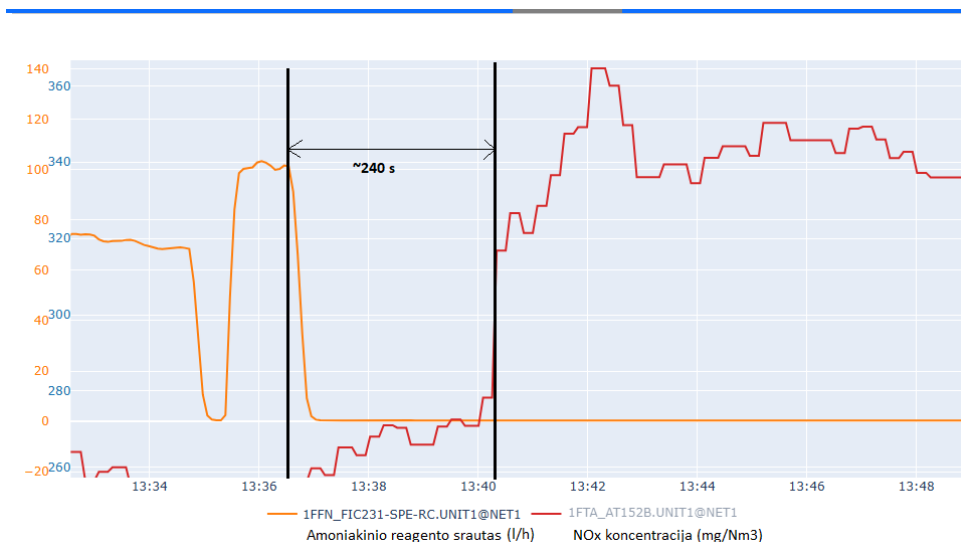
Gauta funkcija pritaikoma imitaciniame modelyje:



29 pav. Temperatūros ir NSR įtakos NH₃ nuotėkiui funkcijos gautos imitaciniame modelyje

Iš modelio procesų grafikų matome, jog sudarytos NH₃ nuotėkio funkcijos charakteristiškai atitinka nagrinėtas kreives iš [14] šaltinio ir istorinių duomenų. To pakaks toliau tirti projektuojamo reguliatoriaus funkcionalumą.

Proceso grįžtamojo ryšio vėlavimas nustatytas iš istorinių ALGA jėgainės duomenų (žr. 30 pav.). Gautas vėlavimas nuo amoniakinio reagento srauto pokyčio ir NO_x emisijų pokyčio yra 240 sekundžių. Šis vėlavimas analogiškas ir NH₃ nuotėkiui, vėlavimas įrašomas į imitacinį modelį, kaip funkcinis blokas *Transport Delay*.



30 pav. SNCR proceso grįžtamojo ryšio (NO_x matavimo) vėlavimo laiko nustatymas

Toks pats vėlavimo laikas taip pat naudojamas Smith prediktoriui sudaryti. NO_x reguliatoriaus funkcinį blokų programinis kodas su Smith prediktoriumi pateiktas 5 priede.

5. SNCR valdymas naudojant Fuzzy taisykles ir Smith prediktorių

SNCR valdymas papildytas fuzzy taisyklių rinkiniu, dėl turimų skirtingų procesą įtakančių faktorių kaip skirtingi kurai, medienos granulės, bagasas arba biomasė, nepastovios kuro drėgmės. Taip pat, dėl grįžtamojo ryšio, kuris turi ženklų vėlavimą, dėl degimo ir redukcijos proceso ypatybių ir katilo konstrukcijos, kadangi NO_x emisijos matuojamos toli nuo reakcijos zonos. Taip pat fuzzy taisyklės pakeičia receptinį valdymą, taip valdymas tampa kompaktiškesnis ir lengviau suprantamas ir derinamas. Be to, receptinis valdymas buvo atliekamas pagal vieną iš dviejų parametrų – katilo degimo kameros temperatūros arba boilerio sugeneruojamo garo srauto. Sudarytas fuzzy taisyklių rinkinys bus naudojamas pradinei nuostatos taško reikšmei gauti, o tada reguliavimą atliks NO_x PI reguliatorius, bei Smitho prediktorius. Toks signalų padavimas pirmyn dar vadinamas ang. *Feed-Forward*.

5.1. Fuzzy *Ovation* aprašymas, galimybės ir apribojimai

Ovation APC Toolkit pakete *Fuzzifier* algoritmas įgyvendina neraiškių taisyklių rinkinį, pritaikomą įvairiems jėgainės valdymo taškams taškų. Veikimo diapazonas apibrėžiamas pasirenkant neraiškius signalus ir apibrėžiant juos narystės funkcijos forma. Kiekvienam diapazonui reikia apibrėžti taisyklę, kuri bus taikoma šiam diapazonui. Remiantis dabartinėmis neraiškių signalų reikšmėmis tuo laiko momentu, *Fuzzifier* algoritmas įvertina aktyvius diapazonus ir apskaičiuoja galutinę taisyklę. Galutinis išėjimas yra apribojamas viršutine ir apatine apibrėžta verte. Didžiausias galimas įeinančių fuzifikuojančių signalų skaičius yra trys. Didžiausias sudaromų taisyklių skaičius yra 64 trimačiam rinkiniui (4x4x4=64), 36 dvimačiam (6x6=36) ir 12 vienmačiam rinkiniui. Taip pat yra dviejų tipų narių funkcijos (*Trapezoid* ir *Zadeh*) ir dviejų tipų defuzifikacijos funkcijos (*COG* ir *MOM*). Bandymams atlikti aprašant taisyklių rezultatus bus naudojamos konstantos (pav. 12). Taip pat vietoje konstantų kaip fuzzy išėjimas gali būti PID parametrų vektorius, arba bet kuris analoginis DCS sistemos kintamasis.

Galutinė fuzzy algoritmų išvestis vadinama globaliu išėjimu. Globalus išėjimas yra apskaičiuojamas kaip visų aktyvių zonų atvaizdavimas. Dalis, kuria kiekviena aktyvi zona prisideda prie nario funkcijos vertės yra nustatoma reguliatoriaus konkrečiame priskirtame plote. Yra keletas defuzifikacijos metodų ir kiekvienas metodas skiriasi matematine išraiška. *Ovation* fuzzy loginiai algoritmai palaiko du metodus. Šie palaikomi metodai yra gravitacinis centras *COG* (angl. *Center of gravity*) ir maksimumo vidurys *MOM* (angl. *Middle of maxim*).

Gravitacinio centro defuzifikacijos metodas iš esmės yra svoriu įvertintų aktyvių zonų vidurkis. Šis svoriais įvertintas vidurkis užtikrina sklandų interpoliuotą valdiklio išėjimą, vykstant proceso perėjimams per narių funkcijų zonas. „*Fuzzifier*“ algoritmo bloko išėjimo skaičiavimas pagal *COG* (13) formulę:

$$u_{globalus} = \sum_{i=1}^L \frac{\tau_i * u_i}{\sum_{j=1}^L \tau_j}; \quad (14)$$

čia L – zonų skaičius; $\tau_{i,j}$ – nario funkcijos dalis i zonoje; $u_i^{(k)}$ – i zonos išėjimo vertė;

Antrasis metodas „*Fuzzifier*“ algoritmo bloko išėjimo skaičiavimui (14) – *MOM* iš esmės naudoja tą pačią formulę, kaip ir (13), bet L – zonų skaičius su lygiomis narių vertėmis. Tuo met, jei

pavyzdžiui yra dvi aktyvios zonos, kurių abiejų narių vertės lygios 0,5, globalaus išėjimo vertė bus apskaičiuojama taip:

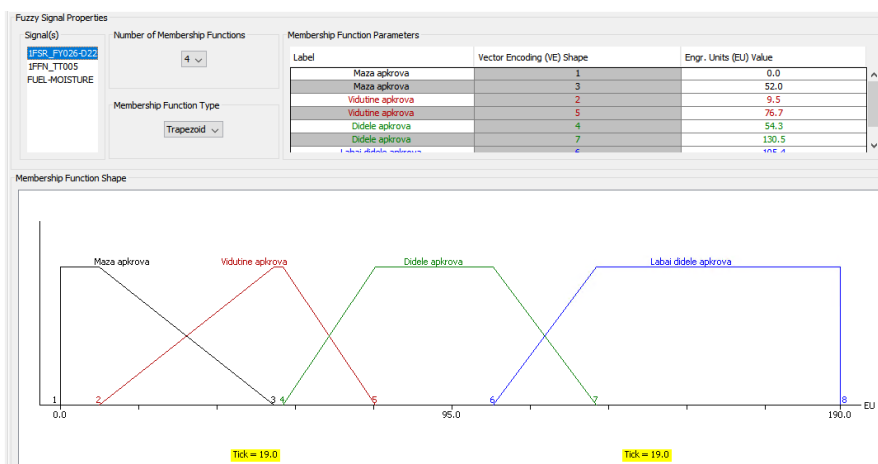
$$u_{globalus} = \frac{u_i + u_{i+1}}{2}; \quad (15)$$

Visais kitais atvejais, kai naudojamas MOM metodas, globalus išėjimas bus lygus didžiausio nario vertę turinčios aktyvios zonos išėjimui.

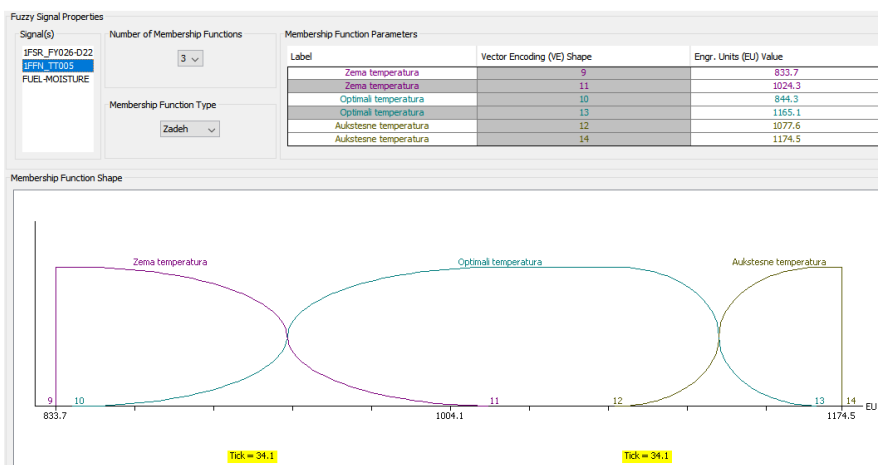
5.2. Fuzzy taisyklių sudarymas

Pagal Europos Parlamento ir Tarybos direktyvą 2010/75/ES apibrėžiamas vidutinės NO_x emisijos 200 mg/Nm³ riba, kuri neturėtų būti viršyta per 1 valandos periodą, o amoniako nuotėkis ne daugiau kaip 7 mg/Nm³ momentinės vertės. Išlaikant vidutines emisijas kuo arčiau vidutinio nuostatos taško užtikrinamas optimalus reagento sunaudojimas, kas mažina SNCR naudojimo kaštus.

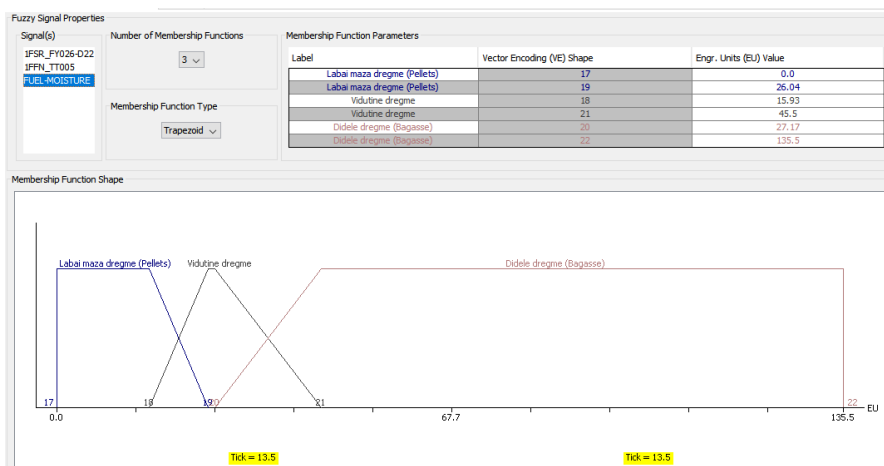
Sudaromos garo srauto, temperatūros ir drėgmės taisyklių rinkinys kuris išduos pradinį reagento srauto nuostatos tašką:



31 pav. Garo srauto fuzzy narių funkcijos



32 pav. Temperatūros fuzzy narių funkcijos



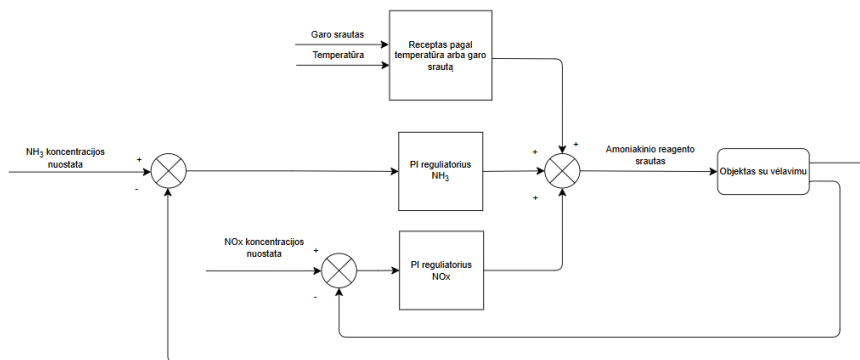
33 pav. Kuro drėgmės fuzzy narių funkcijos

