



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

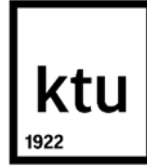
Kietojo biokuro degimo metu vykstančių chemiliuminescencinių reiškinių tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Tadas Aleksandravičius
Projekto autorius

Doc. Nerijus Striūgas
Vadovas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Kietojo biokuro degimo metu vykstančių chemiluminescencinių reiškinių tyrimas

Baigiamasis magistro projektas
Termoinžinerija (6211EX023)

Tadas Aleksandravičius
Projekto autorius

Doc. Nerijus Striūgas
Vadovas

Doc. Egidijus Puida
Recenzentas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Tadas Aleksandravičius

Kietojo biokuro degimo metu vykstančių chemiliuminescencinių reiškinių tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Tado Aleksandravičiaus, baigiamasis projektas tema „Kietojo biokuro degimo metu vykstančių chemiliuminescencinių reiškinių tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

Studijų programa: 6211EX023 Termoinžinerija

MAGISTRO BAIGIAMOJO PROJEKTO UŽDUOTIS

Studentui (-ei)

Tadui Aleksandravičiui

(Vardas, Pavardė)

1. Baigiamojo Projekto tema –

Kietojo biokuro degimo metu vykstančių chemiluminescencinių reiškinių tyrimas

(Lietuvių kalba)

Investigation of Chemiluminescent Phenomena during the Combustion of Solid Biofuels

(Anglų kalba)

2. Darbo tikslas ir uždaviniai –

Susipažinti su darbo temai aktualiais procesais
Sudaryti kietojo biokuro degimo metu vykstančių chemiluminescencinių reiškinių tyrimo metodiką ir aprašyti pasiruošimą bandymams.
Naudojantis Lietuvos energetikos instituto laboratorijoje esančiais įrenginiais ir prietaisais atlikti tyrimą bei aptarti rezultatus.
Suformuoti išvadas.

Studentas

Tadas Aleksandravičius

2020-02-18

(Vardas, Pavardė)

(Parašas)

(Data)

Baigiamojo
projekto vadovas

Nerijus Striūgas

2020-02-18

(Vardas, Pavardė)

(Parašas)

(Data)

Aleksandravičius Tadas. Kietojo biokuro degimo metu vykstančių chemiliuminescencinių reiškinių tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. Nerijus Striūgas; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Energijos inžinerija (E300), Technologijos mokslai (Inžinerija)

Reikšminiai žodžiai: Biokuras, chemiliuminescencija, šarminiai cheminiai elementai, korozija.

Kaunas, 2020. 49 p.

Santrauka

Šiame darbe aptariamas atliktas kietojo biokuro degimo metu vykstančių chemiliuminescencinių reiškinių tyrimas. Darbe taip pat, pateikta literatūros analizė, suformuota tyrimo metodika bei aptarti rezultatai, pateikiamos išvados ir rekomendacijos.

Literatūros apžvalgoje susipažinama su:

- šarminių cheminių elementų, kurie išsiskiria biokuro deginimo metu, sukeliama problemomis ir jų pasekmėmis;
- prie kokių sąlygų išsiskiria šarminiai cheminiai elementai;
- chemiliuminescencijos prasme.

Antrame skyriuje sudaryta tyrimo metodika ir aprašytas bandymams skirtas pasirengimo procesas, t.y. kaip paruošiami mėginiai, kokia įranga naudojama. Šiame skyriuje taip pat aprašoma ir tyrimo eiga.

Trečiame skyriuje pateikiami gauti tyrimo rezultatai, kurie skyriaus gale yra apibendrinami.

Darbo pabaigoje suformuluotos išvados, bei pateikiamos rekomendacijos.

Aleksandravičius Tadas. Investigation of Chemiluminescent Phenomena during the Combustion of Solid Biofuels. Master's Final Degree Project/ supervisor associate professor Nerijus Striūgas; Mechanics and design faculty, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Energy Engineering (E300), Technological Science (Engineering)

Keywords: Biofuel, chemiluminescence, alkaline species, corrosion.

Kaunas, 2020. 49.

Summary

This document contains discussion of investigation of chemiluminescence phenomenon during biomass consumption. This paper also includes, literature analysis, preparation for investigation and results.

Literature analysis includes:

- Problems caused by alkaline species which distinguish during biomass consumption;
- Characteristics when alkaline species are detected in this process;
- Explanation of chemiluminescence meaning.

In second chapter description of investigation have been made and preparations explained: how samples are made, what equipment are used in research.

Third chapter includes results, which are summarized in this section end.

At the end of the paper the conclusions, recommendations, reference and enclosure are presented.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Įvadas	11
1 Literatūros analizė.....	13
2 Pasiruošimas tyrimui.....	21
2.1 Mėginiai	21
2.2 Įranga ir pasiruošimas	22
2.2.1 Įranga	22
2.2.2 Pasiruošimas	23
2.2.3 Tyrimo eiga.....	25
3 Rezultatai.....	26
3.1 Biokuro cheminė elementų sudėtis	26
3.2 Tyrimų rezultatų aiškinimas	26
3.3 Tyrimų rezultatai	26
3.3.1 Bandymai su mediena	26
3.3.1.1 Neplautos medienos tyrimų rezultatai	26
3.3.1.2 Išplautos medienos tyrimų rezultatai	28
3.3.1.3 Medienos prisotintos kalciumu tyrimų rezultatai	29
3.3.1.4 Medienos prisotintos kaliumu tyrimų rezultatai	31
3.3.1.5 Medienos prisotintos natriu tyrimų rezultatai	33
3.3.2 Bandymai su šiaudais.....	34
3.3.2.1 Neplautų šiaudų tyrimų rezultatai.....	34
3.3.2.2 Išplautų šiaudų tyrimų rezultatai	36
3.3.2.3 Šiaudų prisotintų kalciumu tyrimų rezultatai.....	37
3.3.2.4 Šiaudų prisotintų kaliumu tyrimų rezultatai	39
3.3.2.5 Šiaudų prisotintų natriu tyrimų rezultatai	40
3.4 Rezultatų apibendrinimas	42
4 Išvados	45
5 Rekomendacijos	46
Literatūros sąrašas	47
Priedai	49

Lentelių sąrašas

1 lentelė. 3 skirtingų rūšių biokuro sudėties palyginimas (sausos masės).....	14
2 lentelė. 3 skirtingų rūšių biokuro mažesnės koncentracijos cheminių elementų (K, Na, Cl) sudėtyje palyginimas (sausos masės).....	15
3 lentelė. Emisijos rezultatai ir katilo parametrai atliktų obels medienos, eglės traškučių ir kukurūzų biokuro tyrimų metu (15 tyrimų kiekvienam iš biokuro išteklių).	15
4 lentelė. Kviečių šiaudų ir pušies žievės pelenų cheminė elementų sudėtis (%) [9]	18
5 lentelė. Tiriamojo biokuro (medienos ir šiaudų) cheminė elementų sudėtis prieš valymą ir po valymo.	26

Paveikslų sąrašas

1 pav. Atliekų deginimo krosnis (20 MW): degimo sekimas ir kontrolė lazerio diodo absorbcijos O ₂ ir H ₂ O metodu.....	14
2 pav. Kalio junginių išskyrimo mechanizmų iliustracija	16
3 pav. Biokuro mėginių (kviečių, ryžių, miežių) cheminių elementų a) Kalio (K) ir b) Chloro (Cl) išskyrimas (%) į dujinę būseną prie skirtingų temperatūrų.	17
4 pav. Biokuro mėginių (rapsų, avižų, bastutis) cheminių elementų a) Kalio (K) ir a) Chloro (Cl) išskyrimas (%) į dujinę būseną prie skirtingų temperatūrų.	17
5 pav. Biokuro mėginių a) kviečių, ryžių, miežių ir b) rapsų, avižų, bastutis cheminio elemento Sieros (S) išskyrimas (%) į dujinę būseną prie skirtingų temperatūrų.	18
6 pav. Susidariusių šlakų (pradedant nuo kairės pusės viršaus) ir korozijos (paskutinis paveikslas) deginant biokurą pavyzdžiai.....	19
7 pav. Chloro, Kalio ir Sieros emisijos spektrai	19
8 pav. Chemiliuminescencijos galimos reakcijos : (A) substratas; (B) oksidantas, (P) produktas, (P*) produktas sužadintoje būsenoje; (F) fluoroforas; (F*) fluoroforas sužadintoje būsenoje; (hv) radiacijos emisija.	20
9 pav. Mėginio svėrimas ir suspaudimas.....	21
10 pav. Tyrimo stovas su termopora ir degiklis	22
11 pav. Pico TC-08 prietaisas a) ir PLW recorder programa b).....	22
12 pav. Andor iStar ICCD kamera su stovu ir detektoriumi	23
13 pav. Tyrimo stendo principinė schema.....	23
14 pav. Bandymas skirtas sukalibruoti ICCD kamerą.....	24
15 pav. Andor Solis programos parametrai tyrimui.	24
16 pav. Tyrimo metu fiksuojami rezultatai „Andor Solis for time revolved ICCD-4031“ programoje.	25
17 pav. Neplautos medienos kalcio filtro bandymų rezultatai	27
18 pav. Neplautos medienos kalio filtro bandymų rezultatai	27
19 pav. Neplautos medienos natrio filtro bandymų rezultatai.....	28
20 pav. Išplautos medienos kalcio filtro bandymų rezultatai	28
21 pav. Išplautos medienos kalio filtro bandymų rezultatai.....	29
22 pav. Išplautos medienos natrio filtro bandymų rezultatai.....	29

23 pav. Medienos, prisotintos 0,5 proc. kalciu, bandymų rezultatai	30
24 pav. Medienos, prisotintos 2 proc. kalciu, bandymų rezultatai	30
25 pav. Medienos, prisotintos 5 proc. kalciu, bandymų rezultatai	31
26 pav. Medienos, prisotintos 0,5 proc. kaliu, bandymų rezultatai	31
27 pav. Medienos, prisotintos 2 proc. kaliu, bandymų rezultatai	32
28 pav. Medienos, prisotintos 5 proc. kaliu, bandymų rezultatai	32
29 pav. Medienos, prisotintos 0,5 proc. natriu, bandymų rezultatai.....	33
30 pav. Medienos, prisotintos 2 proc. natriu, bandymų rezultatai.....	34
31 pav. Medienos, prisotintos 5 proc. natriu, bandymų rezultatai.....	34
32 pav. Neplautų šiaudų kalcio filtro bandymų rezultatai.....	35
33 pav. Neplautų šiaudų kalio filtro bandymų rezultatai.....	35
34 pav. Neplautų šiaudų natrio filtro bandymų rezultatai	36
35 pav. Išplautų šiaudų kalcio filtro bandymų rezultatai	36
36 pav. Išplautų šiaudų kalio filtro bandymų rezultatai	37
37 pav. Išplautų šiaudų natrio filtro bandymų rezultatai	37
38 pav. Šiaudų, prisotintų 0,5 proc. kalciu, bandymų rezultatai	38
39 pav. Šiaudų, prisotintų 2 proc. kalciu, bandymų rezultatai	38
40 pav. Šiaudų, prisotintų 5 proc. kalciu, bandymų rezultatai	39
41 pav. Šiaudų, prisotintų 0,5 proc. kaliu, bandymų rezultatai	39
42 pav. Šiaudų, prisotintų 2 proc. kaliu, bandymų rezultatai	40
43 pav. Šiaudų, prisotintų 5 proc. kaliu, bandymų rezultatai	40
44 pav. Šiaudų, prisotintų 0,5 proc. natriu, bandymų rezultatai.....	41
45 pav. Šiaudų, prisotintų 2 proc. natriu, bandymų rezultatai.....	41
46 pav. Šiaudų, prisotintų 5 proc. natriu, bandymų rezultatai.....	42
47 pav. ICCD kameros rekomenduojama vieta katile.....	46

Įvadas

Biomasė yra potencialus energijos šaltinis, galintis pakeisti iškastinį kūrą. Biokuras vertinamas dėl aplinkosaugos, mažo anglies dvideginio išsiskyrimo ir taip pat yra priskiriamas prie atsinaujinančių energijos išteklių.

Anglies dvideginio išsiskyrimas išlieka nors ir plačiai ribojama, bet vis dar didelė problema, dėl jo sukuriama šiltnamio efekto ir įtakos klimato kaitai žemėje.

Taip pat naudojant biomasę energijos sukūrimui susiduriama su tokiomis problemomis kaip šlakų išsiskyrimas, katilų užteršimas bei metalo korozijos sukėlimas. Pastaroji problema atsiranda dėl didesnės kalcio, kalio, natrio bei kitų elementų koncentracijos biokure. Šarminiai elementai išskiriami vykstant terminėms reakcijoms išgarinimo metu. Sukurti dujiniai elementai gali dalyvauti toliau reakcijose arba įvykus fizinei transformacijai susikondensuoti pelenuose arba suformuoti aerozolių, kurie vykstant tolimesnėms reakcijoms nusėsti ant paviršių ir sukelti metalų reakcijas, dėl kurių atsiranda korozija.

Pagrindiniai šarminiai elementai, kurie išsiskiria deginant kietąjį biokūrą ir nusėda ant katilo vidinių sienelių yra kalis, chloras ir siera. Šių elementų išsiskyrimas į dujinę būseną degimo metu yra skirtingas, kadangi jų kiekiais išsiskiria prie skirtingų temperatūrų. Todėl sekant šių elementų išsiskiriančius kiekius, galima optimizuoti degimo kameroje vykstančius procesus taip, kad tarša katile nebūtų tokia didelė.

Tokiam parametrų sekimui ir degimo procesų optimizavimui pasitelkiamas chemiliuminescencijos tyrimas. Chemiliuminescencija tai procesas, kai vykstant cheminėms ar biocheminėms reakcijoms išskiriamas fotonas, kuris pasireiškia tam tikrame bangos ilgyje ir išskiria šviesą, o kadangi skirtingų cheminių elementų jis išskiriamas skirtingame bangos ilgyje, tai ir išskirtos šviesos spalva yra kitokia. Atliekant tyrimus, žinant kokiam bangos ilgyje pasirodo cheminio elemento išskirtas fotonas ir stebint liepsną galima nustatyti prie kokių parametrų išskiriamas cheminis elementas.

Temos aktualumas :

Didėjant reikalavimams dėl emisijų mažinimo ir didesnio energijos išgavimo iš biokuro, daugėja biokuro katilinių. Tačiau visi energijos išgavimo prietaisai dėvisi ir jų ilgaamžiškumas priklauso nuo to, kaip šie eksploatuojami ir prižiūrimi. Tam, kad prailginti biokuro katilinių darbo laiką ar sumažinti išlaidas remontams, svarbu žinoti, kokios cheminės reakcijos vyksta degimo metu katilo viduje ir kokią žalą gali padaryti šarminiai metalai katilo konstrukcijoms. O taip pat ir atrasti būdų, kaip sumažinti cheminių elementų sukeliamas problemas.

Temos išskirtinumas :

Dauguma tyrimų susijusių su projekto tema atlikti atsižvelgiant į galimybę išskirti cheminiams elementams prie tam tikrų temperatūrų. Taip pat, dauguma tyrimų atlikti su kitų rūšių kuru. Tačiau šarminių elementų, kurie išsiskiria deginant kietąjį biokūrą, intensyvumo ir priklausomybių nuo šių cheminių elementų koncentracijos biokure tyrimų atlikta mažai.

Darbo tikslas :

Atlikti kietojo biokuro degimo metu vykstančių chemiliuminescencinių reiškinių tyrimą ir nustatyti išsiskiriančių cheminių elementų (kalcio, kalio ir natrio) intensyvumą.

Tyrimo objektas : kietojo biokuro degimo metu vykstantys chemiluminescenciniai reiškiniai.

Darbo uždaviniai :

- Susipažinti su darbo temai aktualiais procesais
- Sudaryti tyrimo metodiką bei pasirengimą bandymams
- Atlikti bandymus su šiaudų ir medienos mėginiais (neišplauti, išplauti mėginiai bei 0,5, 2 ir 5 proc. kalcio, kalio ir natrio koncentracijomis)
- Aptarti rezultatus
- Suformuoti išvadas
- Pateikti rekomendacijas

1 Literatūros analizė

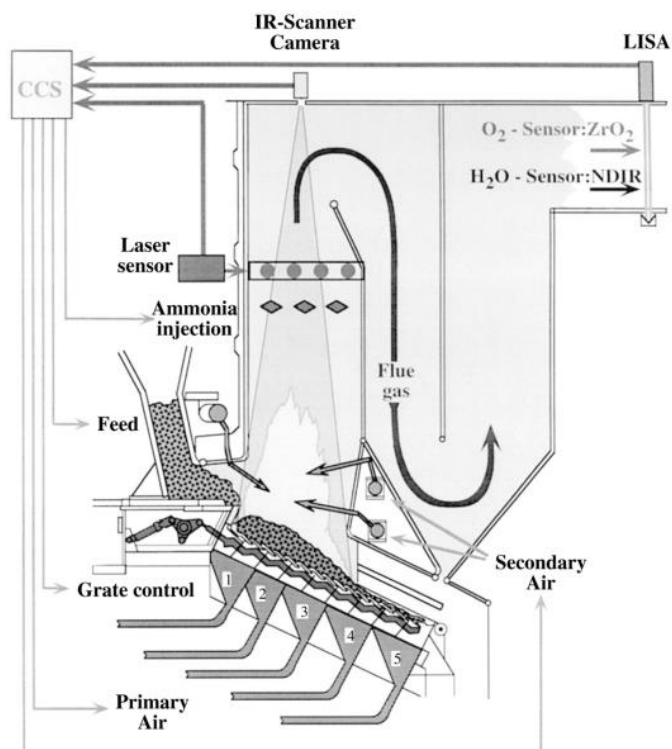
Biokuras – tai augalų (žemės ūkio augalai, medžiai, kiti augalai) organinių medžiagų kombinacija, kuri susidaro augalams pūvant arba iš atliekų (pvz. medžio skiedra). Augalams reikalinga anglis, o ši gaunama iš atmosferos, tik ne tiesiogiai, o anglies dioksido (CO₂) pavidalu. Anglies elementą augalai paverčia savąja mase, naudodami saulės energiją. Augalus gali naikinti gyvūnai, tačiau likusi dalis augalijos, atėjus laikui, kai nebegali gauti vandens ir kitų mineralų iš dirvožemio (pvz. nulūžta, nukertama, nuraunama), išskleidžia anglį atgal į atmosferą, pagrinde kaip anglies dioksidą (CO₂) arba metaną (CH₄) priklausomai, kaip augalas yra naikinamas, ar vyksta puvimo reakcija (išgaunamas metanas) ar biomasės deginimas (sukuriamas anglies dioksidas su degimo produktais) [1].

Degimo metu jo nekontroliuojant išskiriama daug žalingų medžiagų, kurios neigiamai veikia katilo ilgaamžiškumą, užsinešimą šlakais, o taip pat ir išskiriami žalingi produktai, kurie išmeta į aplinką su dūmais, būtina sekti degimo procesą ir jį optimizuoti norint išvengti padarytos žalos. Dažniausiai degimo procesui sekti naudojami degimo kontrolės sensoriai, tačiau dar nėra sukurta tokių sensorių, kurie padėtų nuolat sekti visus išskiriamus produktus ir parametrus. Pagrindiniai parametrai tokie kaip oro pertekliaus koeficientas (sekamas tam, kad efektyviai išnaudoti kuro pilną sudegimą), temperatūros ir kiti paprastai sekami parametrai turi išstobulintas technologijas [2], kartais net ir automatizuotas, kurios leidžia sekti ir valdyti parametrus taip, kaip norima. Tačiau žiūrint į taršos parametrus technologijos nėra taip toli pasiekusios, bet vykdoma vis daugiau tyrimų kuro degimo kontrolės ir optimizavimo atžvilgiu.

Pagrinde praktikoje bandoma kontroliuoti degimo procesus atvirame cikle be grįžtamosios informacijos degimo sistemai. Tačiau tai sukelia procesų vykstančių uždarame cikle optimizavimo problemą, o šių procesų nekontroliavimas gali sukelti didelių problemų. Kaip anksčiau minėta yra sukurta automatizuotų sistemų, kurios vykdo sekimą uždarame cikle ir kartu su sensorių, kurie seka išeinančių dūmų parametrus, pagalba pasiektas žymus NO_x emisijos sumažinimas. Galima pastebėti, kad sensoriai yra kritinė sistemos dalis degimo kontrolei ir sekimui.

Degimo kontroliavimas gali būti dviejų tipų : darbinio taško kontrolė ir aktyvaus degimo kontrolė. Pastarojo degimo pagrindinis tikslas kontroliuoti degimo nestabilumą. Įvairiais bandymais pasiekti geri rezultatai, daugiausia tai yra mažos galios ir kuro kiekio eksperimentai, laminarinės liepsnos degikliai, turbulentiniai degimai. Tačiau didelės apimties pritaikymo pavyzdžių mažai.

Darbinio taško kontrolė apima visų degimo įrenginių, kurie yra sukurti, darbo sekimą ir parametru bei emisijos optimizavimą. 1 paveikslėlyje pavaizduotas atliekų deginimo įrenginys, kuriame degimo procesas sekamas ir kontroliuojamas O₂ ir H₂O lazerio diodo absorbcijos principu. Paveikslėlyje atvaizduota degimo procesas, kurio metu 3 skirtingi lazeriniai sensoriai matuoja išeinančių degimo produktų parametrus, charakteristikas, jas siunčia į degimo kontrolės sistemos bloką, o šis pagal gautus rezultatus reguliuoja : kuro padavimą, oro padavimą bei amoniako inžektavimą.



1 pav. Atliekų deginimo krosnis (20 MW): degimo sekimas ir kontrolė lazerio diodo absorbcijos O₂ ir H₂O metodu.

Biokurą suskirstyti į kategorijas yra sunku, tačiau pagrindė naudojamos 3 biomasės kategorijos : paprastasis biomasės kuras (žemės ūkio resursai, medžio resursai), biomasės atliekos (žemės ūkio atliekos, medžio atliekos tokios kaip skiedros ar pjuvenos, maisto atliekos) ir sodinių biokuras (eukalipto resursai, tuopos mediena, gluosnio mediena, javai/grūdai ir kita).

Biokuro sudėtis priklauso nuo biokuro rūšies. Pagrindiniai elementai biokuro sudėtyje yra anglis (C), vandenilis (H), azotas (N), siera (S) ir deguonis (O). Tačiau priklausomai nuo rūšies randama ir kitų cheminių elementų, tokių kaip : kalis (K), natrius (Na), kalcis (Ca), silicis (Si), magnis (Mg), geležis (Fe) ir Fosforas (P). Mažesniais kiekiais randama ir chloro (Cl), fluorino (F), chromo (Cr), vario (Cu), mangano (Mn), nikelio (Ni), švino (Pb) ir cinko (Zn). Kaip anksčiau minėta biokuro elementų koncentracija priklauso nuo biokuro rūšies, 1 lentelėje pateikiamas kelių skirtingų biokuro rūšių pagrindinių elementų sudėties palyginimas. Taip pat 2 lentelėje pateikiamas tų pačių biokuro rūšių kitų cheminių elementų kiekis kure [3].

1 lentelė. 3 skirtingų rūšių biokuro sudėties palyginimas (sausos masės).

Biokuro rūšis	Anglis (C), %	Deguonis (O), %	Vandenilis (H), %	Azotas (N), %	Siera (S), %	Pelenai, %
Kviečių šiaudai	47,30	41,49	5,87	0,58	0,07	4,27
Pušies žievė	53,9	38,26	5,80	0,40	0,03	1,60
Durpės	51,2	39,48	5,60	0,90	0,10	2,70

2 lentelė. 3 skirtingų rūšių biokuro mažesnės koncentracijos cheminių elementų (K, Na, Cl) sudėtyje palyginimas (sausos masės).

Biokuro rūšis	Kalis (K), mg/kg	Natris (Na), mg/kg	Chloras (Cl), mg/kg
Kviečių šiaudai	5480	140	1710
Pušies žievė	1120	50	110
Durpės	690	380	180

Pirmiausia biokuro problema, kaip ir su dauguma energijai kurti naudojamų kitų kūrų, yra Anglies dvideginio išsiskyrimas ir jo poveikis gamtai. Nors biokuras priskiriamas prie mažai anglies dvideginio išsiskiriančių išteklių, tačiau vis tiek šio kuro degimo produktuose randama gamtai kenkiančių medžiagų. Pagal atliktus tyrimus [4] iš kietojo biokuro skirtingų išteklių (obels, eglės traškučių, kukurūzų biokuras) CO₂ emisijos (iš kiekvienam ištekliui atliktų 15 tyrimų) rezultatai pateikti 1 lentelėje. Taip pat tyrimų metu nustatyti išmetamuose dūmuose esančių CO, NO bei NO_x teršalų vidutiniai kiekiai, jie pateikti 3 lentelėje.

3 lentelė. Emisijos rezultatai ir katilo parametrai atliktų obels medienos, eglės traškučių ir kukurūzų biokuro tyrimų metu (15 tyrimų kiekvienam iš biokuro išteklių).

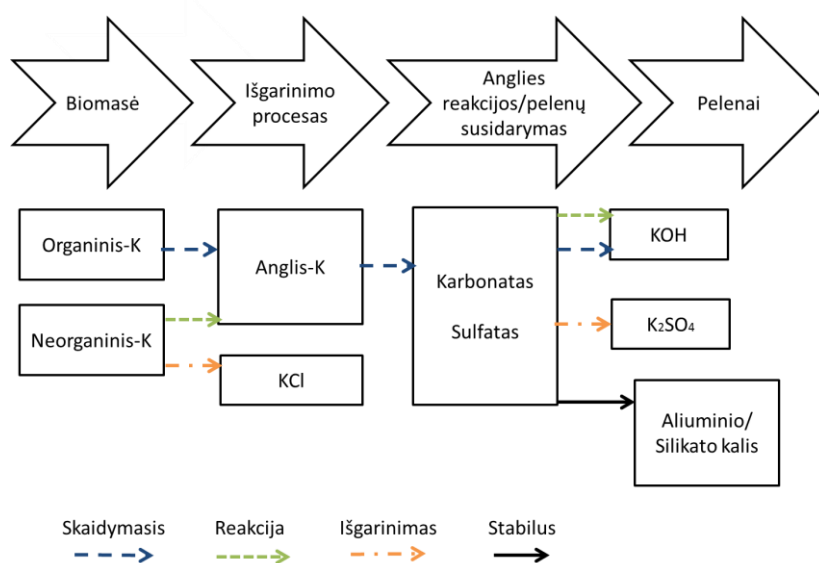
Biokuro išteklius	Emisijos koncentracijos				Oro perteklius	Katilo naudingumas, %	Paduodamo oro temperatūra, °C	Degimo produktų temperatūra, °C
	CO, mg/m ³	CO ₂ , %	NO, mg/m ³	NO _x , mg/m ³				
Obels mediena	482,73	4,89	70,22	114,66	4,19	66,33	20,12	280,36
Eglės skiedra	334,72	6,02	96,45	157,17	3,42	72,33	24,9	263,37
Kukurūzų biokuras	650,18	1,41	30,98	50,16	2,45	73,87	25,79	149,29

Tyrinėjant biokurą daug dėmesio atkreipiama į jo terminį skaidymąsi ir neorganinių elementų (S, Cl, K, Na, Zn ir Pb) išskyrimą [5]. Eksperimentų daroma vis daugiau ir su skirtingomis degimo charakteristikomis. Dažniausiai su mažu arba dideliu šilumos srautu ir mažo tūrio mėginiais.

Šarminiai metalai biokure pagrinde randami trejose formose : organinėje formoje, neorganinėse druskose (pvz. KCl, K₂SO₄) ir mineralų formoje (pvz. K₂O₃Si). Mineralų formavimosi atveju kalio išsiskyrimas terminių reakcijų metu [6] yra laikomas stabiliu ir pastoviu, todėl mokslininkai pagrinde tiria kalio išsiskyrimą organinėje ir neorganinėje formose. Eksperimento metu nustatyta, kad tik mažas kiekis kalio išsiskiria ankstyvoje garavimo stadijoje. Vykstant intensyvesniam elementų išsiskyrimui kalis randamas KCl junginyje, rečiau ir mažiau randama KOH junginių. Pastarojo išsiskyrimas suintensyvėja anglies išdegimo stadijoje.

Biokuro degimas yra pirminė pirolizės reakcija, kurios metu išgarinami skysčiai, išskiriamos dujos, o po pirminės pirolizės likusi anglis oksiduojasi iki visiško sudegimo stadijos. Kalio išskyrimas

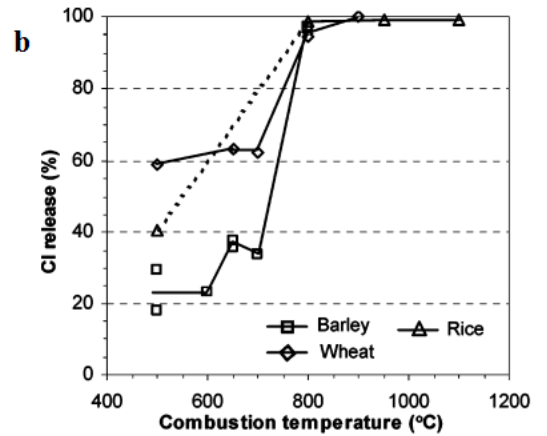
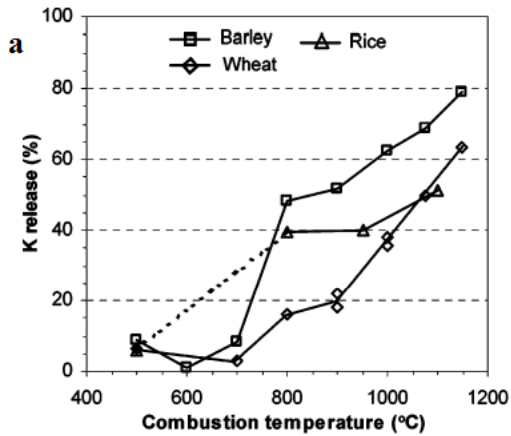
biomasės pirolizės metu garo pavidale vyksta 2 etapais [4]. Pirmasis etapas pasireiškia tarp 473 K ir 773 K temperatūrų, kurio metu kalio išsiskyrimas vyksta kartu su kitų dujų išgarinimu ir yra nepriklausomas nuo biokure esančio chloro kiekio. Pirmojo pirolizės etapo metu, prie mažos temperatūros, išskiriamas organinis kalis. Kai temperatūra pasiekia ir viršija 773 K, prasideda antrasis pirolizės etapas, kurio metu išskiriamas kalis labai priklauso nuo biokuro chloro koncentracijos ir išskiriamas neorganinis kalis (KCl ir KOH junginiuose) garų pavidale (2 pav.). 2 paveikslėlyje atvaizduoti kalio junginių, iš biokuro, išskyrimo reakcijų mechanizmai kai biomasė mažai chloruota. Šie mechanizmai parodo, kaip pirolizės metu neorganiniai kalio junginiai dalinai išskiriami dujinėje fazėje KCl forma, o likusi dalis neorganinių kalio junginių ir organiniai kalio junginiai išlieka junginyje su anglimi. Kai pradeda vykti pelenų susidarymas, anglis reaguoja su CO₂, O₂ bei H₂O ir susidaro karbonatai, sulfatai ir silikatai. Reaguojant karbonatui su O₂ ir H₂O susidaro gariniai kalio junginiai KOH formoje. O išgarinimo proceso metu iš sulfatų susidaro K₂SO₄. Likęs kalis lieka pelenuose.