If 1FSR_FY026-D22 is	and 1FFN_TT005 is	and FUEL-MOISTURE is	Constant Value
Maza aprova	Zema temperatura	Labai maza dregme (Pellets)	40.0
Maza aprova	Zema temperatura	Vidutine dregme	35.0
Maza aprova	Zema temperatura	Didele dregme (Bagasse)	30.0
Maza aprova	Optimali temperatura	Labai maza dregme (Pellets)	90.0
Maza aprova	Optimali temperatura	Vidutine dregme	85.0
Maza aprova	Optimali temperatura	Didele dregme (Bagasse)	80.0
Maza aprova	Aukstesne temperatura	Labai maza dregme (Pellets)	70.0
Maza aprova	Aukstesne temperatura	Vidutine dregme	60.0
Maza aprova	Aukstesne temperatura	Didele dregme (Bagasse)	50.0
Vidutine aprova	Zema temperatura	Labai maza dregme (Pellets)	50.0
Vidutine aprova	Zema temperatura	Vidutine dregme	45.0
Vidutine aprova	Zema temperatura	Didele dregme (Bagasse)	40.0
Vidutine aprova	Optimali temperatura	Labai maza dregme (Pellets)	130.0
Vidutine aprova	Optimali temperatura	Vidutine dregme	128.0
Vidutine aprova	Optimali temperatura	Didele dregme (Bagasse)	90.0
Vidutine aprova	Aukstesne temperatura	Labai maza dregme (Pellets)	110.0
Vidutine aprova	Aukstesne temperatura	Vidutine dregme	100.0
Vidutine aprova	Aukstesne temperatura	Didele dregme (Bagasse)	90.0
Didele aprova	Zema temperatura	Labai maza dregme (Pellets)	90.0
Didele aprova	Zema temperatura	Vidutine dregme	80.0
Didele aprova	Zema temperatura	Didele dregme (Bagasse)	120.0
Didele aprova	Optimali temperatura	Labai maza dregme (Pellets)	135.0
Didele aprova	Optimali temperatura	Vidutine dregme	250.0
Didele aprova	Optimali temperatura	Didele dregme (Bagasse)	95.0
Didele aprova	Aukstesne temperatura	Labai maza dregme (Pellets)	280.0
Didele aprova	Aukstesne temperatura	Vidutine dregme	150.0
Didele aprova	Aukstesne temperatura	Didele dregme (Bagasse)	70.0
Labai didele aprova	Zema temperatura	Labai maza dregme (Pellets)	90.0
Labai didele aprova	Zema temperatura	Vidutine dregme	80.0
Labai didele aprova	Zema temperatura	Didele dregme (Bagasse)	120.0
Labai didele aprova	Optimali temperatura	Labai maza dregme (Pellets)	300.0
Labai didele aprova	Optimali temperatura	Vidutine dregme	250.0
Labai didele aprova	Optimali temperatura	Didele dregme (Bagasse)	95.0
Labai didele aprova	Aukstesne temperatura	Labai maza dregme (Pellets)	280.0
Labai didele aprova	Aukstesne temperatura	Vidutine dregme	150.0
Labai didele aprova	Aukstesne temperatura	Didele dregme (Bagasse)	90.0

34 pav. Sudarytos fuzzy taisyklės

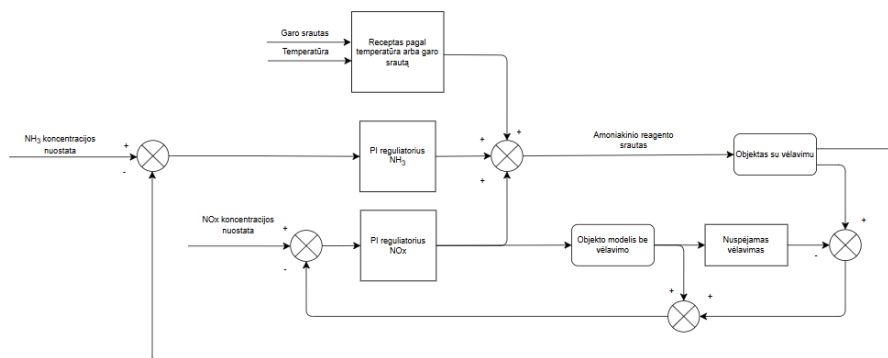
5.3. Valdymo kontūrų sudarymas

Esamo valdymo kontūras pateiktas 35 pav. pradinis NO_x nuostatos taškas parenkamas tarp temperatūros ir garo srauto pusiau rankiniu būdu. Tuomet reguliavimas su grįžtamuju NO_x ryšiu vyksta per PI reguliatorių, o jei yra viršijama nustatyta NH_3 riba (7 mg/Nm^3), NH_3 PI reguliatorius perima valdymą ir sumažina iki nustatyto limito.



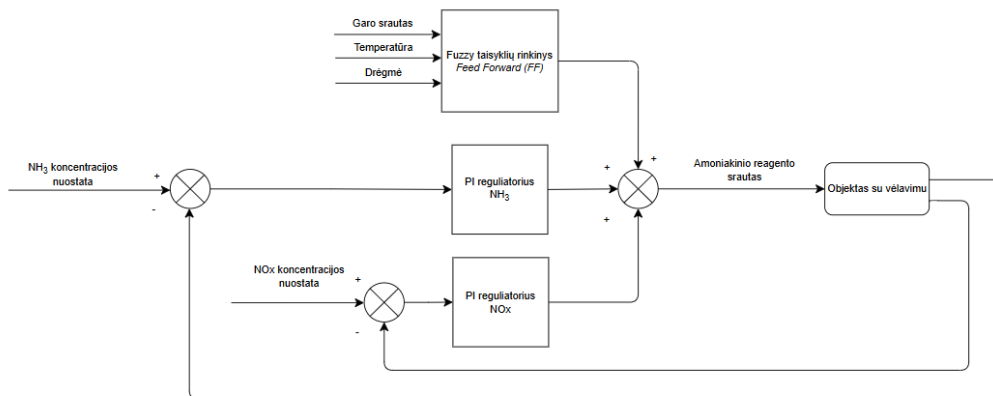
35 pav. 1 valdymo sistema. Pradinis SNCR proceso valdymo kontūras su receptais ir PI reguliatoriais

Pradinis receptinis valdymas patobulinamas pridendant Smith prediktorių (36 pav.) prie NO_x PI reguliatoriaus, tokiu būdu kompensuojamas vėlavimas, nes PI reguliatorius gaus grįžtamąjį ryšį be vėlavimo.



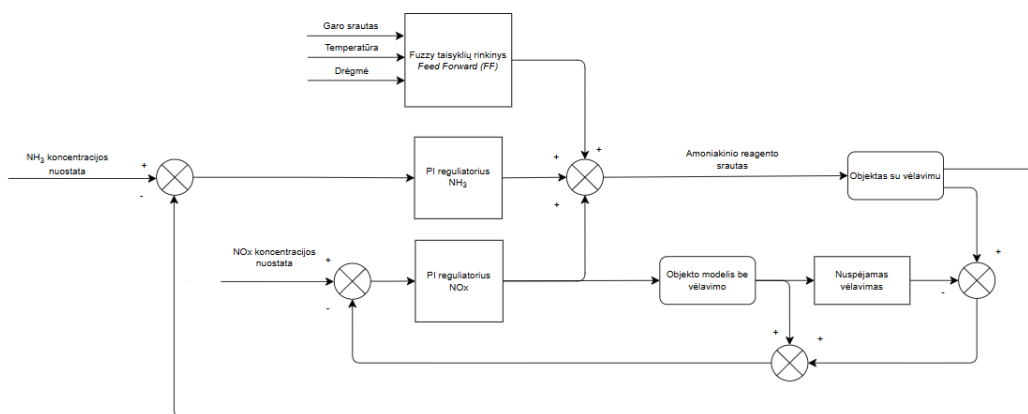
36 pav. 2 valdymo sistema. Patobulintas pradinis SNCR proceso valdymo kontūras su receptais, PI reguliatoriais ir Smith prediktoriumi

Sudaromas naujas valdymo kontūras turintis *Feed-Forward* fuzzy taisyklių rinkinį ir PI NO_x reguliatorių, bei NH_3 PI reguliatoriumi (37 pav.). Fuzzy taisyklės pagal katilo ir kuro parametrus nustatys pradinę amoniakinio reagento srauto nuostatos tašką, o PI reguliatoriai pagal grįžtamąjį ryšį atliks reagento srauto korekcijas.



37 pav. 3 valdymo sistema. SNCR proceso valdymo kontūras su fuzzy taisyklių rinkiniu ir PI reguliatoriais

Toliau valdymas su fuzzy taisyklėmis patobulinamas pridendant Smith prediktorių (38 pav.) prie NO_x PI reguliatoriaus, tokiu būdu kompensuojamas vėlavimas, nes PI reguliatorius gaus grįžtamąjį ryšį be vėlavimo.



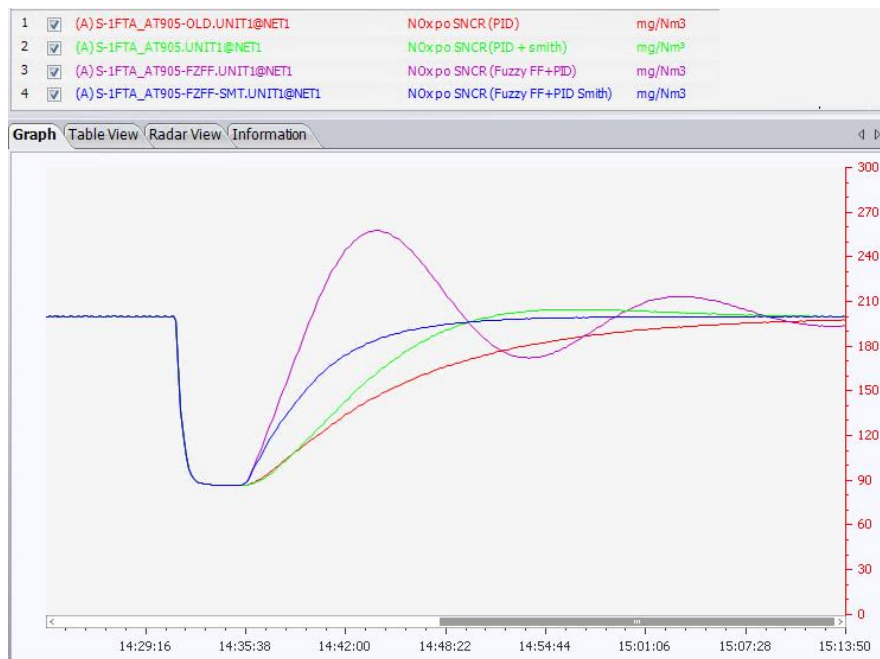
38 pav. 4 valdymo sistema. SNCR proceso valdymo kontūras su fuzzy taisyklių rinkiniu, PI reguliatoriais ir NO_x Smith prediktoriumi

5.4. Eksperimentiniai bandymai

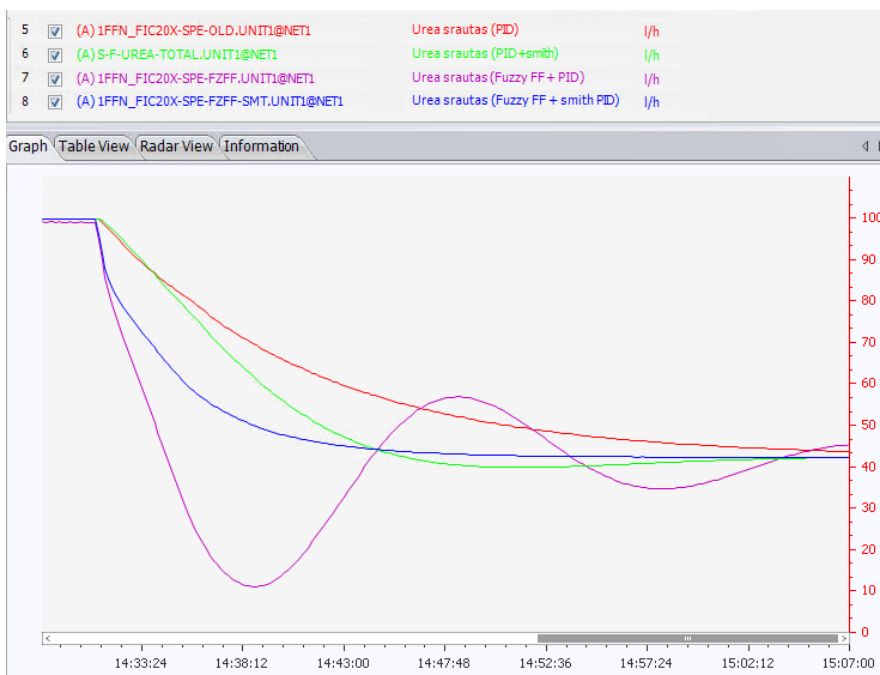
Pirma bus išbandyti 5.3. poskyryje sudaryti valdymo kontūrai, bei esamas valdymo kontūras. Tuomet, pagal proceso šuolines charakteristikas nustatius dvi geriausias reakcijas, toliau bus testuojami šie du kontūrai.

5.4.1. Skirtingų valdymo sistemų pereinamojo proceso palyginimas

Pirmuoju bandymu paduodamas NO_x signalo žingsnis žemyn nuo 400 iki 285 mg/Nm^3 ir stebimos proceso reakcijos su skirtingais 4 sudarytais valdymo kontūrais:



39 pav. Proceso reakcija į NO_x lygio pokytį



40 pav. Proceso reakcijos į NO_x pokytį reguliatorių išėjimo signalai (reagento srautas, l/h)

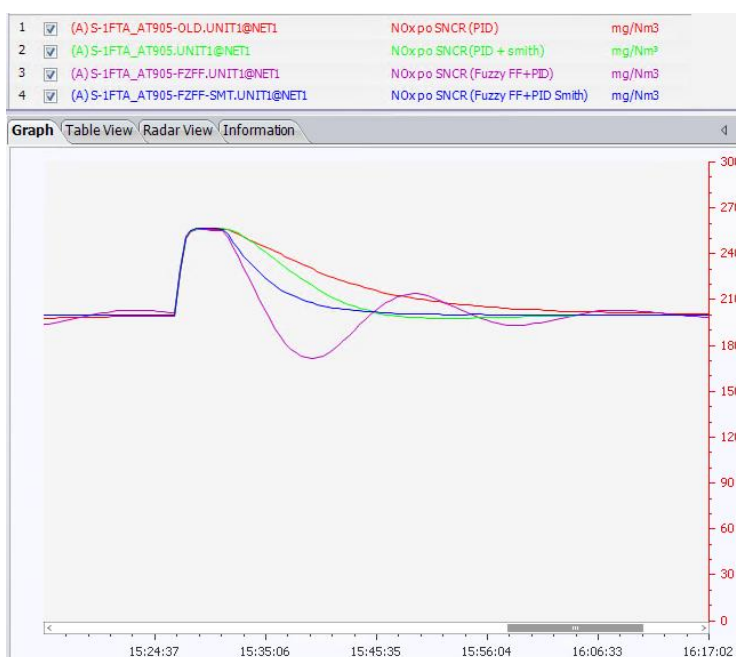
Proceso reakcijoms įvertinti naudojami ne tik standartiniai parametrai, tokie kaip: perreguliavimas, nusistovėjimo laikas, reakcijos kilimo laikas, statinė paklaida, bet ir vidutinė NO_x koncentracija per valandą, sunaudoto reagento tūris. Paskutiniai du minėtieji parametrai leidžia įvertinti valdymo sistemos ekonominę efektyvumą, kuo mažiau reagento bus sunaudota išlaikant vidutinę emisijų koncentracijos normą, tuo bus mažesni SNCR sistemos eksploatavimo kaštai. Visgi, reikia nepamiršti, jog tai pat svarbu įvertinti nusistovėjimo laiką ir perreguliavimą. Šie turėtų būti kuo įmanoma mažesni, kad procesas pasiektų stabilią būseną kuo greičiau.