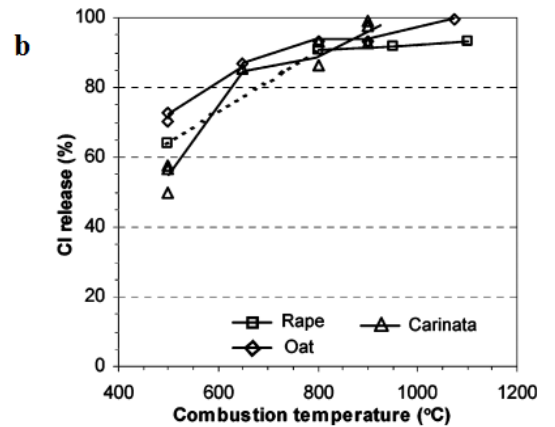
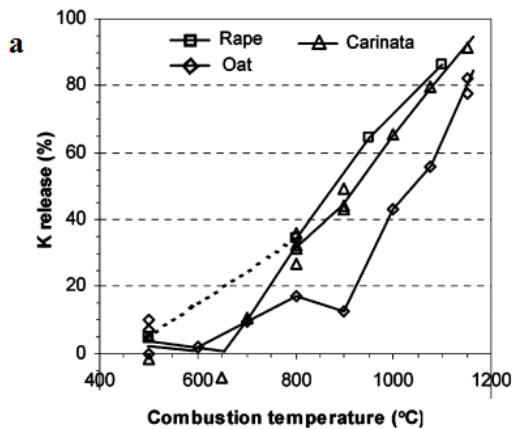
2 pav. Kalio junginių išskyrimo mechanizmų iliustracija

Pagrindiniai šarminiai elementai, išsiskiriantys deginant kietąjį biokurą ir katilo vidines sienes, yra kalis (K), chloras (Cl) ir siera (S). Remiantis tyrimais [7], kai skirtingų biokurų mėginiai buvo deginami kintant temperatūrai nuo 500 iki 1150 °C, nustatyti šių elementų procentiniai išsiskyrimai. Tyrimais nustatyta, kad kalio išsiskyrimas yra itin mažas (iki 10 %) kai temperatūra katile mažesnė nei 700 °C. Biokuro mėginiuose, kurie turi daug chloro, kalio didžioji dalis (40-50%) išsiskiria prie 800 °C, prie tos pačios temperatūros biokure, kuris turi mažiau chloro, išsiskiria tik 20% kalio (3 pav.). Didinant temperatūrą nuo 800 iki 1150 °C pastebimai (3 pav.) pradeda kilti kalio išskyrimas į dujinę būseną. Mažiau chloro turinčiuose mėginiuose kalio išskyrimas į dujinę būseną pasiekia, net iki 95%, o daugiau chloro turinčiuose mėginiuose kalis išskiriamas tik iki 80 %.

Chloro išsiskyrimas taip pat pasireiškia dviem skirtingais būdais. Priklausomai nuo kuro daugiau chloro turinčiuose junginiuose (3 pav.) tik iki 60 % chloro išsiskiria iki 500 °C, o likusi dalis išsiskiria tarp 700 ir 800 °C temperatūros. Mažiau chloro turinčiuose mėginiuose (4 pav.) chloro didesnė dalis (iki 80%) išsiskiria prie 500 °C, prie 800 °C temperatūros chloro išsiskiriama apie 90%, o likusi dalis išskiriama iki 1150 °C temperatūros. Iš abiejų grafikų galima pastebėti, kad chloras beveik pilnai išskiriamas iki 800 °C temperatūros visiems mėginiams.

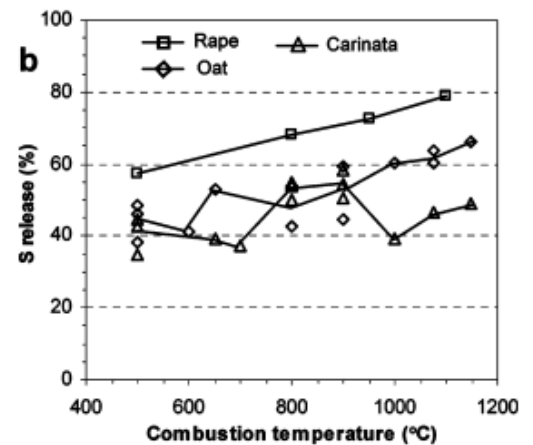
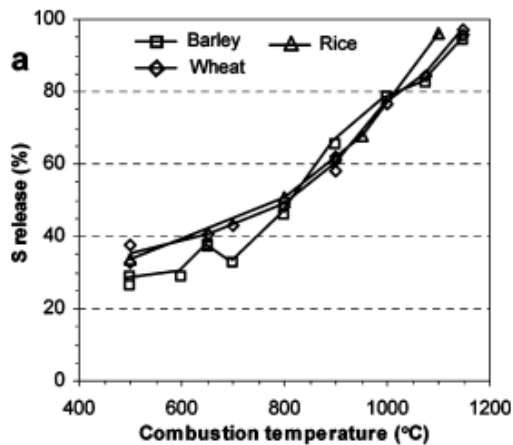


3 pav. Biokuro mėginių (kviečių, ryžių, miežių) cheminių elementų a) Kalio (K) ir b) Chloro (Cl) išskyrimas (%) į dujinę būseną prie skirtingų temperatūrų.



4 pav. Biokuro mėginių (rapsų, avižų, bastutis) cheminių elementų a) Kalio (K) ir a) Chloro (Cl) išskyrimas (%) į dujinę būseną prie skirtingų temperatūrų.

Sieros išsiskyrimui degimo metu įtakos taip pat turi biokure esantis chloras. Daugiau chloro turintys mėginiai (5 pav. (a)) prie 500 °C sieros išskiria iki 40 %. Mažiau chloro turintys mėginiai (5pav. (b)), esant tai pačiai 500 °C temperatūrai, gali išskirti iki 60 % sieros. Tačiau daugiau chloro turintys mėginiai palaipsniui didinant temperatūrą 500 – 1150 °C sieros išskyrimas į dujinę būseną taip pat palaipsniui didėja ir pasiekia beveik 100%, o mažesnę chloro koncentraciją turintiems mėginiams sieros išskyrimas pasirodo ne tokiu dideliu tempu kitimu ir galutiniame rezultate prie 1150 °C išskiriama iki 80 % biokure esančios sieros.



5 pav. Biokuro mėginių a) kviečių, ryžių, miežių ir b) rapsų, avižų, bastutis cheminio elemento Sieros (S) išskyrimas (%) į dujinę būseną prie skirtingų temperatūrų.

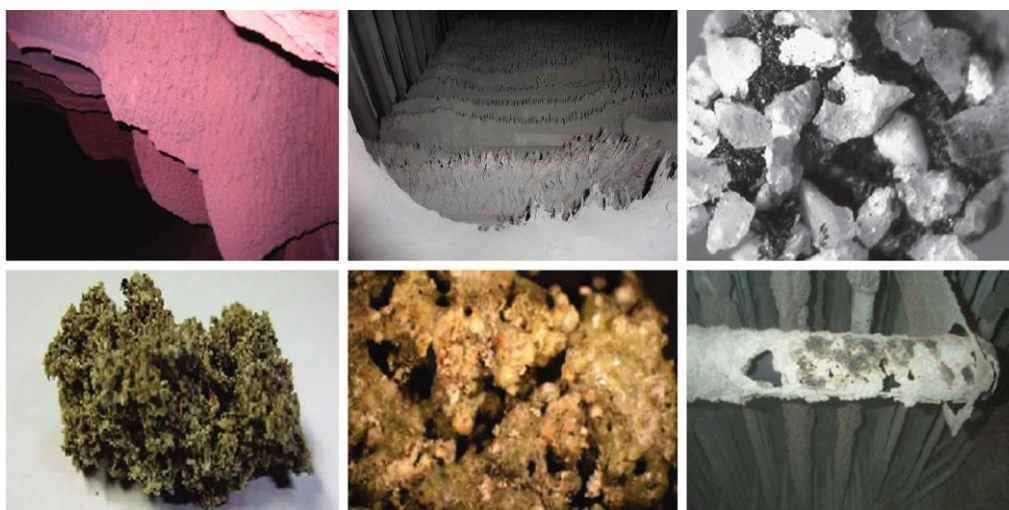
Nuolatos atlikinėjami eksperimentai, kuriuose nustatinėjamas ir pelenuose esantis teršalų kiekis, lyginant su kure esančių elementų kiekiu. Vieną iš tokių tyrimų atliko kinai [8]. Pirmiausia ištyrę pirminę biokuro (gluosnio skiedros ir javų stiebų, granuliu) cheminių elementų sudėtį, kuri pateikta 2 lentelėje, palyginimui 3 lentelėje parašyti sudegusio kuro pelenu sudėtis ir susidariusių antrinių medžiagų kiekis.

4 lentelė. Kviečių šiaudų ir pušies žievės pelenu cheminė elementų sudėtis (%) [9]

Kuro tipo pelenu	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃
Kviečių šiaudai	59,90	0,81	0,54	7,28	1,82	16,86	0,42	2,27	1,10
Pušies žievė	34,36	5,30	0,30	40,60	4,50	7,60	0,40	4,81	2,05
Durpės	52,40	10,40	8,30	10,10	4,30	2,90	1,70	2,69	7,21

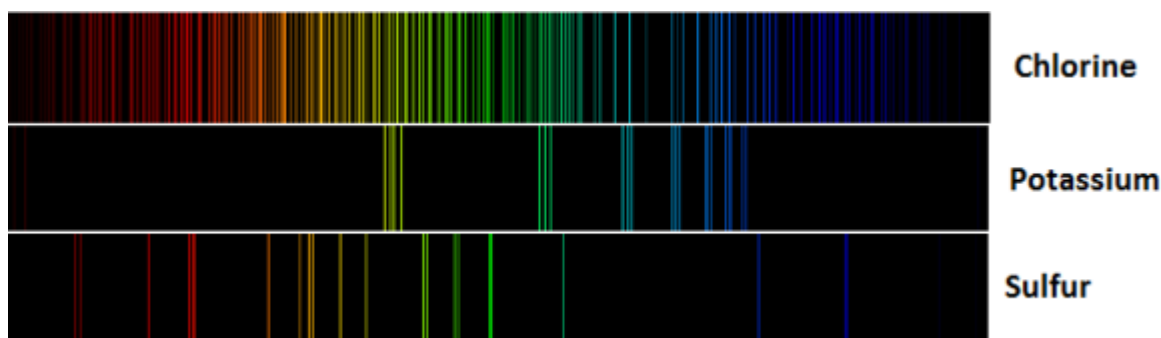
Degimo metu susidaro chloridų junginiai Cl₂, HCl, NaCl, KCl, kurių neigiamas poveikis pasireiškia korozija (6 pav.) bei kitų metalų kaupimusi ant sienų pagreitiniu. Šie chloridų junginiai žinomi kaip didžiausi korozijos sukėlėjai deginant biokurą ir atliekas. Taip pat chloridų ir sulfatų junginiai sukelia šlakų susidarymą (6 pav.). Pagrindė šlakų susidarymą lemia kalio ir natrio (kurie toliau bus pažymėti kaip M) cheminių junginių M, MCl, MCl₂, M₂SO₄ ir MOH susidarymas. Šie cheminiai junginiai susidaro dujinėje būsenoje biokuro degimui pasiekus tam tikrą temperatūrą (kaip anksčiau minėta skirtingi elementai išsiskiria prie skirtingos temperatūros). Vėliau vykstant kondensacijos reakcijai junginiai virsta į kietąją būseną ir nusėda ant katilo sienelių, susidaro šlakas arba vyksta korozijos procesas, kurio metu gadinami vamzdžiai arba katilo sienelės. Taip pat cheminiai elementai, kurie iki galo neišsiskiria degimo metu, lieka pelenuose kaip kietosios dalelės.

Pelenams vėstant taip pat gali formuotis šlakai ar susidaryti pavojingos druskos, kurios sukelia koroziją.



6 pav. Susidariusių šlakų (pradedant nuo kairės pusės viršaus) ir korozijos (paskutinis paveikslas) deginant biokurą pavyzdžiai

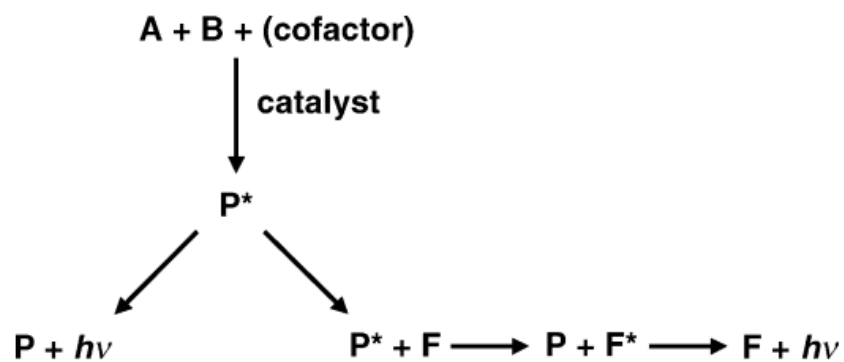
Degant biokurui ryškioje liepsnoje pagrindinis pastebimas spektrinis bruožas yra kreivė, forma panaši į tokią kokią sukuria juodasis kūnas. Aukštesnės temperatūros liepsna sukuria plačiąjuostę kintančią kreivę ultravioletinių spindulių spektre, o žemesnės temperatūros liepsna sukuria didesnio ilgio kreivę infraraudonųjų spindulių spektre (1 priedas). Šviesa, kuri iššaukia šią kreivę yra sukurama liepsnoje esančių karštųjų dalelių [10]. Kiekvienas elementas išskiria kitokią spalvą priklausomai nuo bangos ilgio (1 priedas), kurioje jis išsiskiria. Biokure esantys šarminiai elementai pastebimi liepsnoje prie tam tikros temperatūros ir tam tikrame emisijos spektro bangos ilgyje. Naudojant įvairius filtrus galima sekti, koks elementas matomas liepsnoje. Chloro, kalio ir sieros emisijos spektrai pavaizduoti 7 paveikslėlyje. Pagal šiuos spektrus stebint liepsną galima atskirti, prie kokių parametrų šie elementai yra išskiriami į dujinį pavidalą, pavyzdžiui kalis spektre matomas violetinės spalvos ir išskiriamas daugiausia 766 nm bangos ilgyje.



7 pav. Chloro, Kalio ir Sieros emisijos spektrai

Vykstant cheminėms ar biocheminėms reakcijoms, reakcijos metu išskiriama energija gali sužadinti laisvąjį elektroną. Tam, kad elektronas grįžtų į pirminę būseną galima fotono emisija, kas yra vadinama chemiliuminescencija [11], arba sužadinta molekulė gali prarasti energiją kitais būdais : per vykstančias chemines reakcijas, susidūrimo de aktyvacijos metu ar vidinės konversijos būdu. Chemiliuminescencija gali pasireikšti 2 būdais (8 pav.). Paprasčiausiai vykstanti reakcija yra substratui chemiškai reaguojant su oksidantu, gautas produktas yra sužadintoje būsenoje, produktui prarandant energiją gaunamas jau stabilios būsenos produktas ir išskirtas emisijos fotonas (tiesioginė chemiliuminescencija). Kiek sudėtingesnės yra kitos galimos reakcijos, kai sužadintas produktas

atiduoda energiją fluoroforui, o šis galutinėje stadijoje praranda energiją ir taip pat išskiria emisijos fotoną (netiesioginė chemiliuminescencija).



8 pav. Chemiliuminescencijos galimos reakcijos : (A) substratas; (B) oksidantas, (P) produktas, (P*) produktas sužadintoje būsenoje; (F) fluoroforas; (F*) fluoroforas sužadintoje būsenoje; (hv) radiacijos emisija.

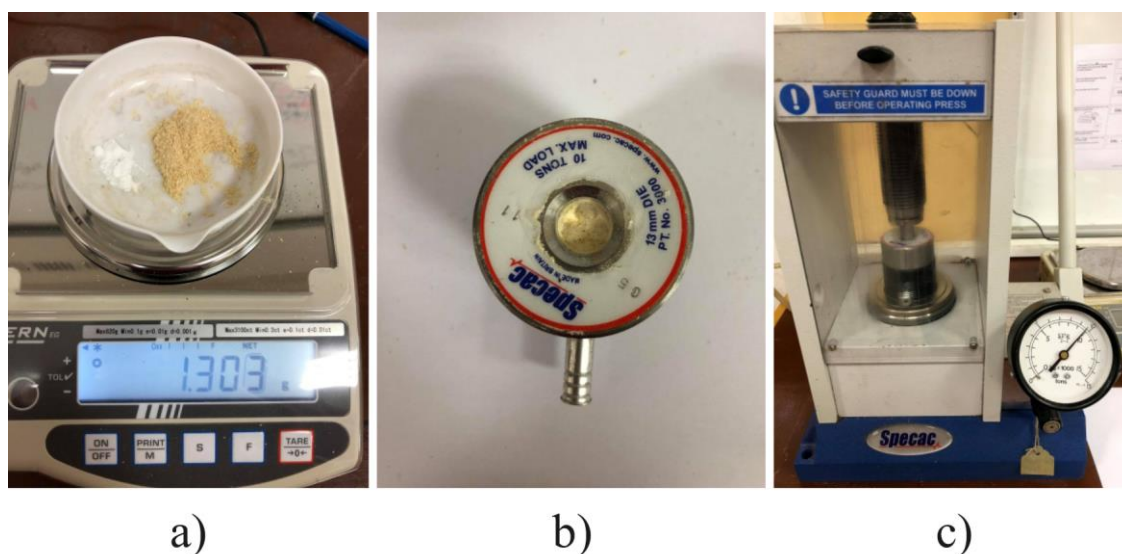
2 Pasiruošimas tyrimui

2.1 Mėginiai

Atliekant tyrimą analizuojami skirtingų koncentracijų smulkintos medienos mėginiai, kurie specialiai paruošiami. Pirmiausia gauta mediena yra susmulkinama ir dalis šios medienos yra atidedama nevalytiems mėginiams. O likusi mediena yra išplaunama rūgšties tirpalu, tam kad būtų pašalinami chemiliuminescencijai jautrūs elementai ir mediena liktų švari be pridėtinių priemaišų. Tada padaliname švarią smulkintą medieną į 9 dalis ir kiekvieną dalį prisotiname skirtingos koncentracijos kalcio, kalio ir natrio cheminiais elementais bei gauname 0,5%, 2% ir 5% koncentracijos prisotintus vienodos masės ir tūrio mėginius.

Antroje mėginių ruošimo dalyje gaminamos medienos su skirtingų elementų ir skirtingos koncentracijos tabletės, kurios sveria 1,3 g. Kadangi vien medienos tabletės turėtų galimybę iširti, todėl geresniam surišimui naudojamas bulvių krakmolai, kuris rezultatams įtakos neturi. Tada pasveriname prisotintos medienos (svoris 1g) ir krakmolo (svoris 0,3g) mišinį, kaip parodyta 1 paveikslo a) dalyje. Mišinys patalpinamas į pagalbini cilindą (1 paveikslo b) dalis) bei preso pagalba suspaudžiami (1 paveikslo c) dalis) į bandomąsias prisotintos medienos ir krakmolo mišinio tabletes. Taip pat pagaminama ir neplautos tokios medienos tablečių.

Paskutiniame etape tabletės šone iki vidurio išgręžiama skylutė termoporai įstatyti.



9 pav. Mėginio svėrimas ir suspaudimas

2.2 Įranga ir pasiruošimas

2.2.1 Įranga

Tyrimas atliekamas naudojant savadarbį stovą (2 paveikslas), kuris susideda iš laikiklio bei plokštelės, ant kurios deginamas mėginys. Plokštelė sudaryta iš nerūdijančio plieno vielyčių, kurių viduryje paliktas 1 mm tarpas liepsnai praėti, virš šios dalies tyrimo metu būna patalpintas mėginys.



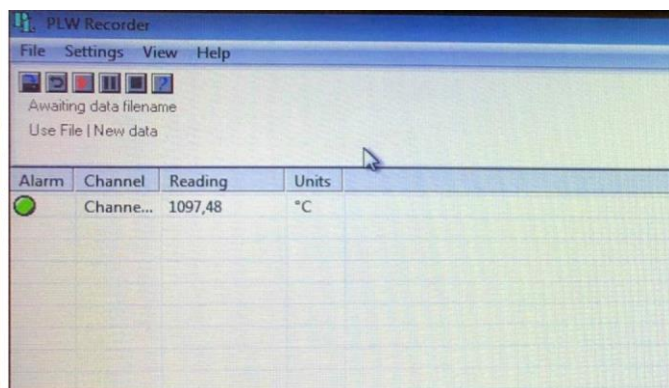
10 pav. Tyrimo stovas su termopora ir degiklis

Taip pat, naudojamas dujinis degiklis, kuris sumaišo orą ir dujų mišinį, o šių dedamųjų padavimas reguliuojamas stende esančiais parametru padavimo prietaisais.

Tyrimo metu pastoviai sekama mėginio temperatūra, tam naudojama termopora, kuri įstatoma į mėginio vidurį iš šono specialiai padarytoje skylutėje. Termopora temperatūros pasikeitimą fiksuoja kas 1 sekundę. Rezultatai apdorojami PICO TC-08 prietaiso, prie kurio prijungta termopora. Iš kitos pusės PICO TC-08 prietaisas (11 paveikslas a) dalis) prijungtas prie kompiuterio ir „PLW recorder“ programos pagalba išvedami rezultatai (11 paveikslas b) dalis). Temperatūra sekama nuolatos, tačiau rezultatams naudojama tik degimo metu vykstančios reakcijos temperatūra. Taip pat prieš kiekvieną bandymą termopora atvėsinama iki 25-30 °C temperatūros.



a)



b)

11 pav. „Pico TC-08“ prietaisas a) ir „PLW recorder“ programa b)

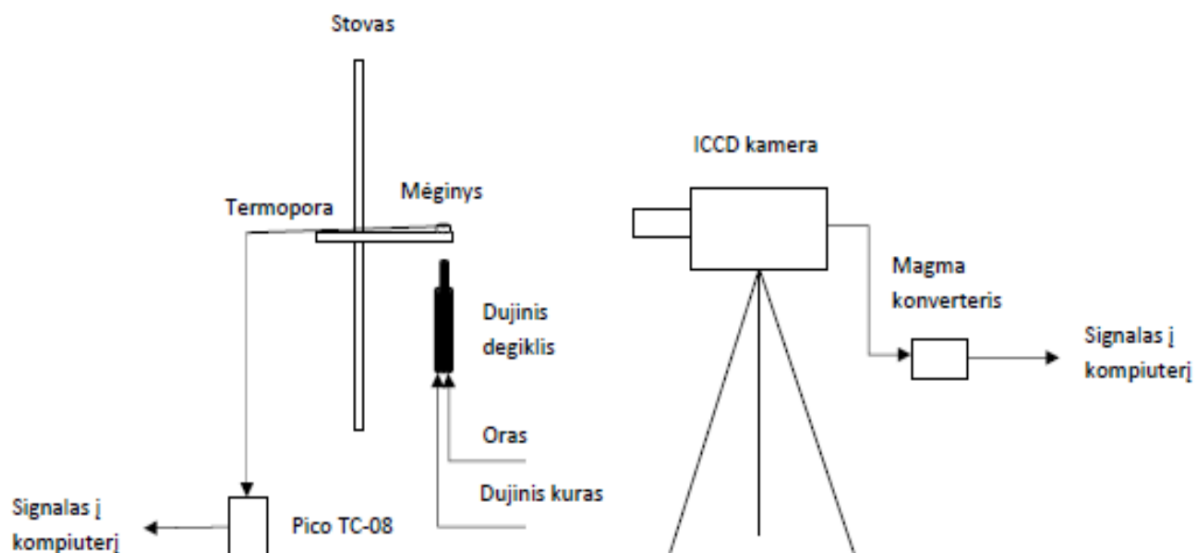
Liepsnai degant skirtingos medžiagos išskiria fotonus skirtingo ilgio bangose. Šis reiškinys tyrimo metu stebimas Andor firmos kamera, kurios modelis iStar ICCD (12 paveikslas). Kamera naudoja CCD detektorių. Tam, kad kamera pagautų tik tam tikros medžiagos išskiriamus fotonus, naudojami filtrai : Kalcio filtras (620 nm bangos ilgio), Kalio filtras (770 nm bangos ilgio) ir Natrio filtras (590 nm bangos ilgio). Filtrai naudojami atitinkamai reikiamos medžiagos fiksavimui. Kamera įtaisyta ant mechaniniu būdu reguliuojamo Velbon firmos DX-888 Digital modelio stovo.



12 pav. Andor iStar ICCD kamera su stovu ir detektoriumi

Rezultatų konvertavimui naudojamas Magma konverteris, kuris padeda išvesti rezultatus į kompiuterį. Kompiuteryje rezultatų sekimui naudojama „Andor Solis for time revolved ICCD-4031“ programa.

Taip pat, viso tyrimo stendo principinė schema pateikta 13 paveiksle.

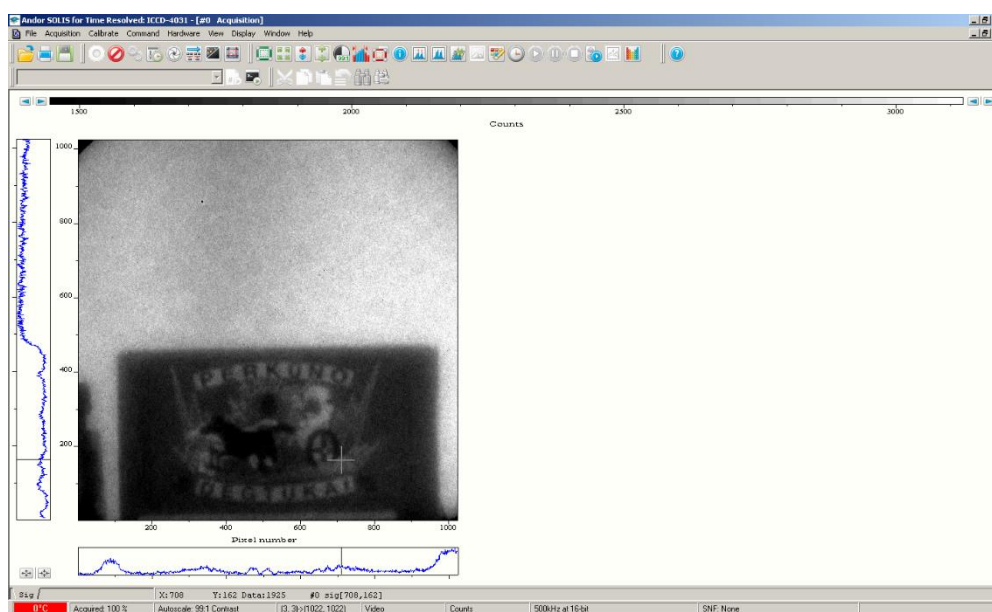


13 pav. Tyrimo stendo principinė schema.

2.2.2 Pasiruošimas

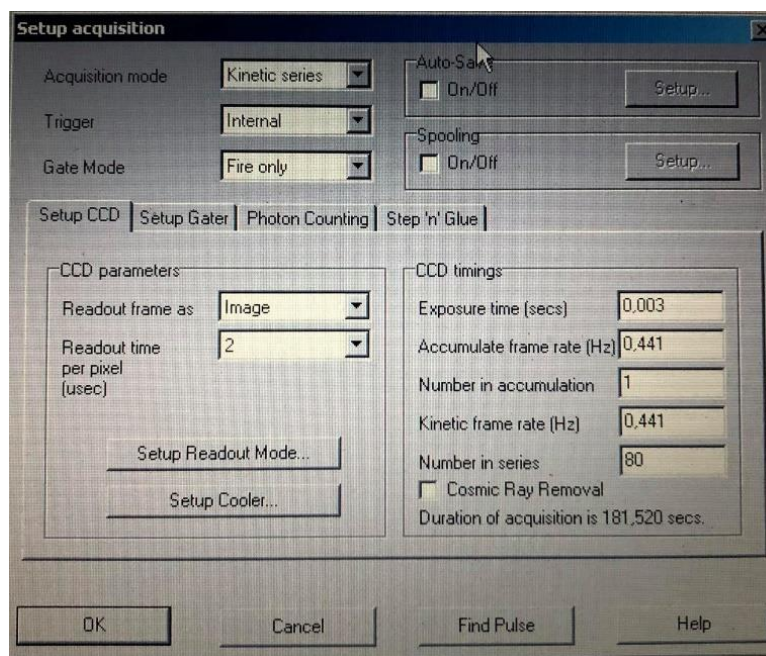
Prieš atliekant bandymus būtina sukalibruoti kamerą ir patikrinti termoporų veikimą. Kiekvieną kartą pradėdant naudoti kamerą ją reikia rankiniu būdu sukalibruoti. Tam naudojame degtukų dėžutę ir

sekame rezultatus realiu laiku programoje (13 paveikslas) taip, kad būtų matoma tiksli degtukų dėžutės informacija.



14 pav. Bandymas skirtas sukaliuoti ICCD kamerą.

Sukalibravus kamerą parenkami parametrai Andor Solis programoje. Nustatomas tik ugnies sekimas ir bandymo tipas „kinetic series“. Taip pat pasirenkama, kad vieno bandymo metu atliekama 80 kadru, kurie daromi kas apytikriai 2 sekundes. Pilnas vieno bandymo laikas yra 181,52 sekundės. (14 paveikslas).



15 pav. Andor Solis programos parametrai tyrimui.

Taip pat patikriname ar termopora veikia pakaitindami ją ir sekdami rezultata. Toliau uždegame degiklį ir termoporos pagalba sureguliuojame reikiamą temperatūrą 1200 °C. Tokia temperatūra pasirenkama todėl, kad prie mažesnės temperatūros gali nepilnai vykti reakcijos, kurių metu išspinduliuojami fotonai (kaip aptarta literatūros apžvalgoje). Atliekant bandymus svarbu sekti

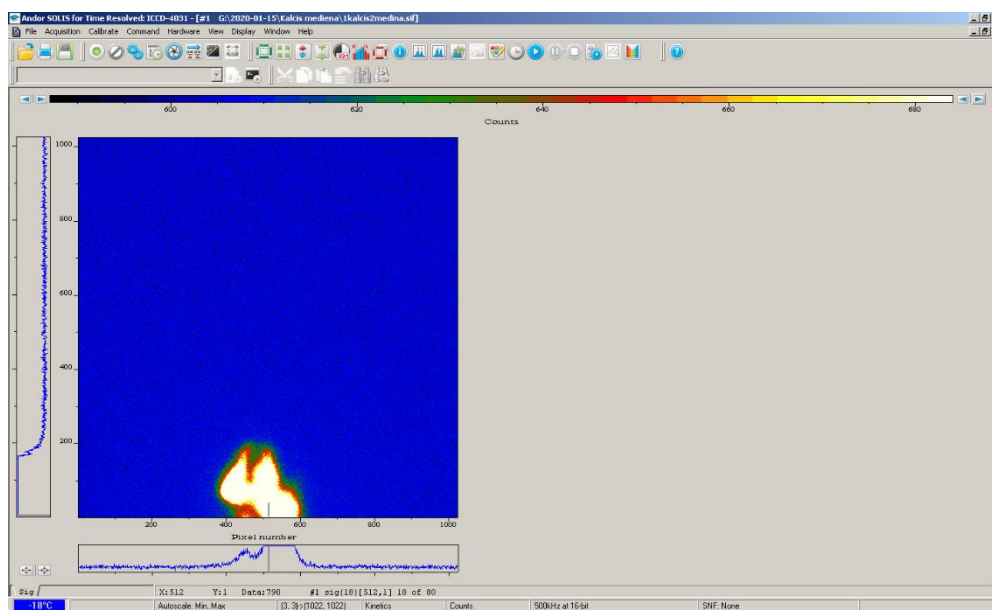
termoporos parametrus, nes ši po kurio laiko nudega ir pradeda neberodyti temperatūros rezultatų. Tada reikia pakeisti termopora ir pakartoti bandymą.

2.2.3 Tyrimo eiga

Pasiruošus visus mėginius ir aparatūrą pradedamas atlikti tyrimas. Kaip anksčiau minėta sutikrinama ar gerai veikia aparatūra ir atliekamas kalibravimo procesas. Tyrimas pradedamas uždegant dujinį degiklį ir sureguliuojant 1200 °C temperatūrą.

Kadangi tyrimo metu kamera fiksuoja fotonus, tai tyrimas atliekamas tamsoje, kad šviesa neturėtų įtakos rezultatams. Taip pat prieš tyrimą nuimamas „fonas“. Tai yra 30 kadro bandomasis tyrimas be tabletės, o filmuojama tik dujinio degiklio liepsna tamsoje. Fonas padeda sukonkretinti gautą rezultatą, atimant foną iš gautų rezultatų ir kaip galutinius rezultatus naudojant skirtumą.

Toliau termopora patalpinama į tabletėje esančia skylutę ir mėginys padedamas ant laikiklio, kuris yra veikiamas liepsnos. Tabletė konkrečiai patalpinama viduryje plokštelės (kur yra 1 mm skylutė liepsnai praeiti) taip, kad liepsna veiktų tabletę tiesiogiai. Ir iškart pradedamas tyrimas : matuojama temperatūra ir kamera atlieka 80 kadro bei fiksuoja fotonus, kuriuos skleidžia kalis, natris ar kalcis atitinkamai pagal filtrą. Tyrimas trunka apie 181,52 sekundės ir po šio laiko rezultatų sekimas yra stabdomas. Bandymo rezultatai matomi „Andor Solis for time revolved ICCD-4031“ programoje (16 paveikslas).