2 lentelė. NO_x šuolinės reakcijos (400-285mg/Nm³) parametrai

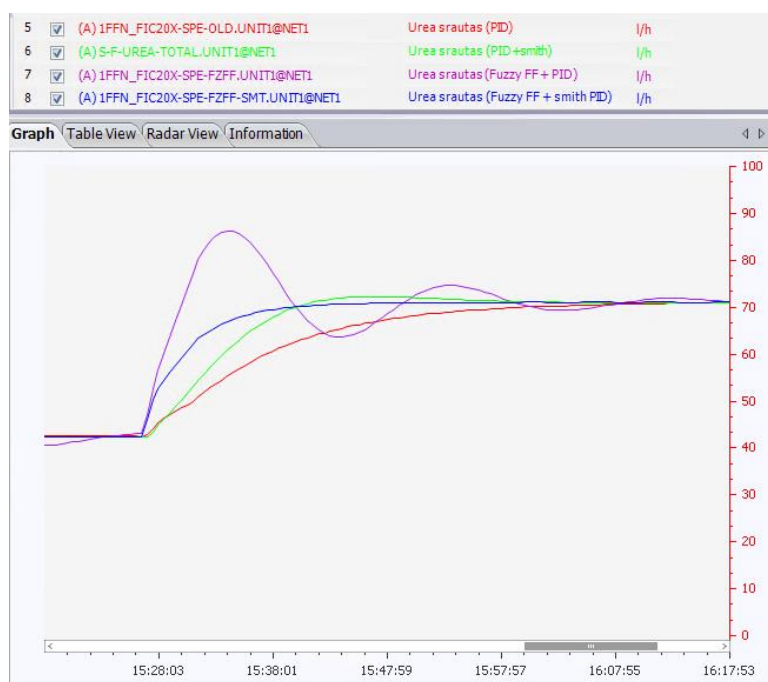
NO _x šuolis (400-285 mg/Nm ³)	Vidutinis NO _x mg/Nm ³	Perreguliavimas, %	Nusistovėjimo laikas (5%), s	Kilimo laikas (90%), s	Statinė paklaida
1. PI	175	0	29 m	22 m 30 s	-0,499
2. PI su Smith prediktoriumi	184	2,41	17 m 10 s	15 m 20 s	0,044
3. Fuzzy taisyklės su PI	199	28,1	34 m 30 s	7 m 55 s	1,312
4. Fuzzy taisyklės su PI ir Smith prediktoriumi	177	0,89	14 m 30s	11 m 50s	0,119

Pirmuoju bandymu, geriausi rezultatai gauti 2 ir 4 valdymo sistemomis su Smito prediktoriais, nedidelis perreguliavimas (atitinkamai 2,41% ir 0,89%) ir mažiausias nusistovėjimo laikas (atitinkamai 17 min 10 s ir 14 min 30 s).

Antruoju bandymu paduodamas NO_x signalo žingsnis aukštyr nuo 285 iki 340 mg/Nm³ ir stebimos proceso reakcijos su skirtingais 4 sudarytais valdymo kontūrais:



41 pav. Proceso reakcija į NO_x lygio pokytį



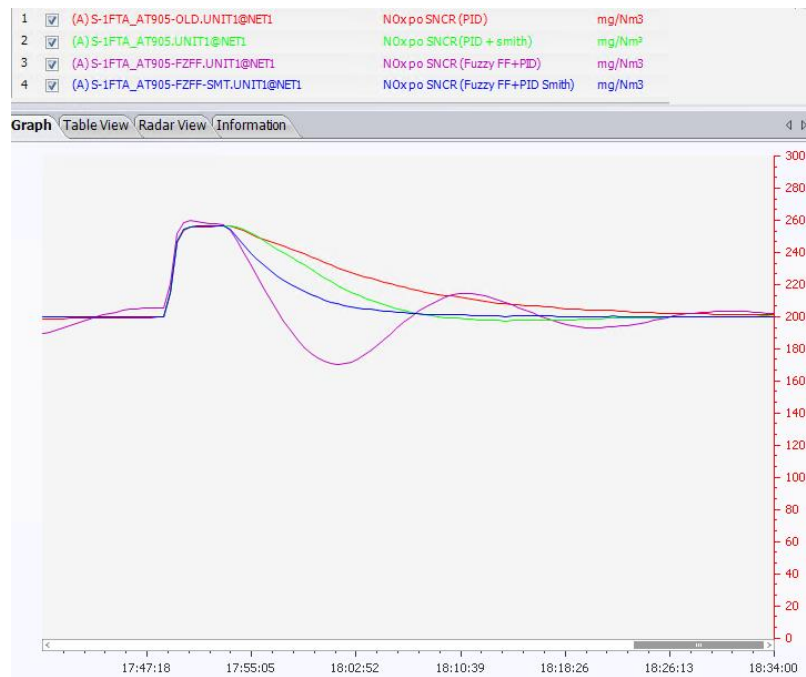
42 pav. Proceso reakcijos į NO_x pokytį reguliatorių išėjimo signalai (reagento srautas, l/h)

3 lentelė. NO_x šuolinės reakcijos (285-340 mg/Nm³) parametrai

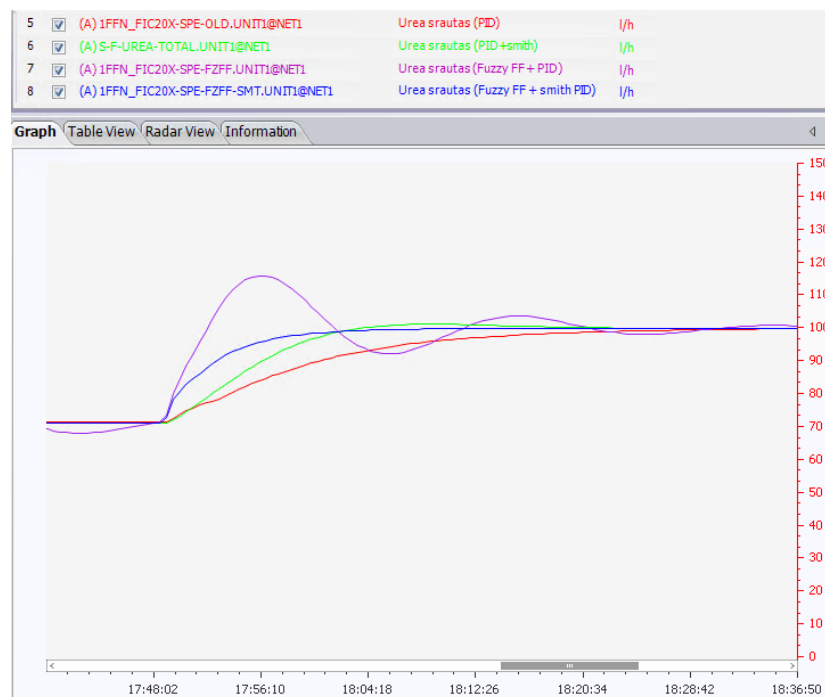
NO _x šuolis (285-340 mg/Nm ³)	Vidutinis NO _x mg/Nm ³	Perreguliavimas, %	Nusistovėjimo laikas (5%), s	Kilimo (leidimosi) laikas (110%), s	Statinė paklaida
1. PI	212	0	19 m	12 m 21 s	0,864
2. PI su Smith prediktoriumi	205	0	10 m 49 s	8 m 15 s	0,088
3. Fuzzy taisyklės su PI	197	-14,11	20 m 9 s	2 m 47 s	0,22
4. Fuzzy taisyklės su PI ir Smith prediktoriumi	210	0	7 m 30 s	4 m 45 s	-0,005

Antruoju bandymu, geriausi rezultatai gauti taip pat 2 ir 4 valdymo sistemomis, be perreguliavimo ir su mažiausiais nusistovėjimo laikais (atitinkamai 10 min 49 s ir 7 min 30 s).

Trečiuoju bandymu paduodamas NO_x signalo žingsnis aukštyr nuo 335 iki 395 mg/Nm³ ir stebimos proceso reakcijos su skirtingais 4 sudarytais valdymo kontūrais:



43 pav. Proceso reakcija į NO_x lygio pokytį



44 pav. Proceso reakcijos į NO_x pokytį regulatorių išėjimo signalai (reagento srautas, l/h)

4 lentelė. NO_x šuolinės reakcijos (335-395 mg/Nm³) parametrai

NO _x šuolis (335-395 mg/Nm ³)	Vidutinis NO _x mg/Nm ³	Perreguliavimas, %	Nusistovėjimo laikas (5%), s	Kilimo laikas (90%), s	Statinė paklaida
1. PI	184	2,41	17 m 10 s	15 m 20 s	0,044
2. PI su Smith prediktoriumi	175	0	29 m	22 m 30 s	-0,499

3. Fuzzy taisyklės su PI	199	28,1	34 m 30 s	7 m 55 s	1,312
4. Fuzzy taisyklės su PI ir Smith prediktoriumi	177	0,89	14 m 30s	11 m 50s	0,119

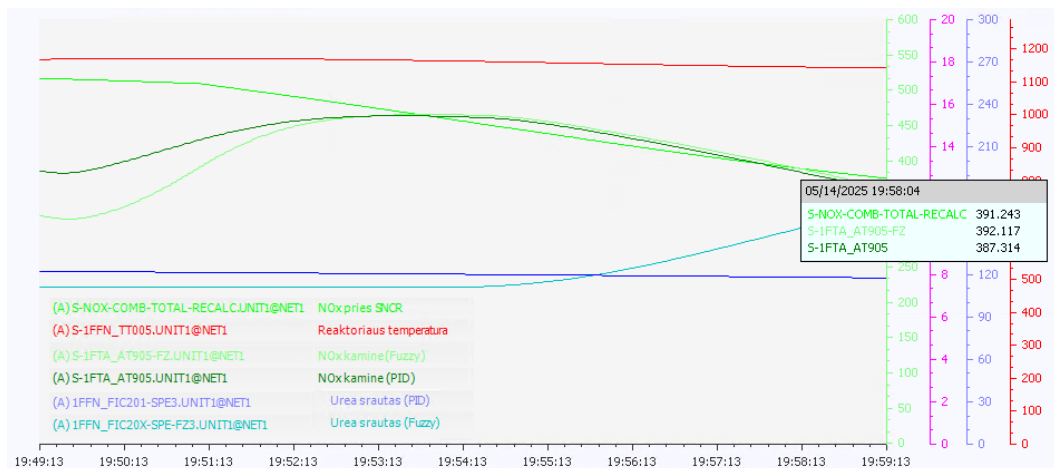
Atlikus bandymus su 4 skirtingomis valdymo sistemomis, nustatyti geriausi rezultatai su 2 ir 4 sistema. Lyginant 3 ir 4 sistemas, Smith prediktorius pagerino fuzzy taisyklių su PI reguliatoriumi sistemos valdymą, taip pat lyginant 1 su 2, gautas geresnės proceso charakteristikos.

Toliau tyrimas bus atliekamas su 2 sistema (PI su Smith prediktoriumi) ir 4 sistema (Fuzzy taisyklės su PI ir Smith prediktoriumi) tiriant reakcijas į įvairius proceso parametrų pokyčius.