16 pav. Tyrimo metu fiksuojami rezultatai „Andor Solis for time revolved ICCD-4031“ programoje.

Taip atliekami bandymai su visų elementų ir su visų koncentracijų mėginiais, kiekvienam variantui atliekami 5 bandymai. Kartais reikia atlikti ir daugiau bandymų, kadangi termopora nustoja fiksuoti temperatūros pokytį bandymo metu. Taip atsitinka dėl kelių priežasčių : termopora suyra arba apsineša ir netiksliai fiksuoja temperatūros rezultatą. Tokie bandymai neįtraukiami į rezultatų skaičiavimą.

3 Rezultatai

3.1 Biokuro cheminė elementų sudėtis

Chemiliuminescencijos reiškinių tyrimas skirtas ištirti tam tikrų cheminių elementų išsiskyrimo progresą degimo eigoje. Tačiau pirmiausia reikia išanalizuoti patį biokurą ir jo cheminę sudėtį. Kadangi buvo atliekamas ir biokuro valymas reikalinga ištirti kaip pasikeitė cheminė elementų sudėtis po valymo. Tyrimui naudojamas šiaudų ir medienos biokuras, o jų cheminė elementų sudėtis, prieš iš valymo ir po jo, pateikta 5 lentelėje.

5 lentelė. Tiriamojo biokuro (medienos ir šiaudų) cheminė elementų sudėtis prieš valymą ir po valymo.

	Kalis, mg/kg	Natris, mg/kg	Kalcis, mg/kg	Aliuminis, mg/kg	Silicis, mg/kg
Neplautos medienos biokuras	166,030	3,630	748,570	6,280	<0,080
Išplautos medienos biokuras	9,707	0,640	40,590	5,070	<0,080
Neplautų šiaudų biokuras	9206,670	21,180	2024,670	99,490	3507,000
Išplautų šiaudų biokuras	133,030	8,180	104,230	46,890	2516,330

Iš cheminės sudėties analizės matyti, kad Kalis iš biokuro išvalomas labai efektyviai ir pokytis siekia net iki 1,5 proc. likusios dalies šiaudų biokure, o medienoje pasiekiamas 5,8 proc. likusi dalis. Natrio santykinai su Kaliumi yra daug mažiau, todėl ir išvalymo efektyvumas mažesnis – 17,6 proc. medienos biokure ir 38,6 proc. likusi dalis šiaudų biokure. Kalcis išplaunamas taip pat efektingai, kaip ir Kalis, o jo likusi dalis 5,4 proc. medienos ir 5,14 proc. šiaudų biokure.

3.2 Tyrimų rezultatų aiškinimas

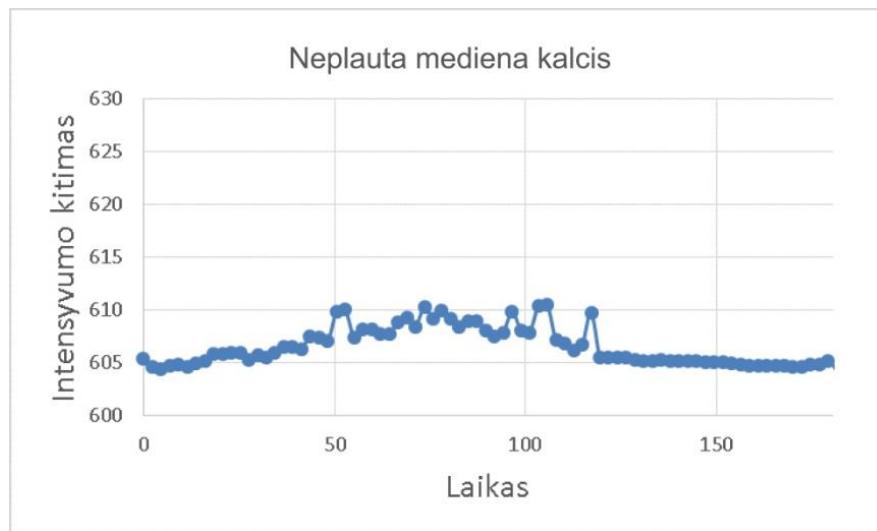
Rezultatai atvaizduojami grafiko kreivėse. Grafiko y ašyje nurodomas intensyvumo kitimas (t.y. fotonų išsiskyrimas), o x ašyje tyrimo trukmė. Grafikai trijų tipų, pagal intensyvumo dydį – Kalcio grafikas atvaizduojamas didžiausioje 600-630 intensyvumo skalėje, Kalio grafikas atvaizduojamas 600-1800 didžiausioje intensyvumo skalėje, o Natrio grafikas atvaizduojamas 600-660 didžiausioje intensyvumo skalėje. Bandymų rezultatų, kurių metu buvo išskiriami mažesni cheminių elementų kiekiai, grafikai atvaizduojami mažesnėse skalėse.

3.3 Tyrimų rezultatai

3.3.1 Bandymai su mediena

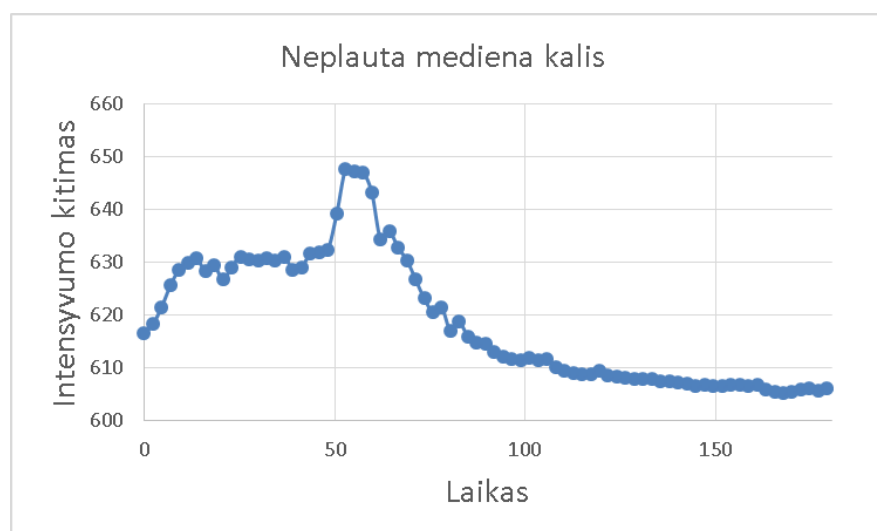
3.3.1.1 Neplautos medienos tyrimų rezultatai

Deginant nevalytą medienos biokurą, gauti rezultatai pavaizduoti 17, 18 ir 19 pav. Iš rezultatų matyti, kad kalcio išsiskyrimas (17 pav.) intensyvėja ir nuo 50 s. iki 115 s. kreivė svyruoja tarp 606 ir 611 intensyvumo. Toliau kalcio išsiskyrimas tolygus pradiniam tyrimo rezultatui ir išlieka pastovus.



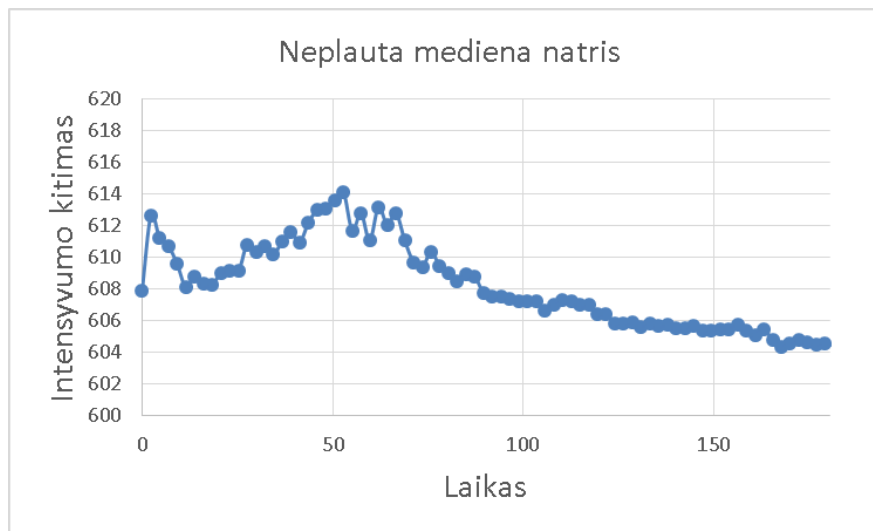
17 pav. Neplautos medienos kalcio filtro bandymų rezultatai

Atliekant tyrimą su neplauta mediena ir stebint kalio kitimą (18 pav.), nustatyta, kad šarminio metalo išskyrimo intensyvumas kyla nuo bandymo pradžios iki 52 s., kai pasiekia didžiausią 649 intensyvumą, o tada 60 s. iškarto smarkiai krenta ir iki pat bandymo pabaigos grafike išlieka krentanti kreivė.



18 pav. Neplautos medienos kalio filtro bandymų rezultatai

Natrio išskyrimo intensyvumo grafikas (19 pav.), deginant neplautą medieną, kinta netolygiai. Nuo bandymo pradžios išskyrimas pakrenta keliais rodiklio vienetais, bet tada vėl pradeda kilti ir kyla iki didžiausios reikšmės 614 laiko momentu 55 s. Nuo 70 s. kreivė pradeda kristi ir iki bandymo pabaigos pastebimas vis mažesnis natrio išskyrimo intensyvumas.



19 pav. Neplautos medienos natrio filtro bandymų rezultatai

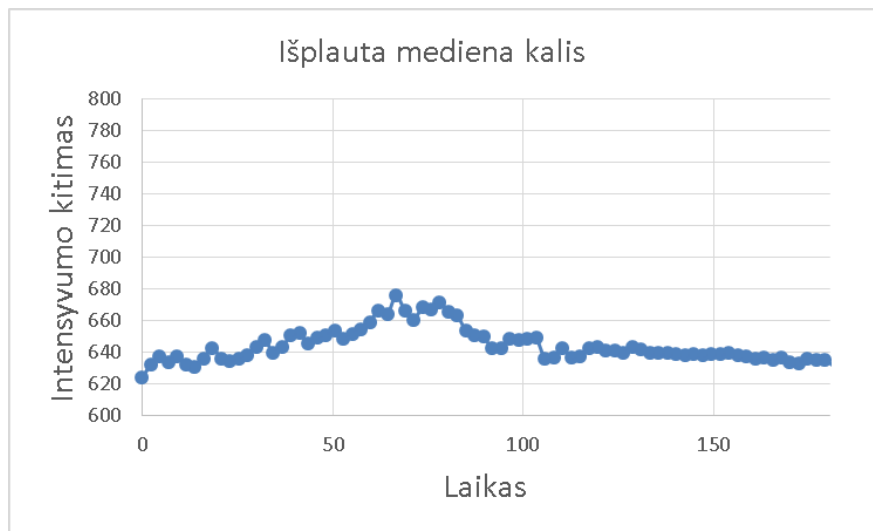
3.3.1.2 Išplautos medienos tyrimų rezultatai

Išvalytos medienos išskiriamų cheminių elementų intensyvumo kitimas atvaizduojamas 20, 21 ir 22 pav. Išvalytoje medienoje kalcio yra 94 proc. mažiau nei nevalytoje medienoje, o iš grafiko (20 pav.) atitinkamai matyti, kad kalcio išsiskyrimas vyksta intensyviau, bet trumpesnę laiko tarpą, didžiausias intensyvumas pasiekia 618, kai nevalytos medienos didžiausia intensyvumo vertė 611. Kalcio išsiskyrimas labai suintensyvėja ties 50 s. ir pasiekia didžiausią vertę, tačiau šis procesas vyksta trumpai ir nuo 75 s. cheminio elemento išsiskyrimo intensyvumas nukrenta ir jo nebepastebima.



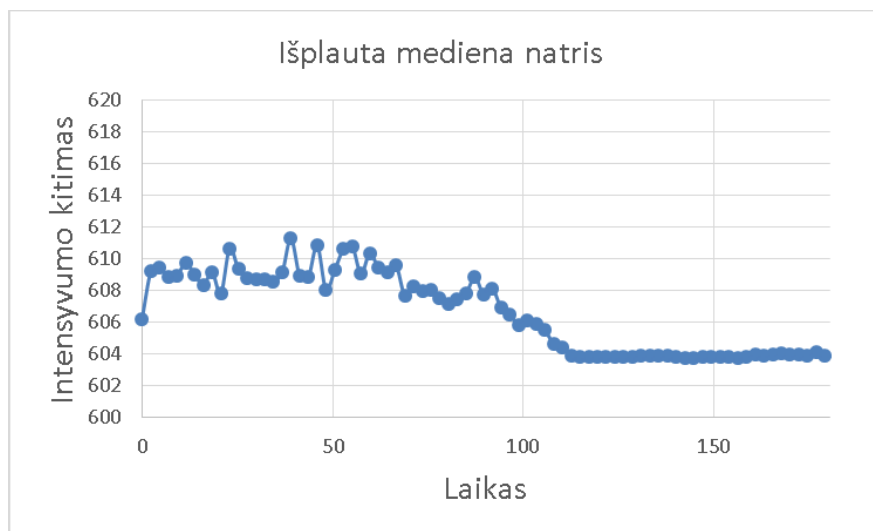
20 pav. Išplautos medienos kalcio filtro bandymų rezultatai

21 pav. grafike pavaizduotas išplautos medienos degimo metu išskiriamo kalio intensyvumo pokytis. Lyginant su neišplautu mėginiu, šiame yra 17 kartų mažiau kalio. Tačiau, intensyvumas nuo bandymo pradžios kyla ir didžiausias šio cheminio elemento išsiskyrimas siekia 680, laiko momentu 65 s., o nuo 75 s. kreivė pradeda kristi ir likusį laiką laikosi 630-640 ribose.



21 pav. Išplautos medienos kalio filtro bandymų rezultatai

Išplautos medienos degimo proceso metu išskiriamo natrio pokytis matomas 22 grafike. Šio cheminio elemento tiek neplautoje medienoje tiek išplautoje medienoje yra ganėtinai nedaug, o išvalytame mėginyje natrio yra 82,3 proc. mažiau. Iš grafiko matyti, kad nuo tyrimo pradžios natrio išskyrimo intensyvumas svyruoja tarp 607 ir 612. Apie 70 s. kreivė pradeda kristi, o nuo 110 s. išsiskyrimo nematyti. Lyginant su neišplautu mėginiu, šiame mėginyje išsiskyrimas vyksta tokį patį laiką, tačiau ne taip intensyviai.



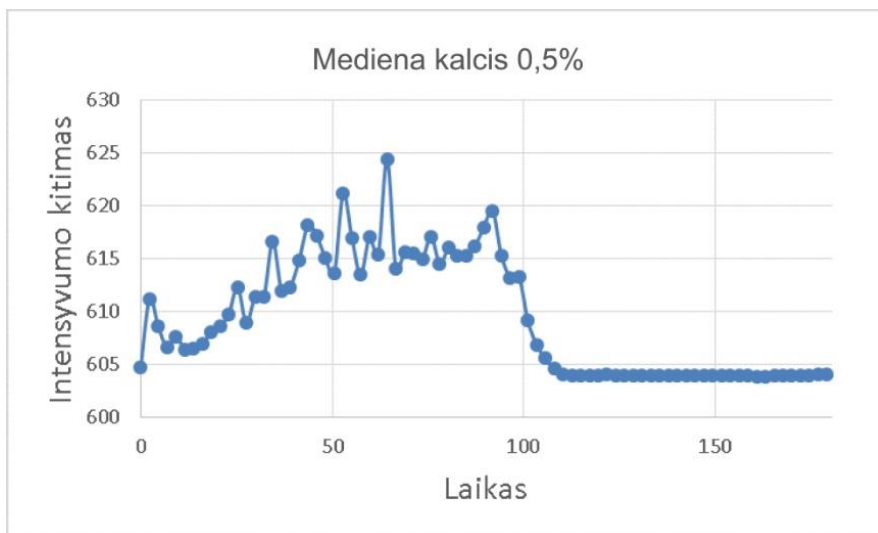
22 pav. Išplautos medienos natrio filtro bandymų rezultatai

3.3.1.3 Medienos prisotintos kalciumu tyrimų rezultatai

Kaip anksčiau minėta tyrimams naudojami mėginiai (išplauta mediena ir šiaudai), kurie prisotinami kalcio, kalio bei natrio cheminiais elementais taip, kad bendra procentinė prisotintų cheminių elementų dalis mėginyje būtų 0,5, 2 ir 5 proc.