5.4.2. Valdymo sistemų reakcijos į proceso parametrus

Atliekami SNCR proceso bandymai:

- Reakcija į drėgmės pokytį
- Perėjimas iš sauso kuro (medienos granulių) į šlapią (bagasą)
- Reakcija į temperatūros pokytį
- Reakcija garo srauto pokytį
- Dviejų parametrų staigus pokytis

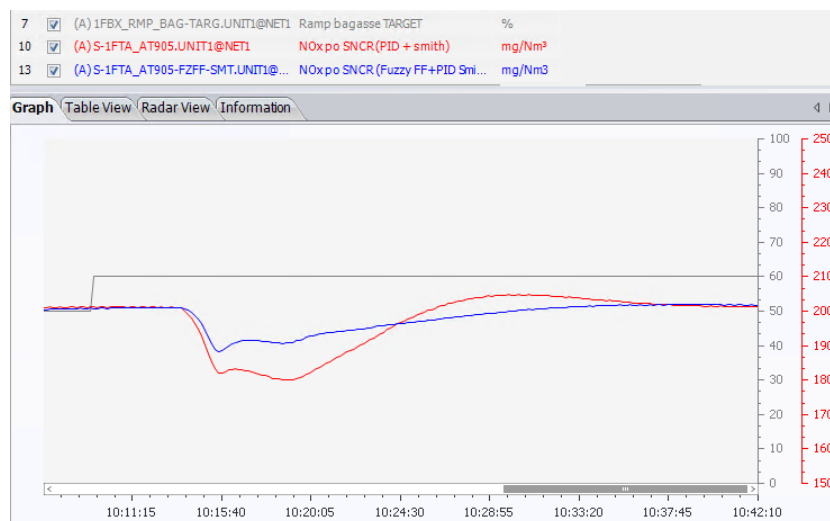


45 pav. Procesas, kai temperatūra redukcijai yra per aukšta

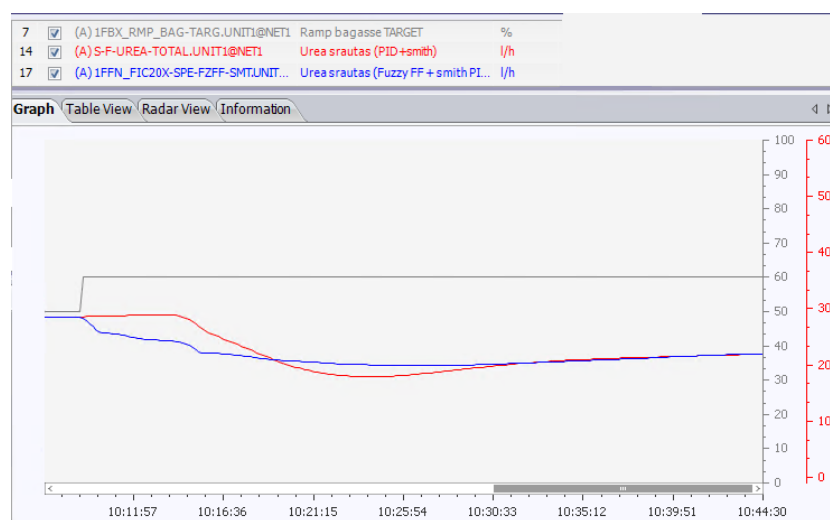
Testuojant sistemą ir reguliatorius, stebėta kaip SNCR procesas reaguoja į temperatūrą, drėgmę ir kitus parametrus. 45 pav. matoma kaip esant per aukštai reakcijos kameros temperatūrai (~1150 °C) azoto oksidų redukcijos procesas tampa neefektyvus – NO_x koncentracija po SNCR susilygina su koncentracija prieš procesą. Kitaip sakant, kad ir koks yra įpurškiamo reagento kiekis, reakcija nevyksta, nes esama temperatūra yra netinkama.

5.4.3. Reakcija į drėgmės ir kuro santykio pokytį

Atliekami bandymai keičiant bagaso ir medienos granulių santykį. Tai daroma iš operatoriaus HMI keičiant bagaso santykį (*Ovation* kintamasis *IFBX_RMP_BAG-TARG*) - tai yra bagaso procentinė dalis kartu su medienos granulėmis sudaranti bendra kuro masę. Jei bagaso santykis 46%, tai reiškia granulių santykinė dalis yra 54%.



46 pav. Proceso reakcijos į bagaso santykio pokytį 50-60%

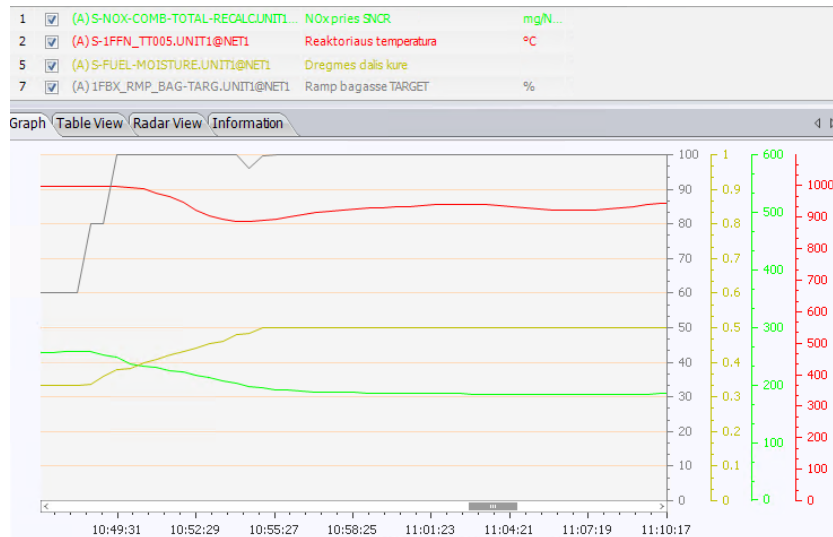


47 pav. Proceso reakcijos į bagaso santykio pokytį 50-60%. Reguliatorių išėjimai

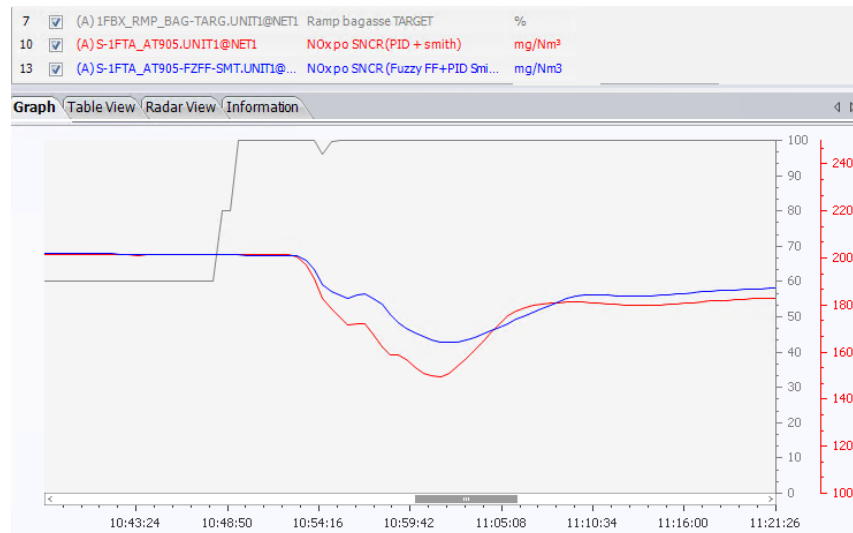
5 lentelė. Reakcijos į kuro santykio pokytį (50-60%) parametrai

Kuro santykio šuolis (50-60 %)	Vidutinis NO _x , per 1h mg/Nm ³	Perreguliavimas, %	Nusistovėjimo laikas (5%), s	Reagento sąnaudos, l/h	Regulatoriaus išėjimo vėlavimas
2. PI su Smith prediktoriumi	197	-8,9	13 m 39 s	10,1	5 m 3 s
4. Fuzzy taisyklės su PI ir Smith prediktoriumi	199	-5,9	7 m 3 s	9,2	8 s

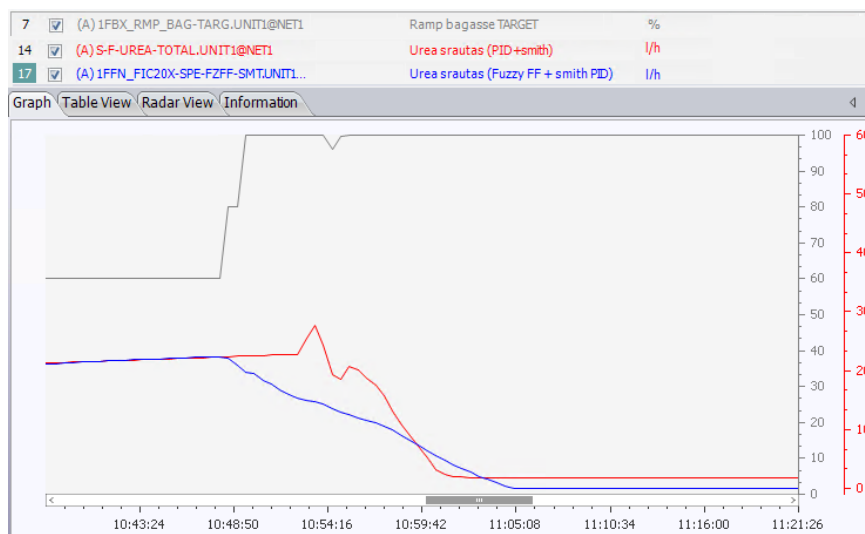
Atlikus bandymą su bagaso santykio pokyčiu iš 60% į 100%, kuro drėgmė pakito iš 33,2% į 50%, o vienu momentu sumažėjo iki 887 °C. Dėl to laikui bėgant prieš SNCR susidariusio NO_x koncentracija sumažėjo iki 183 mg/Nm³, tai yra žemiau nuostatos limito, taigi, reguliatoriai pradėjo stabdyti amoniakinio reagento srautą.



48 pav. Proceso temperatūros, drėgmės ir NO_x prieš SNCR reakcijos į bagaso santykio pokytį 60-100%



49 pav. Proceso reakcijos į bagaso santykio pokytį 60-100%

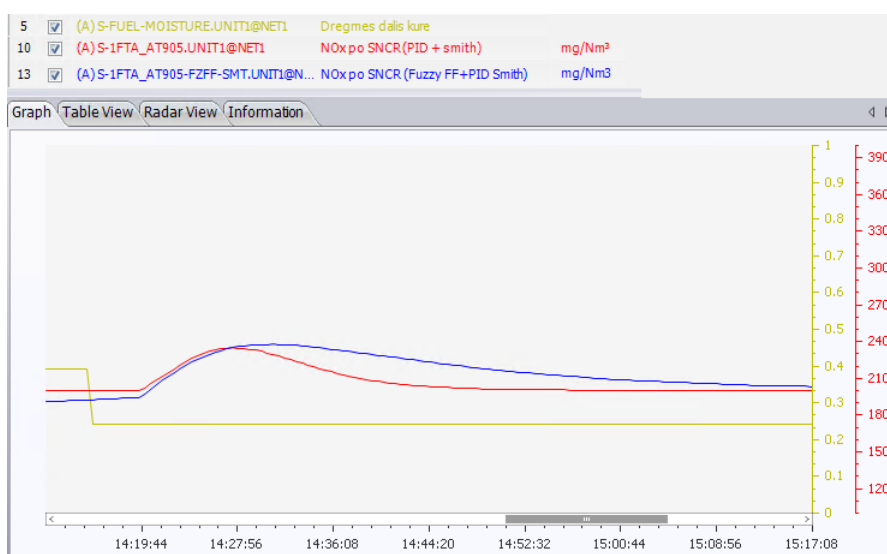


50 pav. Proceso reakcijos į bagaso santykio pokytį 60-100%. Reguliatorių išėjimai

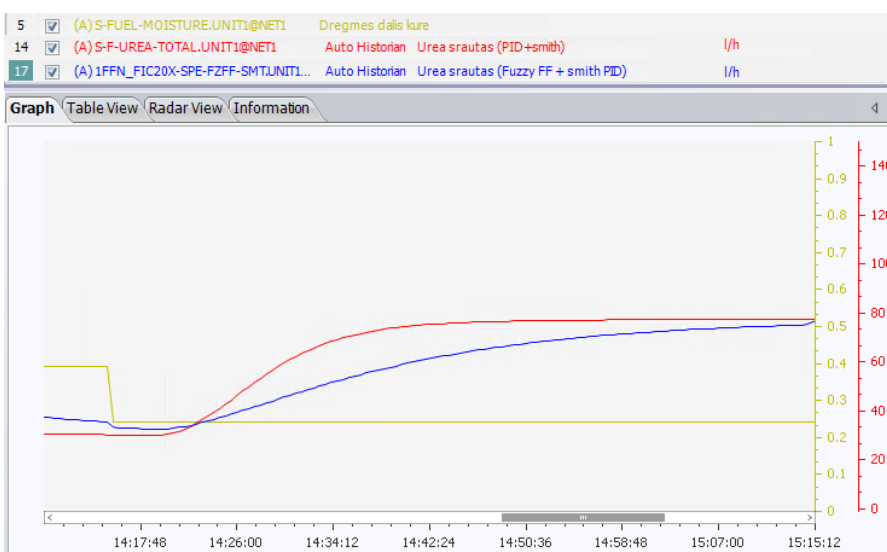
6 lentelė. Reakcijos į kuro santykio pokytį (60-100%) parametrai

Kuro santykio šuolis (60-100 %)	Vidutinis NO _x , per 1h mg/Nm ³	Perreguliavimas, %	Nusistovėjimo laikas (10%), s	Reagento sąnaudos, l	Regulatoriaus išėjimo vėlavimas
2. PI su Smith prediktoriumi	179	-25,185	19 m 12 s	5,74	4 m 30 s
4. Fuzzy taisyklės su PI ir Smith prediktoriumi	183	-17,966	20 m	5,03	27 s

Toliau atliekamas bandymas keičiant kuro drėgmę, ir stebima azoto oksidų koncentracijos reakcija į šuolį. Realybėje toks šuolis gali atsirasti, kai keičiasi iš kur yra paduodamas bagasas, tiesiai iš cukraus fabriko (labai drėgnas) ar iš bagaso talpyklų (mažiau drėgnės) kuriose vyksta džiovinimas.