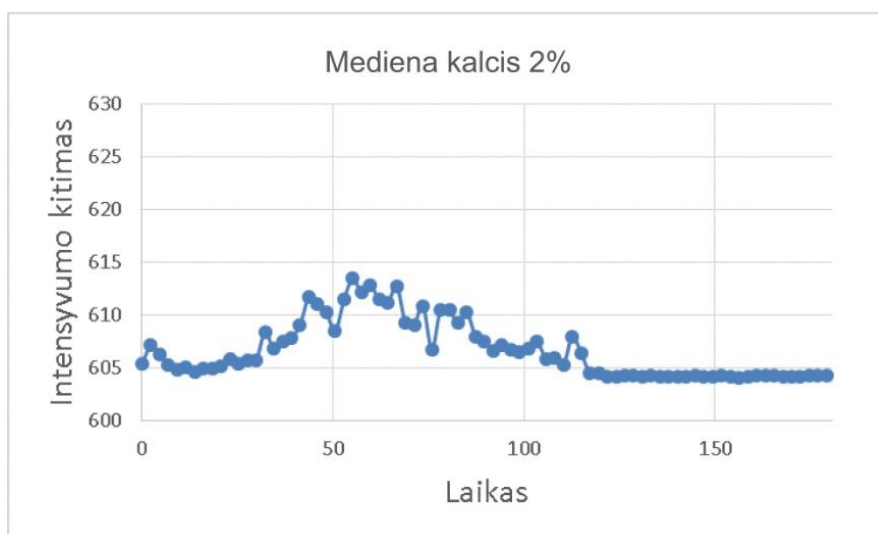
Tyrimų naudojant medienos prisotintos kalcio, minėtomis koncentracijomis, rezultatai atvaizduoti 23-25 paveikslėliuose. Iš 23 paveikslo grafiko (0,5 proc. kalcio koncentracijos medienoje mėginyje) matyti, kad kalcio išskyrimo intensyvumas kyla nuo bandymo pradžios iki 60 s., kai pasiekiamas didžiausias 625 intensyvumas. Toliau kreivė iki 90 sekundės svyruoja 613-620 ribose, o ties 110 s.

kalcio išsiskyrimo nebepastebima. Lyginant su neplautos medienos mėginio rezultatais, kalcis išskiriamas intensyviau ir jo daugiau išskiriama bandymo pradžioje, kai tuo tarpu neplautos medienos tyrimo metu dauguma kalcio išskiriama tik nuo 50s. Taip pat, lyginant su išplautos medienos rezultatai, kalcis išskiriamas taip pat, intensyviau, išplautos medienos tyrimo metu, kalcis išskiriamas neintensyviai nuo bandymo pradžios iki 50 s. Tada cheminio elemento išskyrimas suintensyvėja, bet trunka tik iki 75 s. ir kalcio išskyrimas smarkiai krenta.



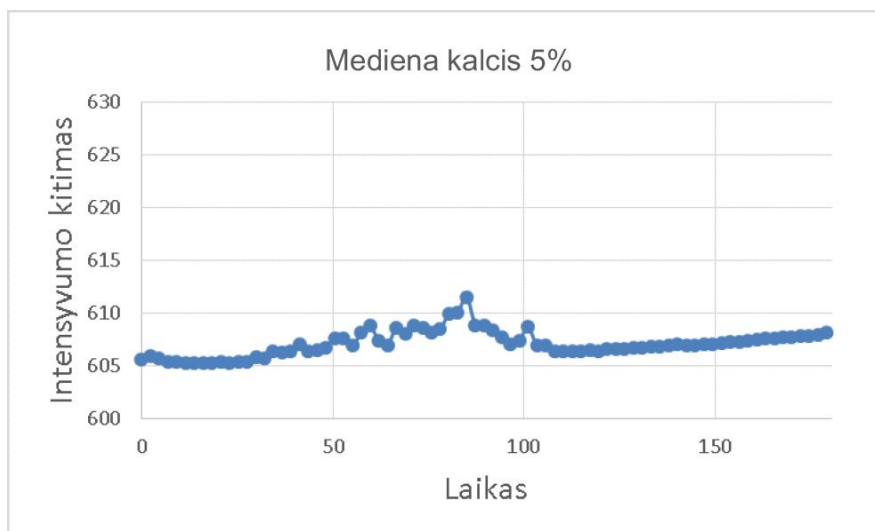
23 pav. Medienos, prisotintos 0,5 proc. kalciumu, bandymų rezultatai

24 paveikslėlyje pavaizduotas grafikas (2 proc. kalcio koncentracijos medienoje mėginys) parodo, kad didesnės koncentracijos nei 0,5 proc. mėginio deginimo metu kalcio išsiskyrimo intensyvumas mažesnis. Galimai šis cheminis elementas lieka pelenuose ir degimo produktuose jo randama mažiau. Bandymo metu kalcio išsiskyrimo intensyvumas pasiekė tik 614 rodiklį, kai 0,5 proc. koncentracijos mėginyje buvo pasiektas net didžiausios reikšmės 625 intensyvumo rodiklis, t.y. beveik dvigubai daugiau nei 2 proc. koncentracijos mėginyje. Taip pat, galima pastebėti, kad kalcio išskyrimas truko kiek ilgiau ir jo nebepastebima nuo 120 s. laiko momento. Grafikas atrodo panašiai, kaip ir išplautos medienos grafikas.



24 pav. Medienos, prisotintos 2 proc. kalciumu, bandymų rezultatai

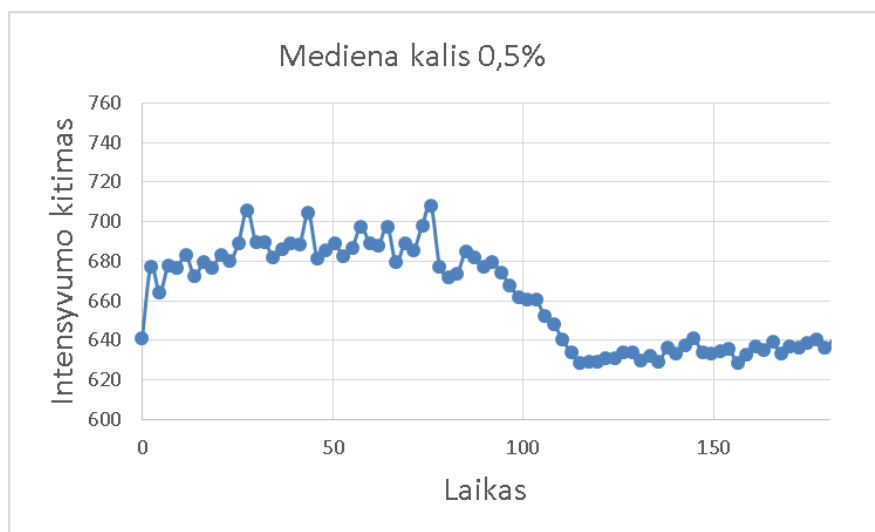
Medienos prisotintos 5 proc. kalcium tyrimų rezultatai pavaizduoti 25 paveikslėlyje. Šios koncentracijos mėginio bandymų grafikas parodo, kad pradžioje bandymo (0-30s.) kalcio neišskiriama, kai anksčiau atliktuose bandymuose su kitomis koncentracijos šiuo laiko momentu kalcio buvo išskiriama. Nuo 30 s. fiksuojamas kalcio išsiskyrimas ir jo intensyvumas kyla iki 80 s., o didžiausią vertę pasiekia 612 rodikliu. Vėliau intensyvumas pradeda kristi, tačiau kitaip nei visuose kituose bandymuose su kalcium ties 110 s. pastebimas šio cheminio elemento išsiskyrimo intensyvumo didėjimas, kuris nestoja kilti iki pat bandymo pabaigos.



25 pav. Medienos, prisotintos 5 proc. kalcium, bandymų rezultatai

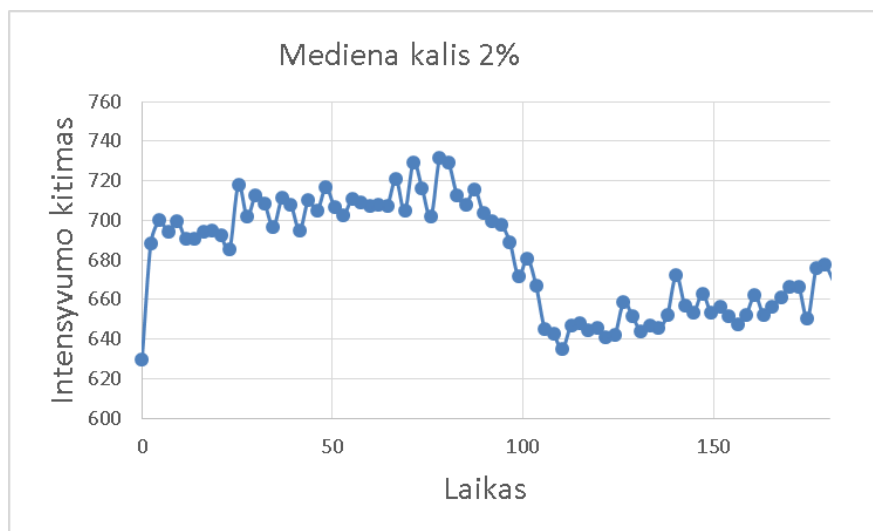
3.3.1.4 Medienos prisotintos kalium tyrimų rezultatai

Tyrimų su medienos prisotintos kalium (0,5, 2 ir 5 proc. koncentracijomis) rezultatai pavaizduoti 26-28 paveiksluose. Kalio išsiskyrimo intensyvumas tiriant 0,5 proc. koncentracijos mėginius (26 paveikslėlis). Laiko momentu nuo bandymo pradžios iki 100 s. intensyvumo rodiklis svyruoja tarp 660 ir 715 intensyvumo, o vėliau nukrenta. Tačiau kalio išskiriama šiek tiek daugiau nei neplautos medienos bandymų metu, kai kalio išsiskyrimo praktiškai nebuvo. Taip pat, kalio išskiriama daugiau nei išplautos medienos mėginyje, kai šio cheminio elemento išsiskyrimas buvo intensyvesnis tik laiko tarpe tarp 60 s. ir 80 s., o maksimali vertė nebuvo pakilusi iki 700 rodiklio.



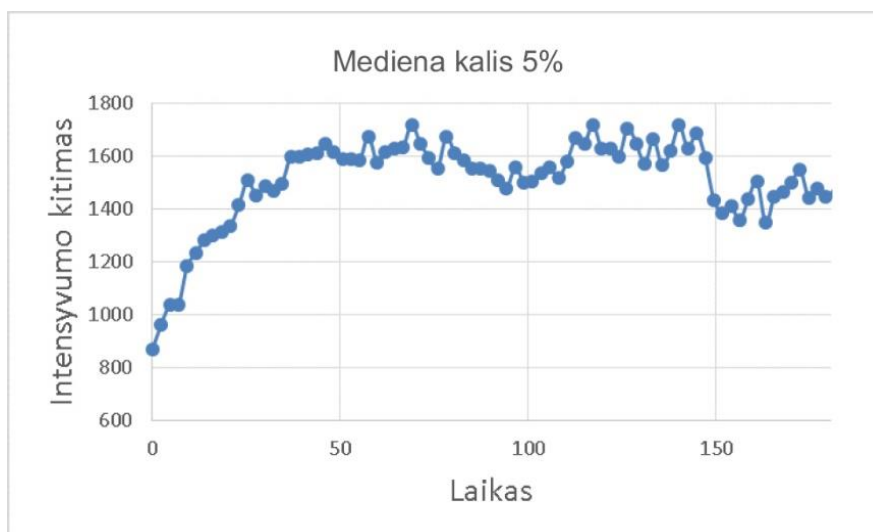
26 pav. Medienos, prisotintos 0,5 proc. kalium, bandymų rezultatai

Tiriant mėginius su 2 proc. kalio koncentracija medienoje (27 paveikslėlis) galima pastebėti, kad matomas nežymiai didesnis išskyrimo intensyvumas nei 0,5 proc. koncentracijos mėginiais viso bandymo metu. Nuo bandymo pradžios rodiklis nežymiai kyla ir 80 s. pasiektas didžiausias intensyvumas 738, toliau kreivė krenta ir 110 s. pasiekta mažiausia 638 intensyvumo riba. Tačiau intensyvumo svyravimai pastebimi iki pat bandymo pabaigos. Tokio svyravimo iki bandymo pabaigos nebuvo galima pastebėti ankščiau atliktuose bandymuose su kalcio filtru (neplautos medienos, išplautos medienos bei 0,5 koncentracijos medienos mėginiai).



27 pav. Medienos, prisotintos 2 proc. kaliu, bandymų rezultatai

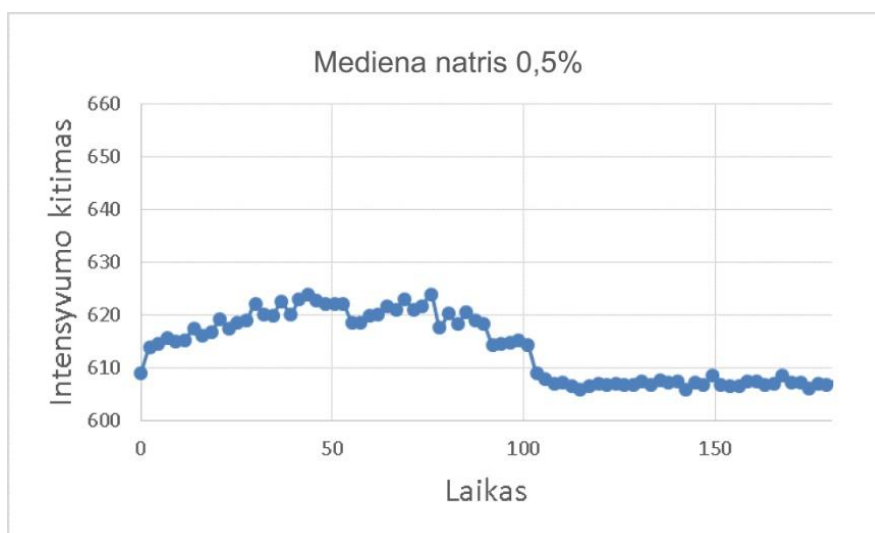
Medienos prisotintos 5 proc. kaliu bandymų rezultatai pavaizduoti 28 paveiksle. Iš grafiko matyti, kad tokios koncentracijos mėginiai išskiria labai didelį kiekį kalio. Nuo pat bandymo pradžios šis cheminis elementas išskiriamas vis intensyviau, kol 30 s. viršija net 1600 kitimo rodiklį. Tai yra net iki 11 kartų daugiau ankščiau minėtuose bandymų rezultatuose. Taip pat, didelis kalio išskyrimas, kai intensyvumo rodiklis svyruoja nuo 1500 iki 1700, fiksuojamas didžiąją tyrimo laiko dalį ir tik 145 s. nukrenta ir svyruoja tarpe tarp 1380 ir 1580 iki pat bandymo pabaigos.