51 pav. Proceso reakcijos į kuro drėgmės pokytį 39-24%



52 pav. Proceso reakcijos į kuro drėgmės pokytį 39-24%. Reguliatorių išėjimai

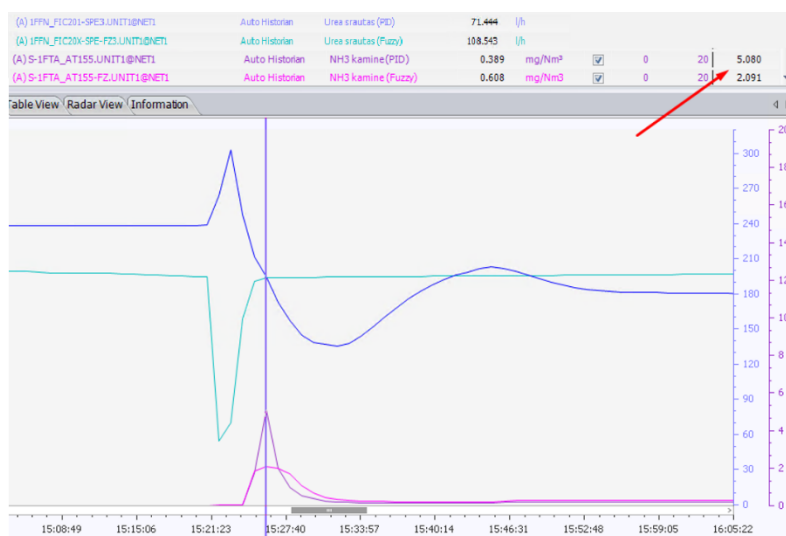
7 lentelė. Reakcijos į kuro drėgmės pokytį (39-24%) parametrai

Kuro drėgmės pokytis (39-24%)	Vidutinis NO _x , per 1h mg/Nm ³	Perreguliavimas, %	Nusistovėjimo laikas (10%), s	Reagento sąnaudos, l	Regulatoriaus išėjimo vėlavimas
2. PI su Smith prediktoriumi	211	17,3	23 m 10 s	58,78	4 m 46 s
4. Fuzzy taisyklės su PI ir Smith prediktoriumi	217	18,85	42 m 30 s	55,05	30 s

Bendrai iš atliktų eksperimentų su drėgmės pokyčiu, aiškiai matyti, kad reguliatorius turintis fuzzy taisyklių *feedforward* ženkliai anksčiau reaguoja į pakitusią drėgmę (nuo 243 iki 295 sek. greičiau), kadangi tai yra vienas iš trijų šio taisyklių rinkinio įėjimų, o senasis valdymo algoritmas tiesiogiai nereaguoja į drėgmės pokytį, o reaguoja tik į pakitusį azoto oksidų po SNCR lygį, dėl ko atsiranda vėlavimas. Tačiau nusistovėjimo laikas, 4 valdymo sistemos, ne visada yra mažesnis, dėl to reikalingas tolimesnis fuzzy taisyklių derinimas.

5.4.4. Reakcija į temperatūros pokyčius

Nors tiesiogiai katile temperatūra nėra reguliuojama, bet temperatūros įtaką yra svarbiausias parametras įtakojantis NO_x koncentracijos lygį ir amoniako nuotėkį. Esant netinkamai temperatūrai redukcijos reakcija bus neefektyvi (žr. 53 pav.).

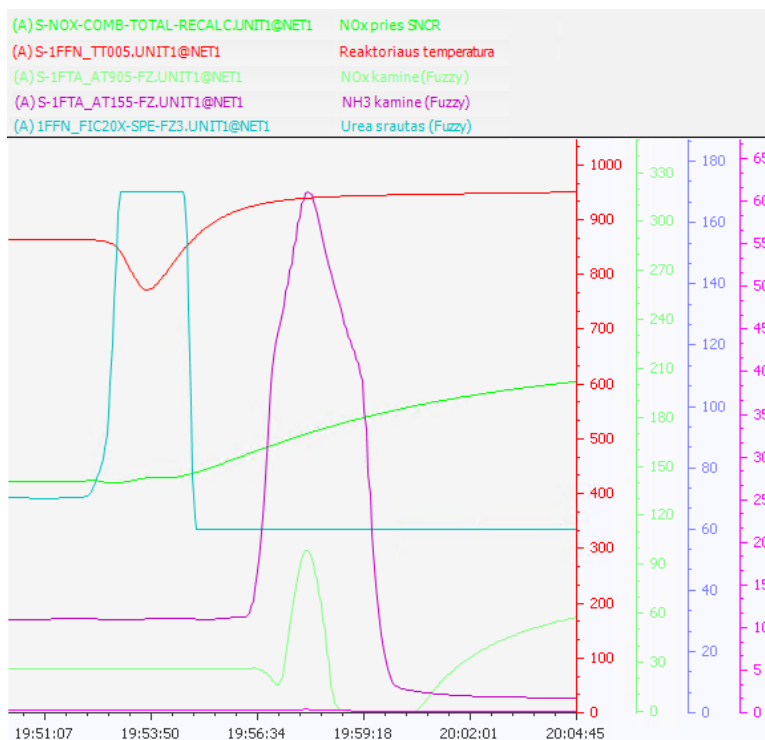


53 pav. Proceso reakcijos į temperatūros pokytį 1116-855-1050°C

Įvykus temperatūros svyravimui 1116-855-1050°C fuzzy taisyklės su PI ir Smith prediktoriumi į pokytį pradėjo reaguoti po 30s, o PID reguliatorius – po 60s. Bandyto metu naudotas kuras buvo 8% drėgmės medienos granulės. Taip pat matomas labai didelis PI reguliatoriaus išduodamas amoniakinio reagento srautas ~300l/h, kuris lėmė išaugusį NH₃ nuotėkį, šis siekė 5,08 mg/Nm³ (žr. 53 pav.).

Esant netinkamam reguliatoriaus valdymui su fuzzy taisyklėmis, stebėtas iki 60 mg/Nm³ amoniakinis nuotėkis (žr. 54 pav.), kai reguliatorius fuzzy taisyklės išdavė aukštą reagento srauto nuostatą. Šie

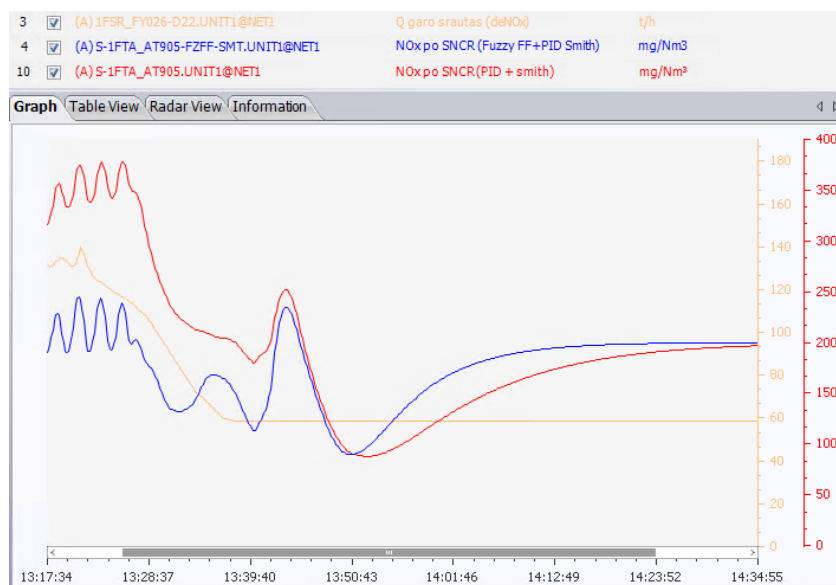
temperatūriniai bandymai buvo atlikti pradinėse tyrimo stadijose. Dėl šių problemų, svarbu išjungti reagento įpurškimą, kai temperatūra yra netinkama reakcijai, ir būtina naudoti NH₃ reguliatorių, kuris ribiniame momente perimtų valdymą.



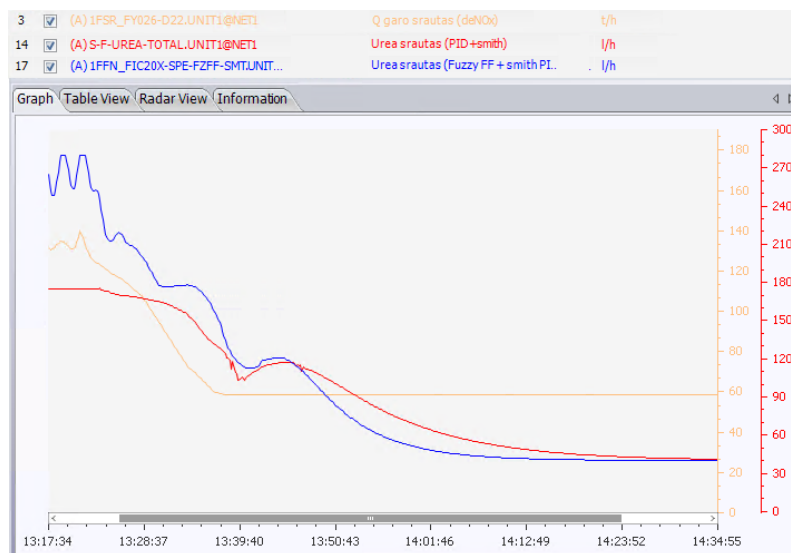
54 pav. Proceso reakcijos į mažą NO_x lygį

5.4.5. Reakcija į garo srauto pokyčius

Nors tiesiogiai garo srautas neturi įtakos azoto oksidų susidarymui, tačiau tai padeda įvertinti degimo metu išskiriamos energijos kiekį. Toliau bus atliekami bandymai keičiant garo srauto nuostatą ir stebint proceso reakcijas.



55 pav. NO_x koncentracijos reakcijos į garo srauto pokytį 140-58,5 t/h

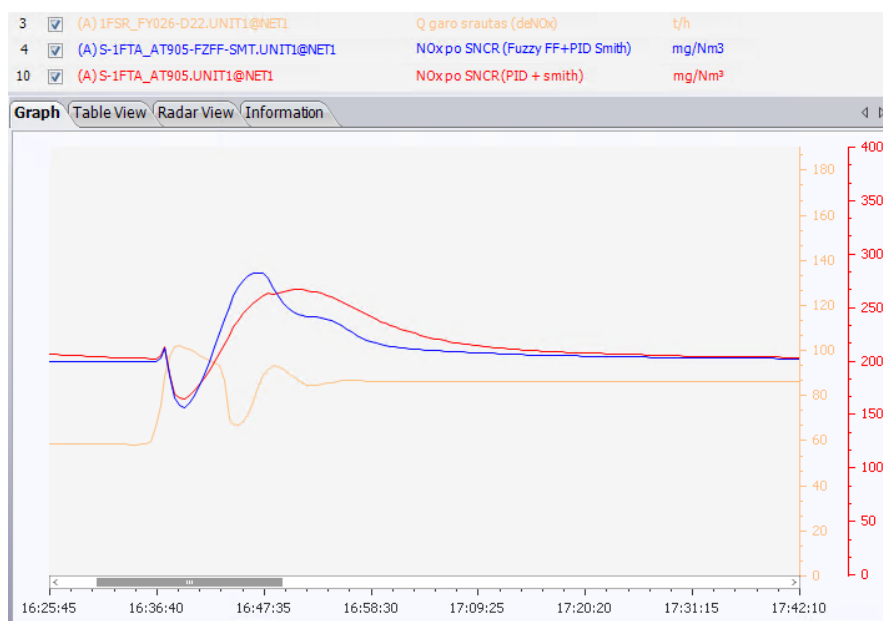


56 pav. Valdymo išėjimas – reagento srautas. Proceso reakcijos į garo srauto pokytį 140-58,5 t/h

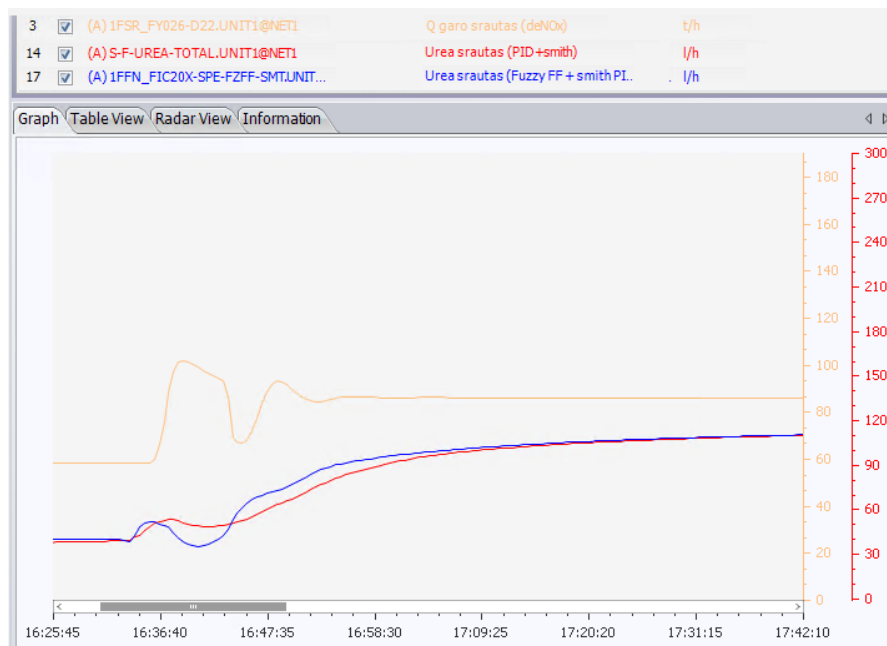
8 lentelė. Reakcijos į garo srauto pokytį 140-58,5 t/h parametrai

Garų srauto šuolis (140-58,5 t/h)	Vidutinis NO _x mg/Nm ³	Perreguliavimas, %	Nusistovėjimo laikas (5%), s	Reagento sąnaudos, l
2. PI su Smith prediktoriumi	174	-56,03	62 m	111,9
4. Fuzzy taisyklės su PI ir Smith prediktoriumi	169	-54,79	47 m 45 s	106,5

Atlikus bandymą su garo srauto pokyčiu nuo 140 iki 58,5 t/h gautas didesnis perreguliavimas su 2 valdymo sistema, ir taip pat daugiau nei 14 min ilgesnis nusistovėjimo laikas. Mažiau reagento buvo sunaudota su 4 valdymo sistema, ir buvo pasiekta mažesnė koncentracija (skaičiuota nuo garo srauto pokyčio pradžios taško).



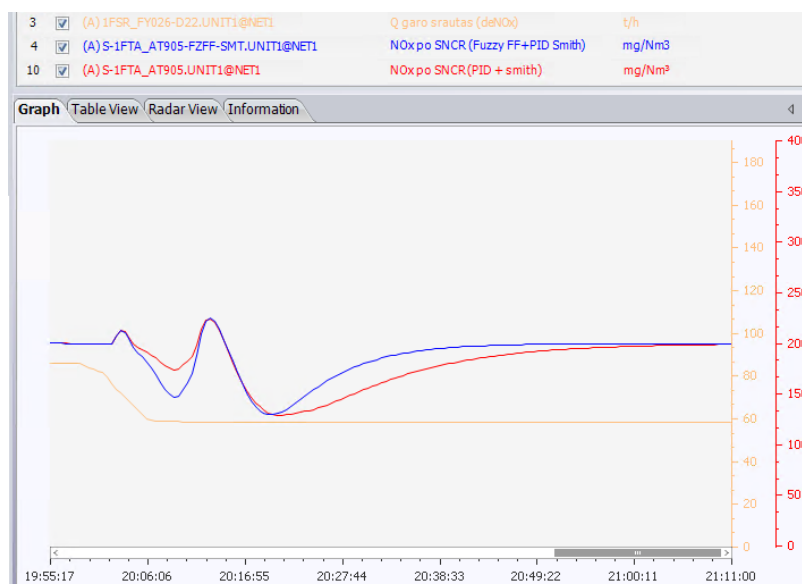
57 pav. NO_x koncentracijos reakcijos į garo srauto pokytį 58-86 t/h



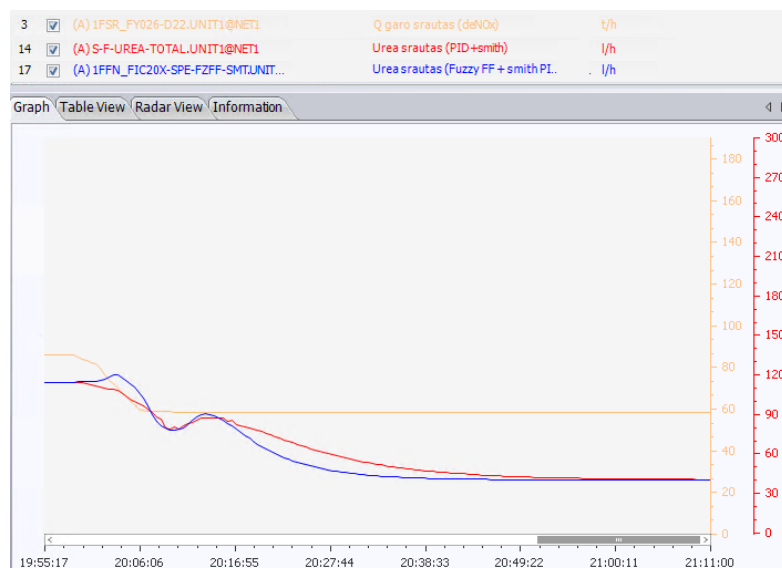
58 pav. Valdymo išėjimas – reagento srautas. Proceso reakcija į garo srauto pokytį 58-86 t/h

9 lentelė. Reakcijos į garo srauto pokytį 58-86 t/h parametrai

Garo srauto svyravimai (58-86 t/h)	Vidutinis NO _x , per 1h mg/Nm ³	Perreguliavimas, %	Nusistovėjimo laikas (5%), s	Reagento sąnaudos, l
2. PI su Smith prediktoriumi	219	33,42	39 m 10 s	97
4. Fuzzy taisyklės su PI ir Smith prediktoriumi	214	41,37	28 m 57 s	104



59 pav. NO_x koncentracijos reakcijos į garo srauto pokytį 86-58 t/h



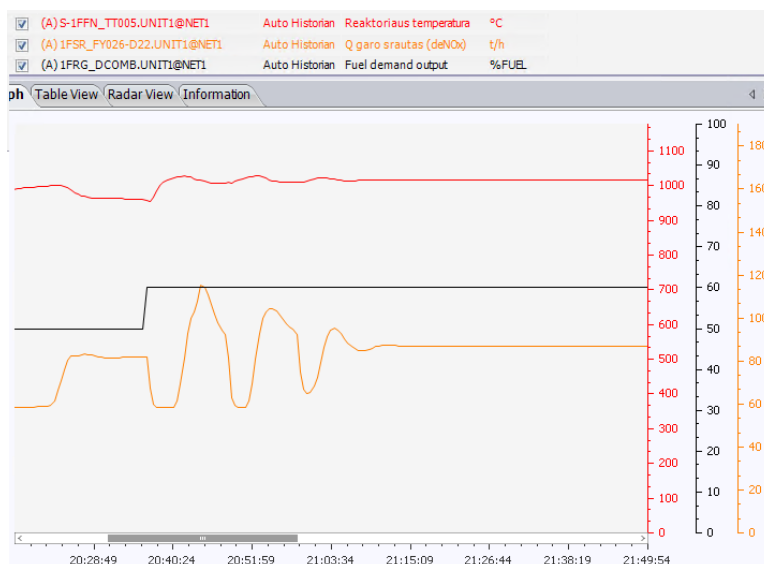
60 pav. Valdymo išėjimas – reagento srautas. Proceso reakcija į garo srauto pokytį 86-58 t/h

10 lentelė. Reakcijos į garo srauto pokytį 86-58 t/h parametrai

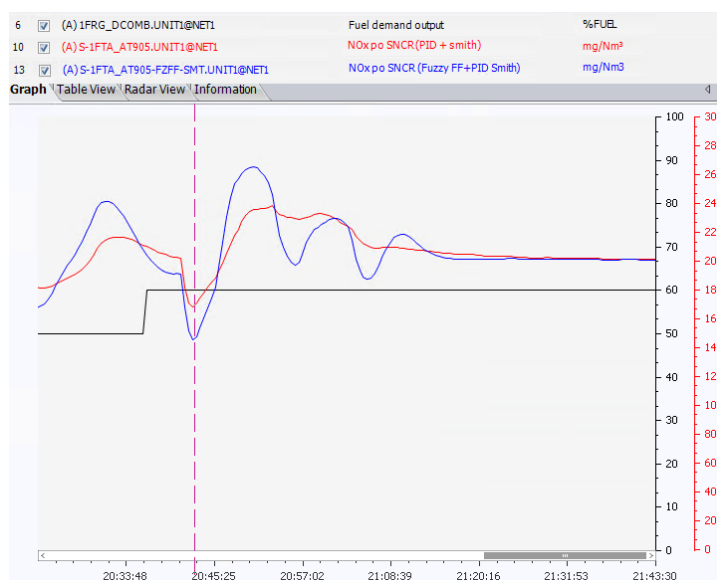
Garų srauto svyravimai (86-58 t/h)	Vidutinis NO _x , per 1h mg/Nm ³	Perreguliavimas, %	Nusistovėjimo laikas (5%), s	Reagento sąnaudos, l
2. PI su Smith prediktoriumi	181	11,9	48 m 13 s	75,24
4. Fuzzy taisyklės su PI ir Smith prediktoriumi	186	12,62	35 m 54 s	73,86

5.4.6. Reakcija į kuro srauto pokytį

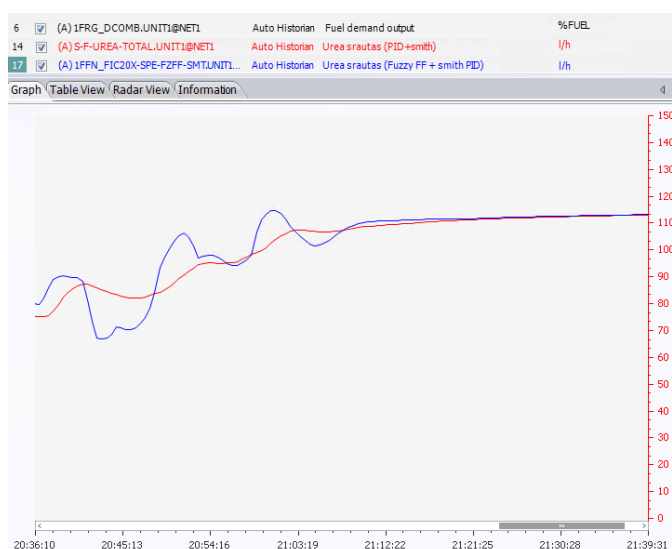
Toliau atliekami eksperimentai keičiant du ir daugiau SNCR procesą įtakojančių parametrus, kaip pavyzdžiui, kuro srautas kuris turi įtakos temperatūrai ir garo srautui. Kaip matome iš grafiko esančio žemiau, pakeitus kuro srauto nuostatą iš 70% į 85%, taip pat kyla katilo temperatūra ir generuojamo garo srautas. Temperatūra pakilo iš 955 °C į 1016 °C, o garo srautas susvyravo ir vėl nusistovėjo ties 81,7 t/h – buvo suvaldytas garo regulatoriaus. Kuo daugiau sudeginama kuro – tuo daugiau energijos išskiriama, todėl kyla temperatūra ir garo srautas.



61 pav. Proceso garo ir temperatūros reakcijos į kuro srauto pokytį (50-60%)



62 pav. NO_x koncentracijos reakcijos į kuro srauto pokytį 50-60%

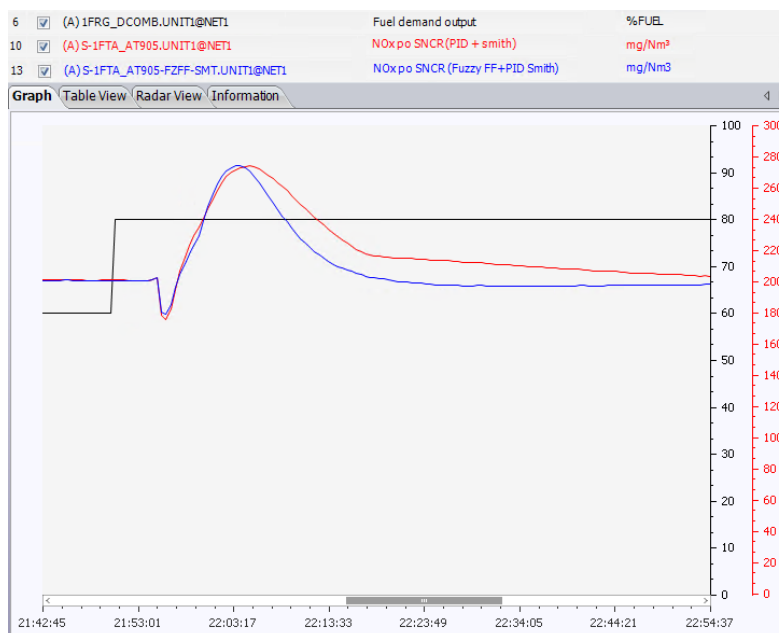


63 pav. Valdymo išėjimas – reagento srautas. Proceso reakcija į kuro srauto nuostatos pokytį 50-60%

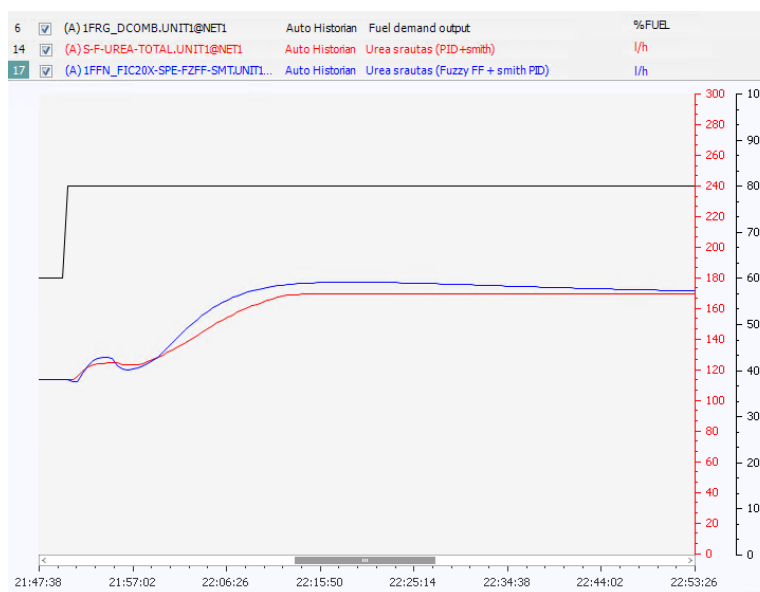
11 lentelė. Reakcijos į kuro srauto pokytį (50-60%) parametrai

Kuro srauto šuolis (50-60 %)	Vidutinis NO _x , per 1h mg/Nm ³	Perreguliavimas, %	Nusistovėjimo laikas (5%), s	Reagento sąnaudos, l
2. PI su Smith prediktoriumi	211	19,3	29 m 46 s	105
4. Fuzzy taisyklės su PI ir Smith prediktoriumi	201	32,8	35 m 21 s	106

Kitas atliekamas bandymas keičiant kuro srautą nuo 60 iki 80 %.



64 pav. NO_x koncentracijos reakcijos į kuro srauto nuostatos pokytį 60-80 %



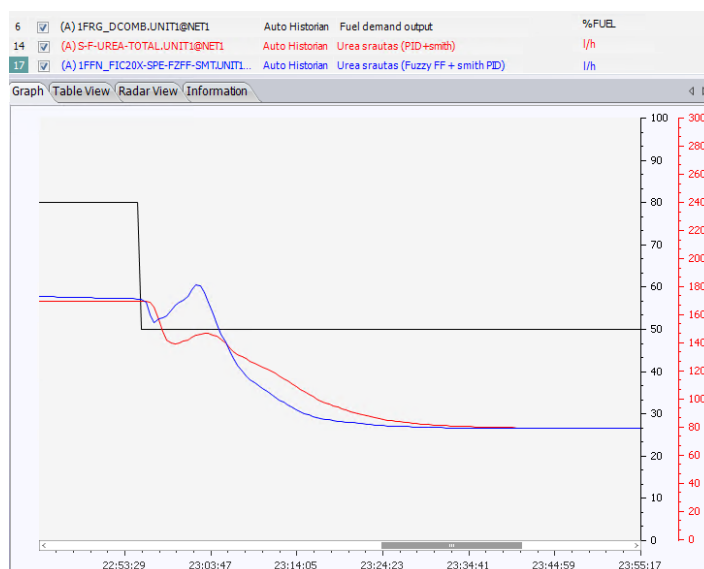
65 pav. Valdymo išėjimas – reagento srautas. Proceso reakcija į kuro srauto nuostatos pokytį 60-80 %

12 lentelė. Reakcijos į kuro srauto pokytį (60-80%) parametrai

Kuro srauto šuolis (60-80 %)	Vidutinis NO _x , per 1h mg/Nm ³	Perreguliavimas, %	Nusistovėjimo laikas (5%), s	Reagento sąnaudos, l
2. PI su Smith prediktoriumi	213	37,06	44 m 19 s	146
4. Fuzzy taisyklės su PI ir Smith prediktoriumi	204	37,23	24 m 24 s	151



66 pav. NO_x koncentracijos reakcijos į kuro srauto nuostatos pokytį 80-50 %



67 pav. Valdymo išėjimas – reagento srautas. Proceso reakcija į kuro srauto nuostatos pokytį 80-50 %

13 lentelė. Reakcijos į kuro srauto pokytį (80-50 %) parametrai

Kuro srauto šuolis (80-50 %)	Vidutinis NO_x, per 1h mg/Nm³	Perreguliavimas, %	Nusistovėjimo laikas (5%), s	Reagento sąnaudos, l
2. PI su Smith prediktoriumi	175	-42,055	36 m 52 s	118,83
4. Fuzzy taisyklės su PI ir Smith prediktoriumi	180	-71,03	26 m 52 s	109,80

Iš proceso reakcijų matyti, jog dauguma atvejų, 4 sistema nusistovi greičiau, nei 2 sistema be *feedforward* fuzzy taisyklių. Taip pat vidutinė NO_x koncentracija 4 valdymo sistemos turi mažesnę paklaidą nuo nuostatos (200 mg/Nm³) taško. Visgi, norint atitikti emisijų koncentracijų reikalavimus ir siekiant efektyviai panaudoti reagentą galima įvesti papildomą PID reguliatorių skirtą reguliuoti tik vidutinę azoto oksidų koncentracijos reikšmę. Tuomet, jei vidutinė nustatyto laiko intervalo koncentracija bus žemesnė už 200, galima mažinti reagento sąnaudas, kol šios priartės prie 200, o tuomet galima palaikyti ir momentinę reikšmę 200. Toks PID reguliatorius pridėtas ir prie tirtos valdymo sistemos, kaip funkcinis blokas *Setpoint Correction* (žr. 5 priedą).