28 pav. Medienos, prisotintos 5 proc. kaliu, bandymų rezultatai

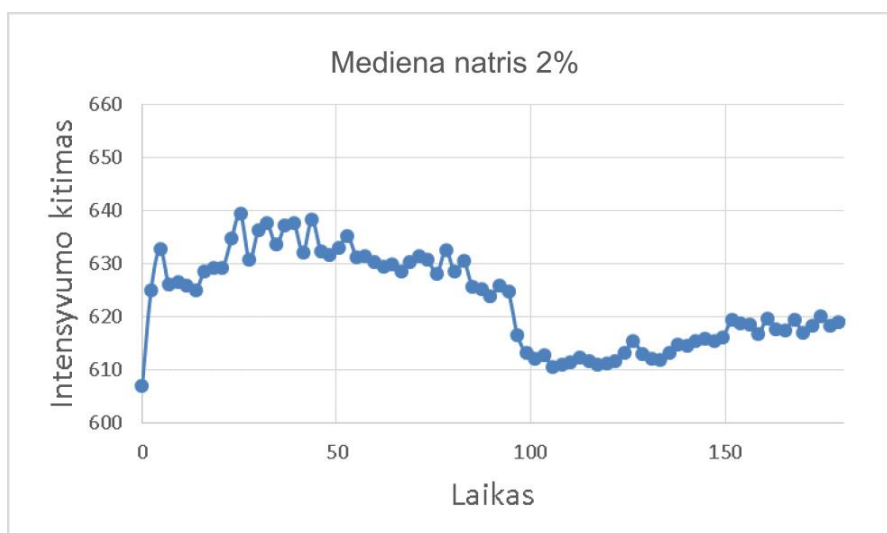
3.3.1.5 Medienos prisotintos natriu tyrimų rezultatai

Medienos prisotintos natriu (0,5, 2 ir 5 proc.) bandymų rezultatai pavaizduoti 29-31 paveikslėliuose. Iš 29 pav. grafiko (mediena prisotinta 0,5 proc. natriu) matyti, kad natrio išskyrimas nuo bandymo pradžios intensyvėja ir ties 40 s. pasiekia didžiausią intensyvumo ribą 624, toliau grafiko kreivė svyruoja tarp 618 ir 624 intensyvumo ribos, o ties 75 s. pradeda kristi. Ties 110 s. aiškiai natrio išskyrimo nebepastebima. Kadangi medienos biokure natrio yra santykinai nedaug, tiek neplautos, tiek išplautos medienos bandymai su natrio filtru parodė, kad natrias išskiriamas ne taip intensyviai, kaip su šiuo mėginiu.



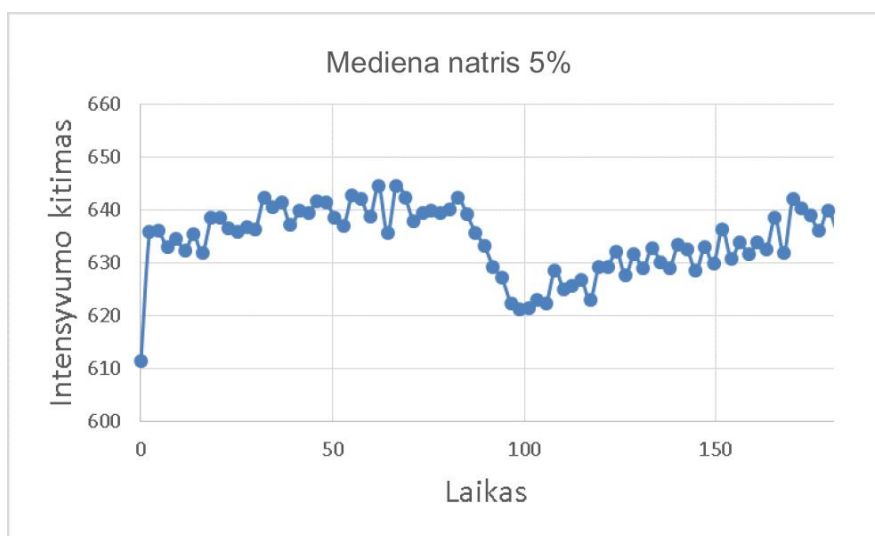
29 pav. Medienos, prisotintos 0,5 proc. natriu, bandymų rezultatai

Visai kitokie rezultatai matyti 30 pav. (mediena prisotinta 2 proc. natriu) grafike, kur kaip ir prieš tai matytame grafike natrias gan intensyviai išskiriamas nuo bandymo pradžios iki 100 s. laiko momento, kai natrio išskyrimas nukrenta iki žemiausios vertės. Aukščiausia vertę grafikas pasiekia ties 25 s. ir siekia 640, lyginant su 0,5 proc. mėginiu tai yra 16 punktų daugiau. Tačiau abu grafikai smarkiai skiriasi, kadangi 2 proc. koncentracijos medienos bandymų rezultatų grafike nuo 125 s., kai kreivė svyravo tarp 610 ir 612 indekso (laiko momentu 100 – 125 s.) pradeda kilti į viršų ir kyla iki pat bandymo pabaigos bei pasiekia didžiausią intensyvumo ribą 620, tačiau nesiekia bandymo pradžioje pasiektos didžiausios vertės.



30 pav. Medienos, prisotintos 2 proc. natriu, bandymų rezultatai

Medienos prisotintos 5 proc. natriu bandymų rezultatai pavaizduoti 31 paveikslėlyje. Grafikas parodo, kad didėjant natrio koncentracijai, didėja ir jo išskyrimo degimo metu intensyvumas. Kreivė nuo pat bandymo pradžios kylą ir pasiekia didžiausią intensyvumo reikšmę 647 laiko momentu 60 s. Kaip ir ankstesniuose bandymuose su mažesnėmis koncentracijomis, grafikas pradeda kristi ir apie 100 s. laiko momentu pasiekia mažiausią reikšmę 620. Tačiau kaip ir su 2 proc. koncentracijos bandymu kreivė vėl pradeda kilti. Tarp šių grafikų galima išvelgti skirtumą, jog 5 proc. natrio koncentracijos bandymo kreivė ne tik pradeda kilti, bet iki bandymo pabaigos vėl pasiekia didžiausią natrio išskyrimo intensyvumo tašką ties 165 s., kai tuo tarpu 2 proc. koncentracijos bandymas pradeda kilti, bet nepasiekia net pusės aukščiausiai buvusio taško reikšmės.



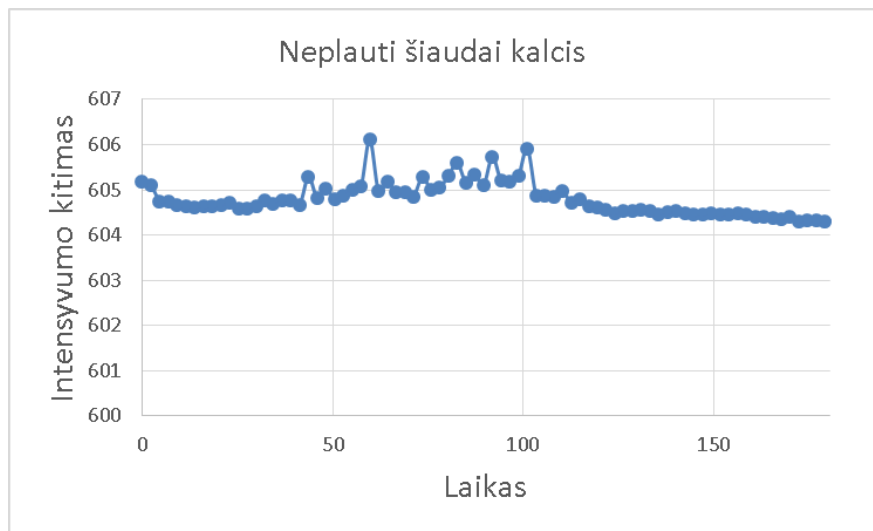
31 pav. Medienos, prisotintos 5 proc. natriu, bandymų rezultatai

3.3.2 Bandymai su šiaudais

Kad būtų galima tiksliau paaiškinti cheminių elementų išsiskyrimo intensyvumo kitimą, tyrimai atlikti ne tik su medienos mėginiais, bet ir su šiaudų mėginiais. Kaip ir su medienos biokuru, taip ir su šiaudų biokuru atlikti tyrimai su neplautais, plautais, prisotintais kalciumu (0,5, 2 ir 5 proc. koncentracijomis), prisotintais kaliumu (0,5, 2 ir 5 proc. koncentracijomis) bei prisotintais natriu (0,5, 2 ir 5 proc. koncentracijomis) mėginiais.

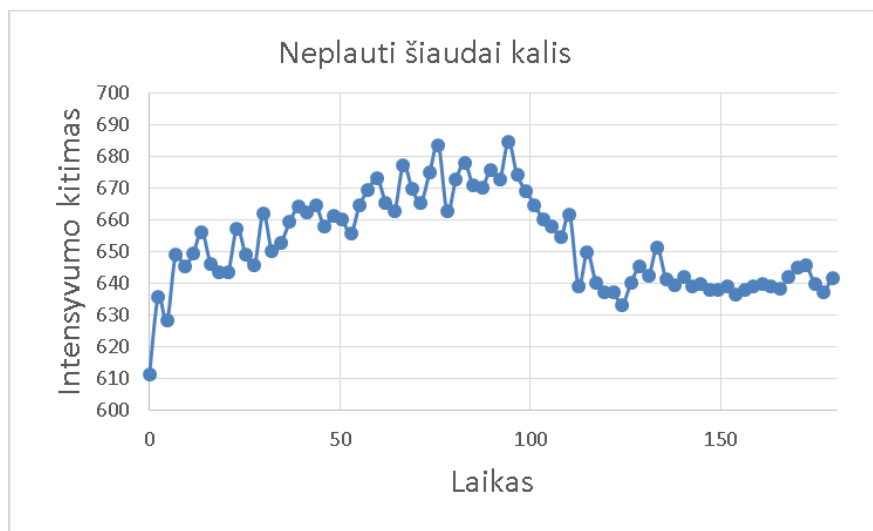
3.3.2.1 Neplautų šiaudų tyrimų rezultatai

Atliktų tyrimų su neplautų šiaudų mėginiais rezultatai pavaizduoti 32-34 paveiksluose. Iš 32 paveikslėlyje esančio grafiko, kuriame pavaizduoti bandymų su neplautų šiaudų mėginiais ir kalcio filtru rezultatai, matyti, kad kalcio viso bandymo metu išskiriama mažai ir neintensyviai, pokytis neviršija 607 rodiklio. Šiauduose kalcio yra 2024,67 mg/kg ir tai yra 2,7 karto daugiau nei medienos biokure. Tačiau iš 17 paveikslo (neplautos medienos kalcio filtro bandymų rezultatai) matyti, kad deginant neplautų šiaudų mėginius kalcio išskyrimo intensyvumas kinta praktiškai tiesiškai, kai tuo tarpu neplautos medienos degimo metu vykstančios reakcijos išskiria cheminį elementą 4-5 kartu intensyviau.



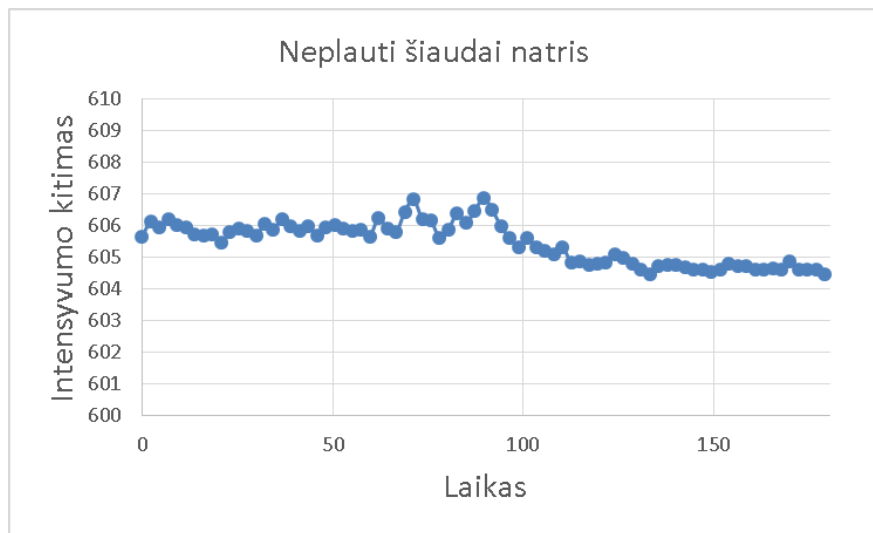
32 pav. Neplautų šiaudų kalcio filtro bandymų rezultatai

33 paveiksle pavaizduoti neplautų šiaudų kalio filtro bandymų rezultatai. Kalio šiauduose yra ypač daug, net 9206,67 mg/kg, kai tuo tarpu medienos mėginiuose yra tik 166,03 mg/kg, tai yra net 55 kartų skirtumas. Iš grafiko matyti, kad degimo metu kalis išskiriamas intensyviau nuo bandymo pradžios iki 90 s., kai pasiekiamas didžiausias intensyvumas 687. Lyginant su neplautos medienos tokiais pačiais bandymais (18 pav.), tai yra ganėtinai intensyviau, nes neplautos medienos tyrimų rezultatų pokytis buvo nežymus ir tik trumpu laiko tarpu jo buvo išskiriama intensyviau.



33 pav. Neplautų šiaudų kalio filtro bandymų rezultatai

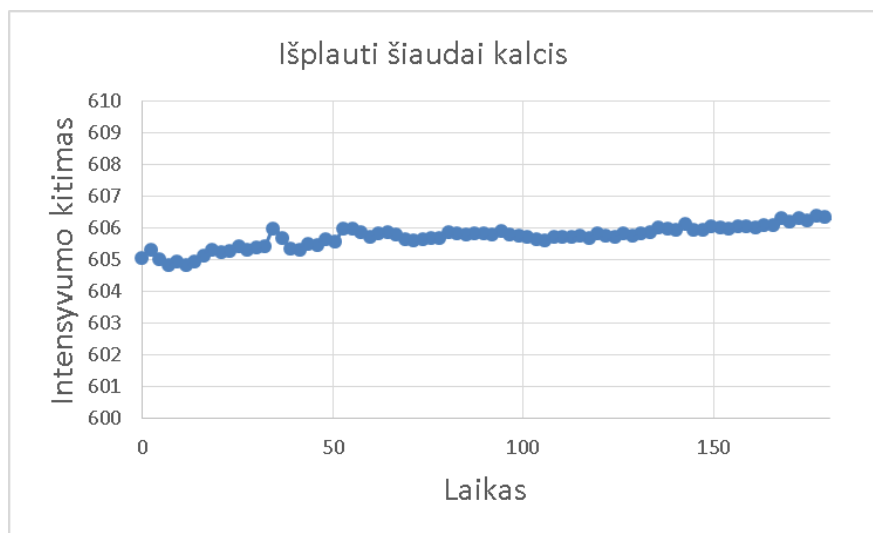
Natrio sąlyginai yra mažiau nei kitų cheminių elementų biokure. Šiauduose jo yra 21,18 mg/kg ir tai yra beveik 6 kartus daugiau nei medienos biokure. Tačiau iš 34 paveikslo grafiko, kuriame pavaizduoti neplautų šiaudų mėginių ir natrio filtro rezultatai, matyti, kad natrio išskyrimo intensyvumas kinta 604-607 rodiklio intervale viso bandymo metu. Palyginimui tokių pačių bandymų su mediena rezultatai (19 pav.) yra kitokie ir pastarajame grafike natrio intensyvumo pokytis kyla iki 615 (neplautų šiaudų natrio rezultatai kyla tik iki 607 intensyvumo rodiklio), o tai yra beveik dvigubai intensyviau. Toks cheminio elemento išskyrimas vyksta iki 75 s. laiko momento, o vėliau abu grafikai susilygina ir kreivės toliau išlieka panašios iki bandymo pabaigos.



34 pav. Neplautų šiaudų natrio filtro bandymų rezultatai

3.3.2.2 Išplautų šiaudų tyrimų rezultatai

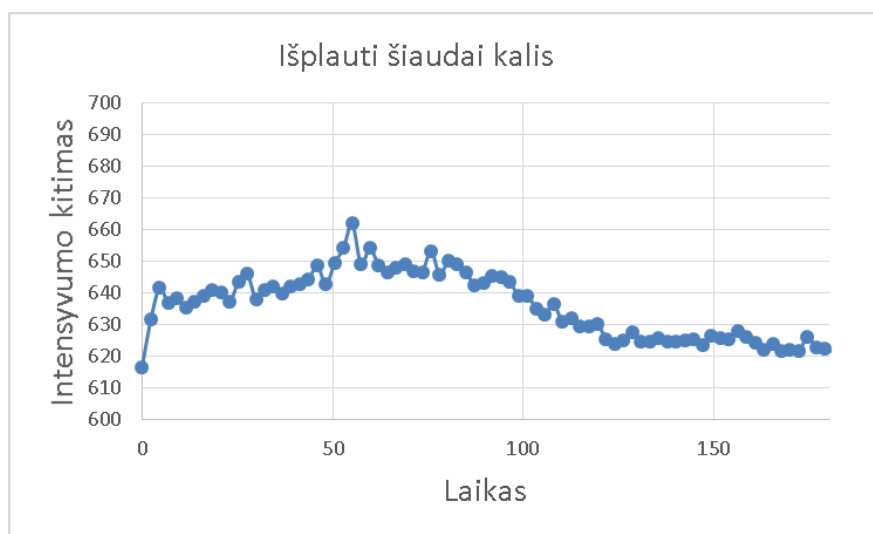
Išplautų šiaudų bandymų rezultatai pateikti 35-37 paveiksluose. Kalcio filtro bandymų, su šiuo biokuru, grafikas atvaizduotas 35 paveikslėlyje. Iš kreivės matyti, kad nuo bandymo pradžios, kai intensyvumo rodiklis 605, kalcio išskyrimas darosi vis intensyvesnis, tačiau nedideliu kiekiu. Tyrimo pabaigoje pasiekiamas beveik 607 intensyvumo rodiklis. Lyginant su neplautų šiaudų mėginių rezultatais (32 pav.) matomas šiek tiek didesni intensyvumo rodiklio kitimas, nors ir išplautuose mėginiuose nustatytas kalcio kiekis yra 20 kartų mažesnis. Lyginant su neplautos medienos (17 pav.) ir išplautos medienos (20 pav.) bandymais, rezultatas kelis kartus mažesnis, neplautos medienos degimo metu išskiriamas kalcio intensyvumas pasiekia 611 rodiklį, o išplautos medienos mėginių rezultatų grafike matyti iki 618 rodiklio kylantį grafiką.