Išvados ir rezultatai

1. Atlikus literatūros analizę išnagrinėta azoto oksidų susidarymo problema ir priežastys, bei sprendimo būdai. Nustatyti reguliavimo metodai taikomi SNCR proceso valdymui: PID reguliatorius, *feedforward* trikdžio valdymas, neraiškios logikos fuzzy valdikliai, Smith prediktorius.
2. Išanalizavus tiriamos jėgainės azoto oksidų emisijų valdymą, vietoje receptinio valdymo parinkta fuzzy taisyklių rinkinį su PI ir Smith prediktoriumi, kuris turi tris jėgimo signalus: garo srautą, temperatūrą ir kuro drėgmę. Sudaryti valdomo proceso matematiniai modeliai: NO_x formavimasis, redukcija, amoniako nuotėkis, kuro drėgmės įtaka biomasės degimo procesui ir ištestuotas proceso imitacinis modelis virtualioje *Ovation DCS* sistemoje.
3. Atlikus bandymus keičiant temperatūrą, garo ir kuro srautus, drėgmę, gauta, jog valdymo sistemos su fuzzy PI ir Smith prediktoriumi NO_x koncentracijos vidurkio vidutinė paklaida nuo nuostatos taško yra 6,61 %, o receptinio valdymo su Smith 8,22%.
4. Iš atliktų bandymų nustatyta, kad keičiant kuro drėgmę ir rūšį, valdymo sistemos su fuzzy taisyklėmis reakcijos laikas vidutiniškai 265 sek. trumpesnis, nei receptinio valdymo.
5. Optimalioms reagento sąnaudoms pasiekti rekomenduojama naudoti NO_x vidurkio valdymo reguliatorių.
6. Gauti rezultatai gali būti naudojami ALGA jėgainės SNCR proceso valdymo tobulinimui ir derinimui.

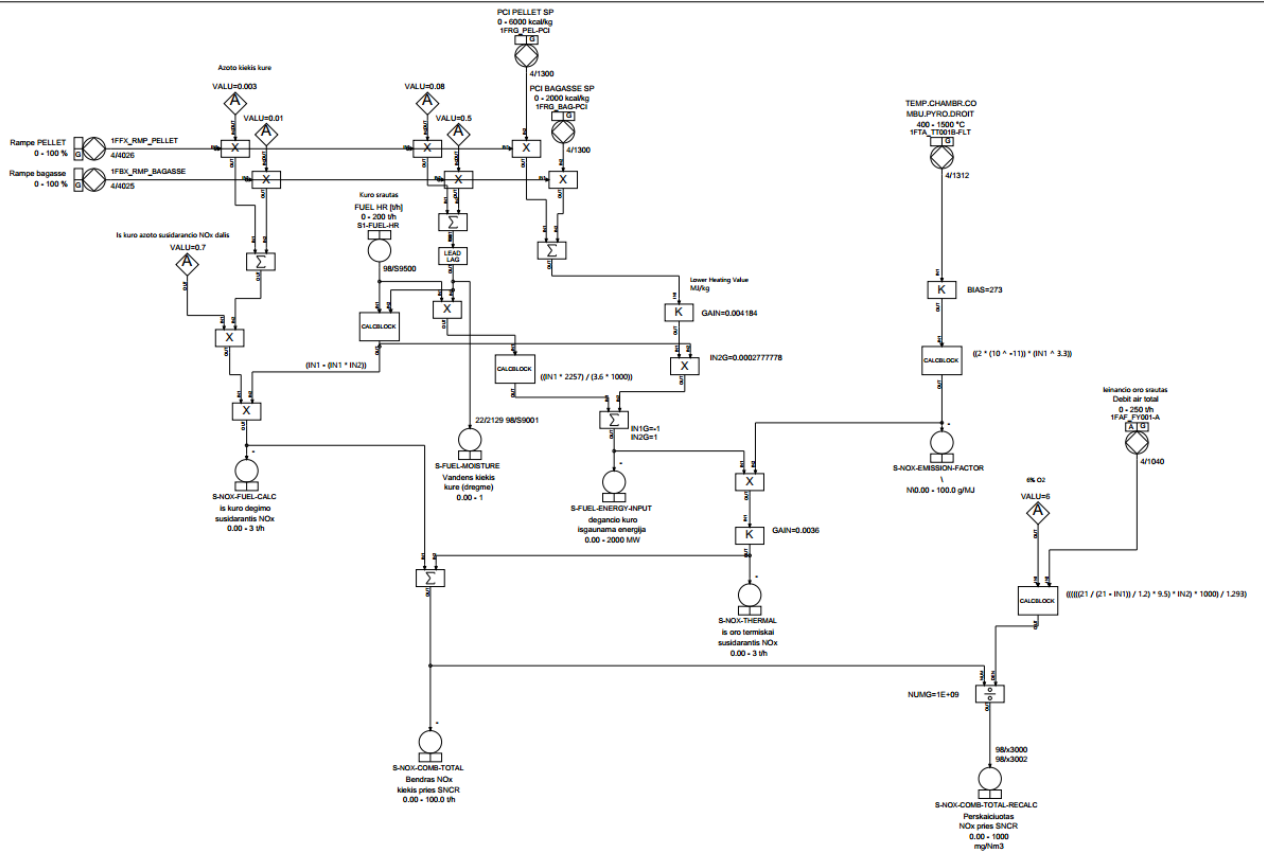
Literatūros sąrašas

1. Thomas Nussbaumer. Overview on Technologies for Biomass Combustion and Emission Levels of Particulate Matter. Switzerland, Zürich, June 2010. Prieiga per internetą: https://skat.ihmc.us/rid=1PV8Z4D92-24JH8TC-2JS7/Nussbaumer_EGTEI-Report_final.pdf
2. „Oxides of nitrogen“, Green Ship of The Future. Prieiga per internetą: <https://greenship.org/about/emission-wiki/oxides-of-nitrogen/>
3. Reducing NOx emissions through Advanced Selective Non-Catalytic Reduction, Aalborg Energie Technik a/s. Prieiga per internetą: <https://knowledge.aet-biomass.com/reducing-nox-emissions-advanced-selective-non-catalytic-reduction>
4. Xing Liu, Houzhang Tan, Yibin Wang, Fuxin Yang, Hrvoje Mikulčić, Milan Vujanović, Neven Duić. Low NOx combustion and SCR flow field optimization in a low volatile coal fired boiler. 2018. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479718305280>
5. „Sources and emissions of air pollutants in Europe — European Environment Agency“. Prieiga per internetą: <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022/sources-and-emissions-of-air> (žiūrėta 2025 m. gegužės 9 d.).
6. Mladenovic, Milica & Paprika, Milijana & Marinkovic, Ana. (2017). Denitrification techniques for biomass combustion. Renewable and Sustainable Energy Reviews.
7. M. Tayyeb Javed, Naseem Irfan, B.M. Gibbs, „Control of combustion-generated nitrogen oxides by selective non-catalytic reduction“, 2007
8. Sedat Polat. SELECTIVE NON-CATALYTIC REDUCTION SYSTEM. 2020. Prieiga per internetą: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1410958/FULLTEXT01.pdf>
9. Dr.-Ing. M.W. Markus Siemens AG Automation & Drives, Hamburg/Germany. Optimisation of the SNCR-DENOX Method Using Diode Laser Spectroscopy
10. Kotze C, The effects of bagasse moisture variations on the performance of a 105tph boiler. 2019
11. Wang, Z.; Yang, X. NOx Formation Mechanism and Emission Prediction in Turbulent Combustion: A Review. Appl. Sci. 2024, 14, 6104. <https://doi.org/10.3390/app14146104>
12. John L. Sorrels. U.S. Environmental Protection Agency. Selective Noncatalytic Reduction. 2019.
13. Maximilian Steiner, Andrés Anca-Couce, „Potential and assessment of urea-based SNCR in a small-scale multi-fuel biomass furnace. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236124020908>
14. U.S. Environmental Protection Agency, NOx controls. EPA/452/B-02-001. Prieiga per internetą: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-07/documents/cs4-2ch1.pdf>
15. Marek Pronobis, Robert Wejkowski, „Simplified method for calculating SNCR system efficiency“, 2016. DOI: 10.1051/71402003.
16. Kaewpradap, Amornrat & Yoksenakul, Wasan & Jugjai, S.. (2013). Effects of Moisture Content in Simulated Bagasse by Equilibrium Analysis.
17. Fabien Can, Xavier Courtois, Daniel Duprez, „NSR–SCR Combined Systems: Production and Use of Ammonia“ I. Nova and E. Tronconi Eds.
18. Urea-SCR technology for DeNOx after treatment of Diesel exhausts, Springer, pp.587-622, 2014.

19. Xuebao Yang, „Influence Study of Ammonia-Nitrogen Molar Ratio on SNCR Denitrification“ 2020 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 615 012122
20. Lukas Böhler, Jürgen Krail, Gregor Görtler, Martin Kozek, „Fuzzy model predictive control for small-scale biomass combustion furnaces“, Applied Energy, Volume 276, 2020.
21. Emissions and energy use in large combustion plants in Europe. European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/emissions-and-energy-use-in> (žiūrėta 2025 m. gegužės 15 d.).
22. O. Vilbikas, Selektivaus katalizinio valymo proceso paskirstytos valdymo sistemos kūrimas ir tyrimas. Kauno technologijos universitetas, 2023.

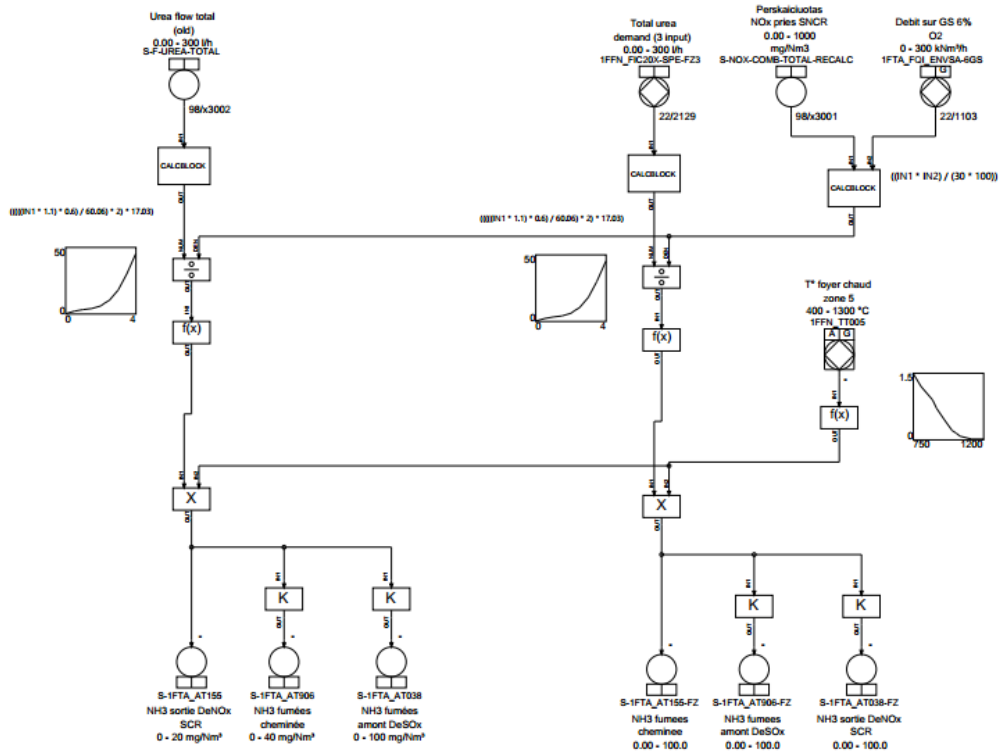
Priedai

1 Priedas. NO_x formavimo imitacinis modelis. *Ovation DCS* programinis kodas

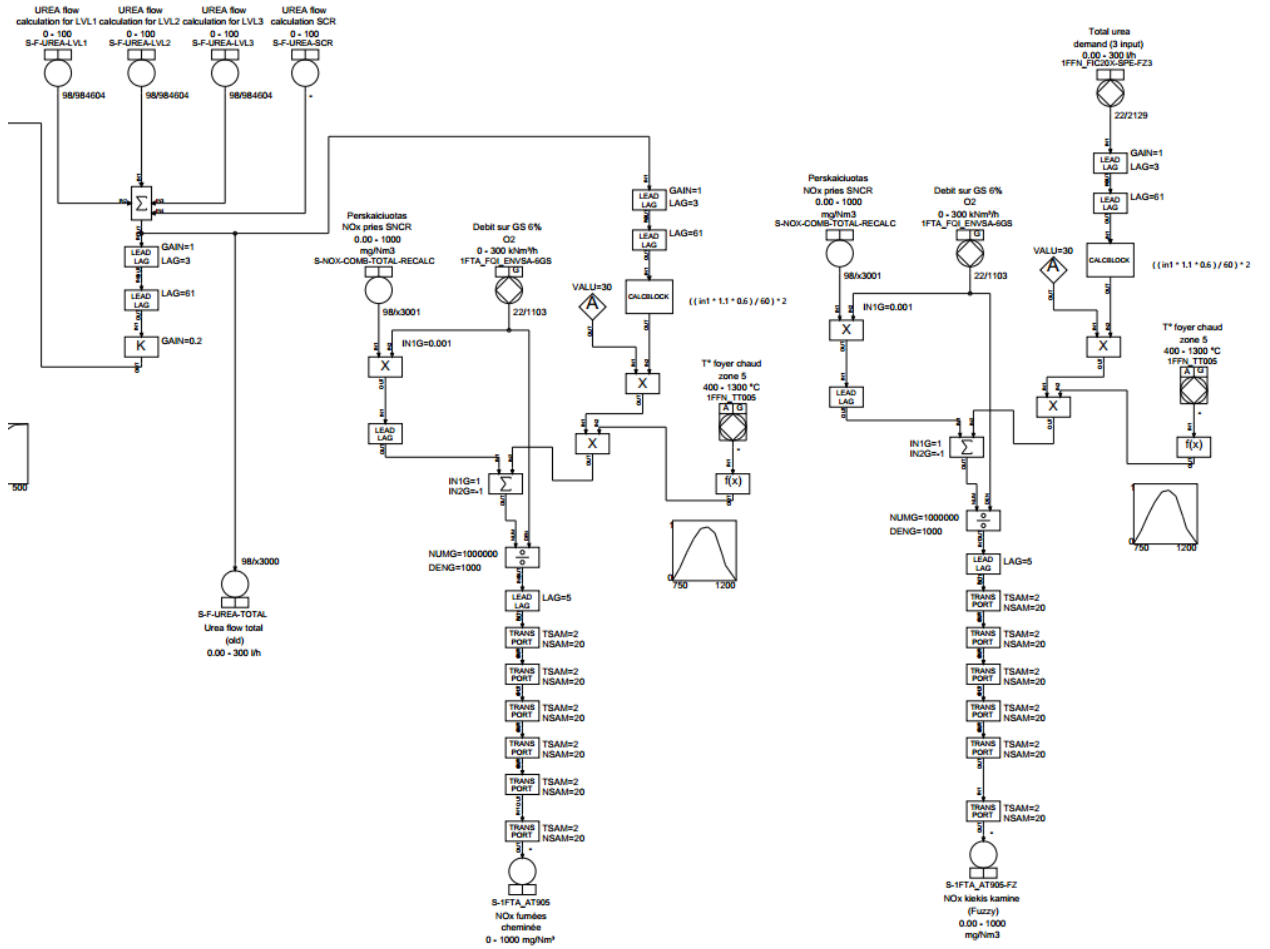


<p>EMERSON PROCESS MANAGEMENT THIS DOCUMENT CONTAINS INFORMATION PROPRIETARY TO EMERSON PROCESS MANAGEMENT POWER & WATER SOLUTIONS, INC. IT IS SUBMITTED IN CONFIDENCE AND TRUST, IS TO BE USED BY YOU SOLELY FOR THE PURPOSES FOR WHICH IT IS</p>	<p>Project Title <Edit in FRAME.SVG> SIM - NO_x formation</p>
--	--

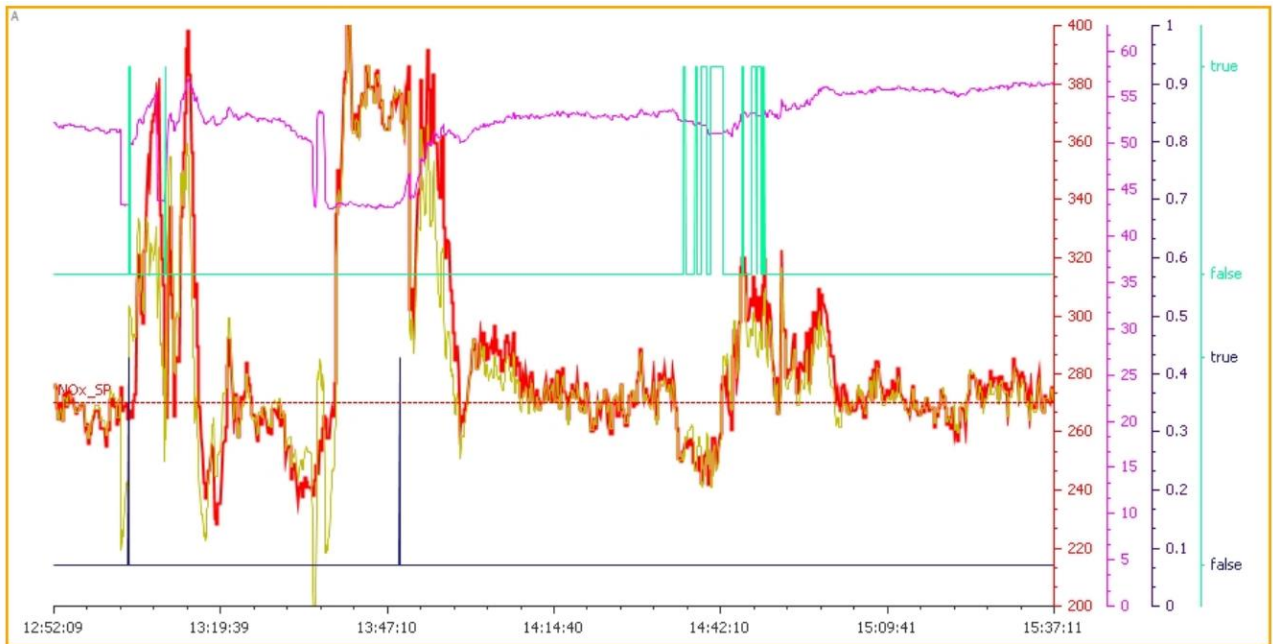
2 Priedas. NH₃ nuotėkio imitacinis modelis. Ovation DCS programinis kodas



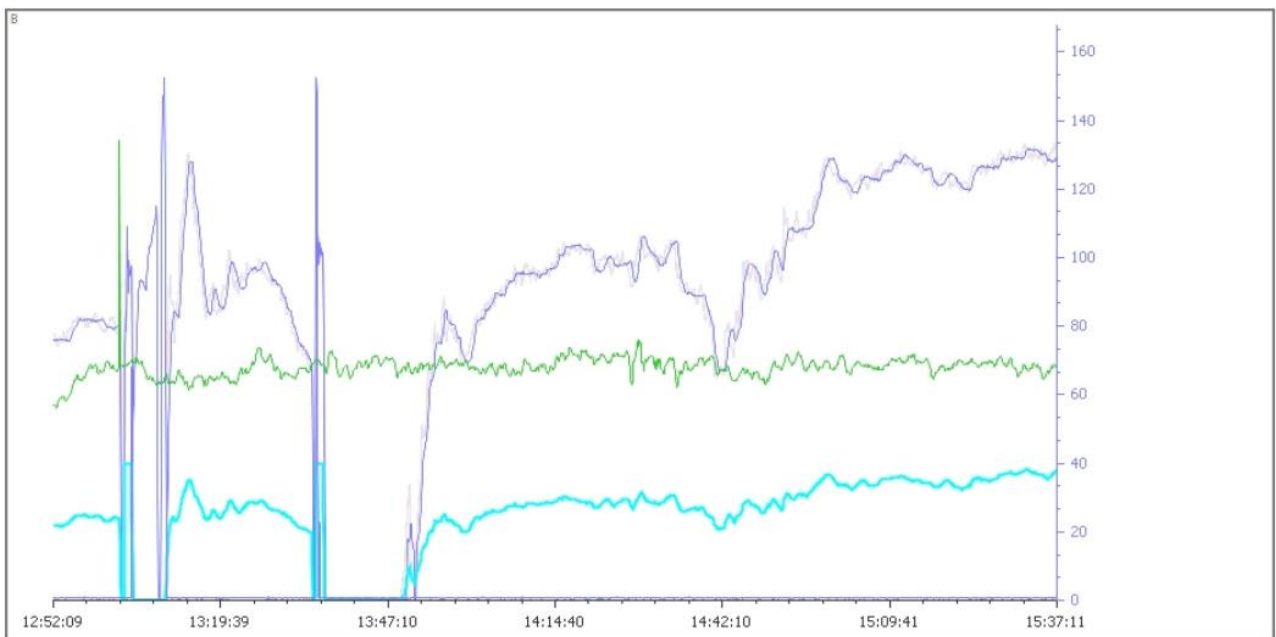
3 Priedas. SNCR imitacinis modelis. Ovation DCS programinis kodas



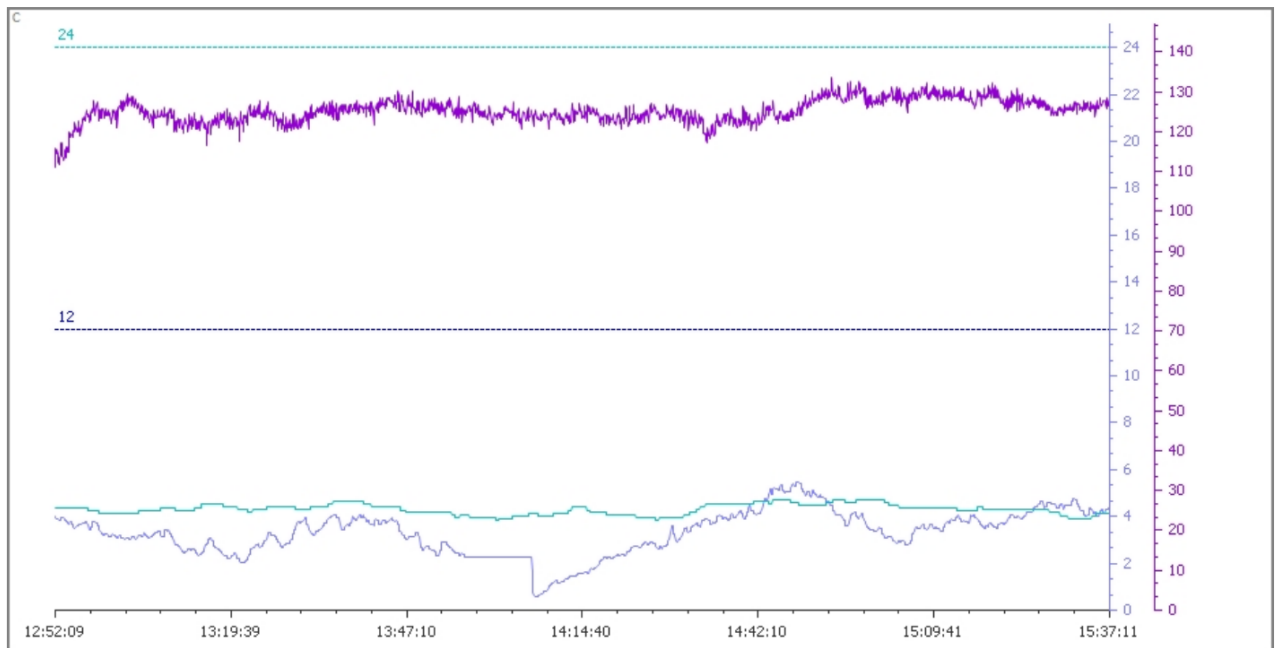
4 Priedas. Istoriniai duomenys iš jėgainės



Point Name	Historian	Processing	Description	End Value	Units	S	Low Scale	High Scale
(A) 1FTA_AT152B.UNIT1@NET1	Auto Historian	Actual	Calc. Concentration NOx	270.538	mg/Nm³	<input checked="" type="checkbox"/>	200	400
(A) 1FTA_AT152B-PREDICT.UNIT1@NET1	Auto Historian	Actual	NOx predicted	271	mg/Nm³	<input checked="" type="checkbox"/>	200	400
(A) 1SNCR_NOX-POUT.UNIT1@NET1	Auto Historian	Actual	Controlleur NOx	56.445		<input checked="" type="checkbox"/>	0	62.731



Point Name	Historian	Processing	Description	End Value	Units	S	Low Scale	High Scale
(B) 1FFN_FIC231-SP.UNIT1@NET1	Auto Historian	Actual	Reduction agent flow P2	131.484		<input checked="" type="checkbox"/>	0	167.694
(B) 1FFN_FIT231.UNIT1@NET1	Auto Historian	Actual	D inj urée liquide SNCR + 15m	129.378	l/h	<input checked="" type="checkbox"/>	0	167.694
(B) 1FFN_FCV231.UNIT1@NET1	Auto Historian	Actual	Vn réglé inj urée SNCR + 15m	37.950	%	<input checked="" type="checkbox"/>	0	167.694
(B) 1FFN_UREA-SPE-RC.UNIT1@NET1	Auto Historian	Actual	UREA flow FF	68.367		<input checked="" type="checkbox"/>	0	167.694



Point Name	Historian	Processing	Description	End Value	Units	S	Low Scale	High Scale
(C) 1FTA_AT038-A-XP02.UNIT1@NET1	Auto Historian	Actual	NH3 fumées amont DeSOx (dg @ 6%O2)	4.343	mg/Nm ³	<input checked="" type="checkbox"/>	0	25
(C) 1FTA_AT906.UNIT1@NET1	Auto Historian	Actual	NH3 fumées cheminée	4.130	mg/Nm ³	<input checked="" type="checkbox"/>	0	25
(C) 1FSR_FY026.UNIT1@NET1	Auto Historian	Actual	Q vapeur corrigé	128.341	t/h	<input checked="" type="checkbox"/>	0	146.922

5 Priedas. NOx regulatoriaus programinis kodas. *Ovation DCS* aplinkoje