35 pav. Išplautų šiaudų kalcio filtro bandymų rezultatai

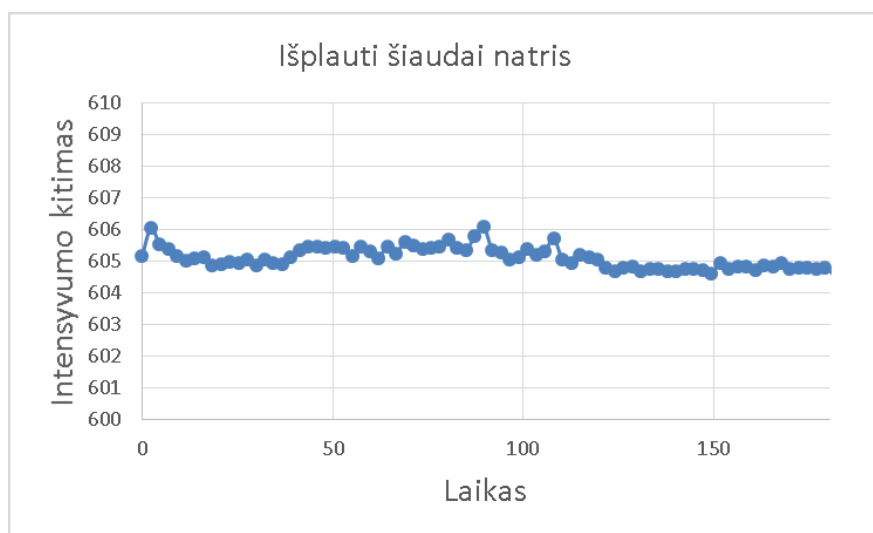
36 paveiksle pavaizduotas išplautų šiaudų kalio filtro rezultatų grafikas. Jame kreivė kyla nuo bandymo pradžios iki 55 s., kai pasiekiamas 664 intensyvumo rodiklis, toliau matyti rodiklio kritimas ir tyrimo pabaigoje grafikas nukrenta iki 620 intensyvumo.. Tokio pačio bandymo su neplautų šiaudų mėginių grafike (33 pav.), kur kalio yra net 6,9 karto daugiau, matoma panaši kreivė, tik intensyvesnis išskyrimas vyksta iki 115 s. laiko momento. Panašiai grafikas kinta ir su neplautos (18 pav.) bei

išplautos medienos (21 pav.) biokuro mėginiais, kur kalio išskyrimo intensyvumas maksimaliai kyla tik iki 680 rodiklio.



36 pav. Išplautų šiaudų kalio filtro bandymų rezultatai

Išplautų šiaudų natrio filtro bandymų rezultatai atvaizduoti 37 paveiksle. Grafike matyti, kad rezultatai viso bandymo metu kinta 1-2 rodiklio intervalo pokyčio skirtumu. Panašiai atrodo ir neplautų šiaudų (34 pav.) natrio bandymų rezultatai, nors išplautuose mėginiuose yra 2,6 karto mažiau natrio. Palyginimui neplautos medienos biokuro rezultatų kreivė nuo bandymo pradžios kyla ir didžiausią reikšmę 614 pasiekia ties 60s. ir toliau pradeda kristi. Išplautos medienos mėginių rezultatai kinta taip pat intensyviau nei išplautų šiaudų, intensyvesnis kitimas matomas nuo bandymo pradžios iki 75 s. Šiuo laiko tarpu kreivė svyruoja tarp 608 ir 611 intensyvumo rodiklio.

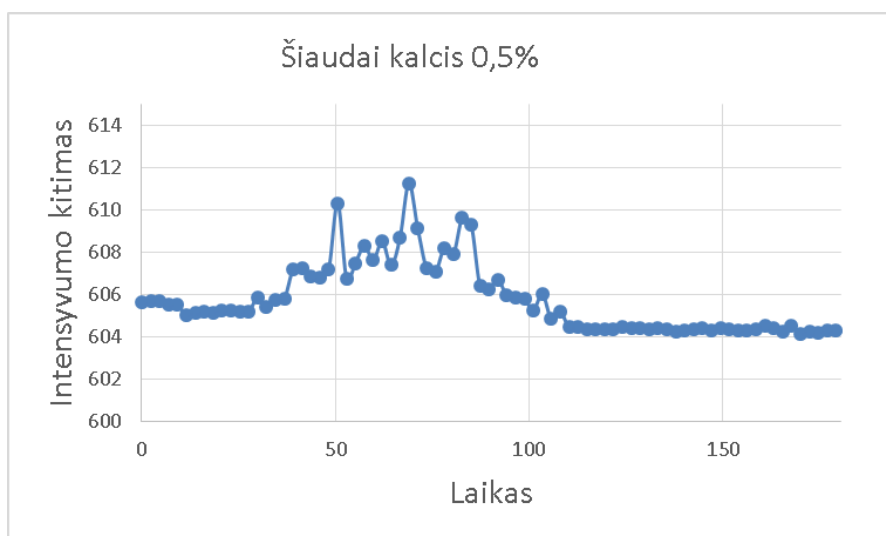


37 pav. Išplautų šiaudų natrio filtro bandymų rezultatai

3.3.2.3 Šiaudų prisotintų kalcium tyrimų rezultatai

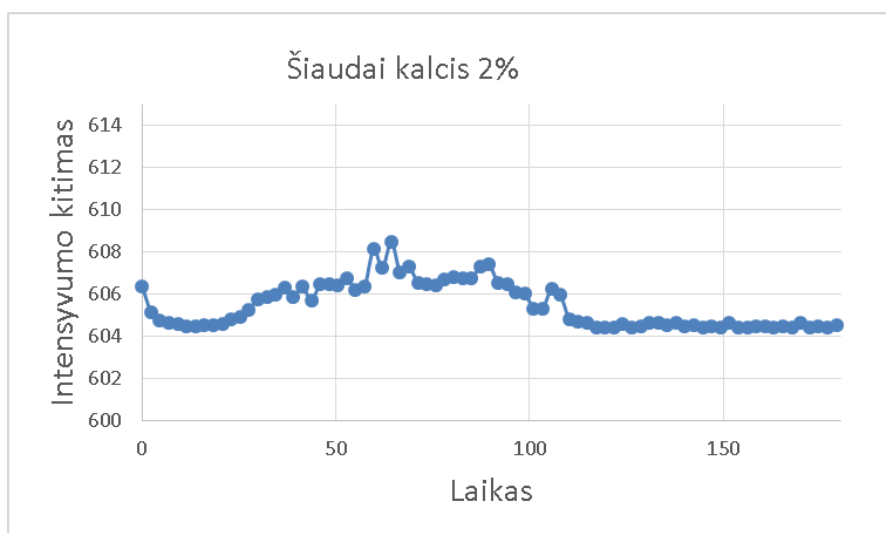
Kaip ir su medienos mėginiais, taip ir su šiaudais bandymai atlikti su kalcio, kalio ir natrio bei 0,5, 2 ir 5 proc. koncentracijų mėginiais. Šiaudų prisotintų 0,5 proc. koncentracijos kalcium bandymų rezultatų grafikas pavaizduotas 38 grafike. Iš grafiko matyti, kad kalcis neišskiriamas iki 35 s., nuo to laiko momento išskyrimo intensyvumas pradeda kilti ir ties 70 s. pasiekia didžiausią 612

intensyvumo rodiklį. Tada nuo 85 s. kreivė pradeda kristi ir ties 110 s. kreivė intensyvumo pokyčio neparodo. Skirtingai nuo medienos tos pačios koncentracijos ir to pačio cheminio elemento bandymų, šiauduose kalcis išskiriamas ganėtinai mažai, maksimali intensyvumo vertė 612, kai medienos bandyme maksimaliai pasiekta vertė grafike buvo 625. Taip pat iš grafikų matosi ir laiko momentu nuo bandymo pradžios iki 110 s. medienos mėginio rezultatuose pastebimi kelis kartus didesni intensyvumo pokyčiai.



38 pav. Šiaudų, prisotintų 0,5 proc. kalciumu, bandymų rezultatai

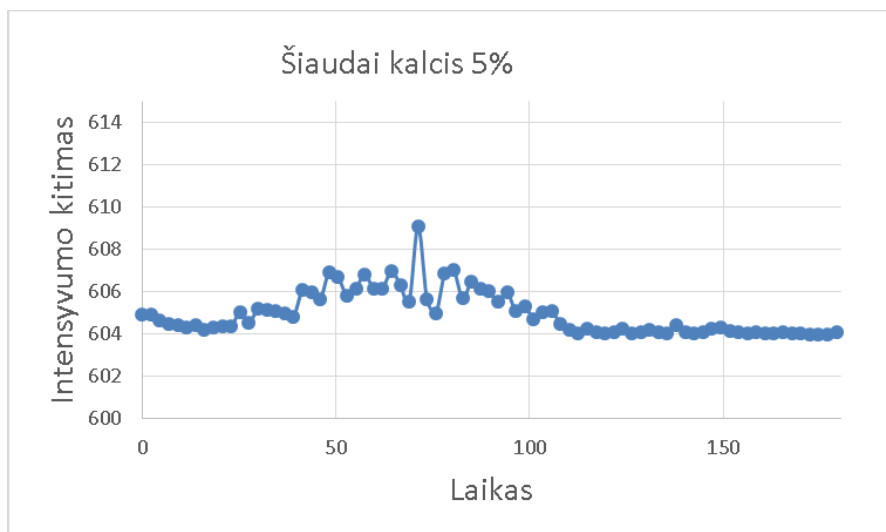
Bandymų su šiaudų prisotintų 2 proc. kalciumu rezultatai pateikti 39 paveiksle. Iš grafiko matyti, kad kalcio išskyrimo intensyvumo pokytis mažesnis nei su šiaudų prisotintų 0,5 kalcio koncentracijos mėginiais. Grafikas kaip ir ankstesnio bandymo kreivė pradeda kilti ties 35 s. ir didžiausią intensyvumo pokytį pasiekia ties 60s., o pokyčio pasiekta reikšmė 609. Grafikas svyruoja tarp 606 ir 608 vertės iki 90 s. ir pradeda kristi. Ties 110 s. kreivė krenta iki mažiausios intensyvumo vertės 605 bei iki bandymo pabaigos kitimų nematyti.



39 pav. Šiaudų, prisotintų 2 proc. kalciumu, bandymų rezultatai

40 paveikslo grafike atvaizduoti šiaudų prisotintų 5 proc. kalciumu bandymų rezultatai. Grafikas iš esmės atspindi panašią priklausomybę kaip ir 2 proc. koncentracijos mėginių bandymuose. Nuo 25 s. grafikas pradeda intensyvėti ir svyruoja tarp 606 ir 607 vertės, matomas vienas didesnis intensyvumo

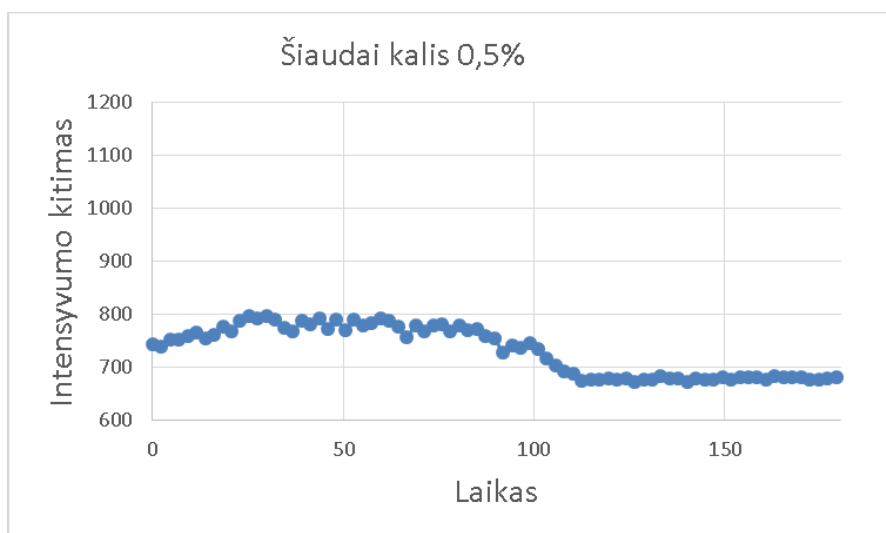
pakilimas ties 75 s., kai kreivė pasiekia 609 intensyvumo rodiklį. Toliau grafikas svyruoja tarp 605 ir 607 verčių ir ties 85 s. pradeda kristi. Laiko momentu 110 s. grafikas pasiekia žemiausią 604 intensyvumo kitimo rodiklį ir iki bandymo pabaigos pokyčių nematyti.



40 pav. Šiaudų, prisotintų 5 proc. kalciumu, bandymų rezultatai

3.3.2.4 Šiaudų prisotintų kaliumu tyrimų rezultatai

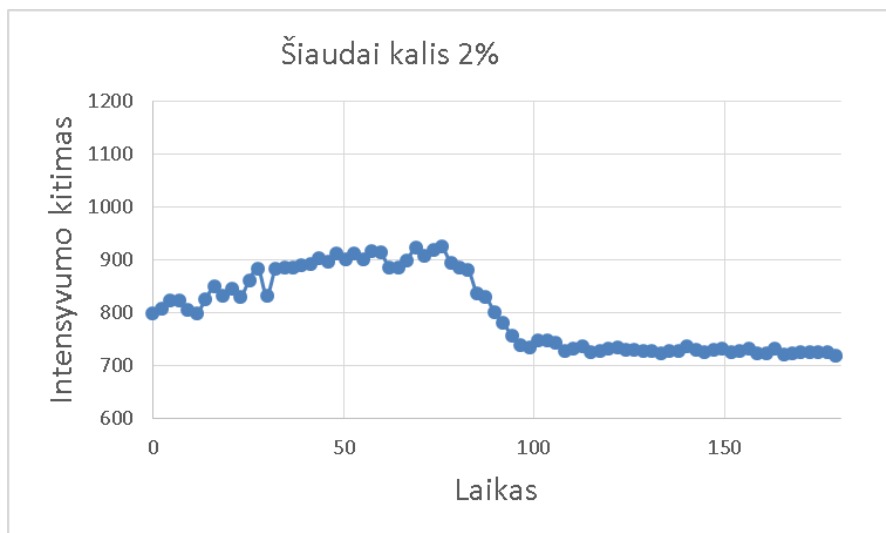
Šiaudų prisotintų kaliumu (0,5, 2 bei 5 proc. koncentracijomis) bandymų rezultatai atvaizduoti 41-43 paveiksluose. 41 paveikslėlyje kreivė vaizduoja 0,5 proc. koncentracijos kaliumu prisotinto šiaudų mėginių degimo metu išskiriama kalio intensyvumą. Nuo bandymo pradžios grafikas kyla ir ties 25 s. momentu pasiekia didžiausią reikšmę 800. Vėliau kreivė laikosi panašioje pozicijoje iki 75 s. laiko momento ir pradeda kristi. Ties 115 s. grafikas nusistovi ir iki bandymo pabaigos intensyvumo kitimas išlieka žemiausioje padėtyje. Lyginant su medienos, 0,5 proc. prisotintos kaliumu, bandymais šiaudų mėginiai cheminį elementą išskiria 2 kartus intensyviau viso tyrimo metu.



41 pav. Šiaudų, prisotintų 0,5 proc. kaliumu, bandymų rezultatai

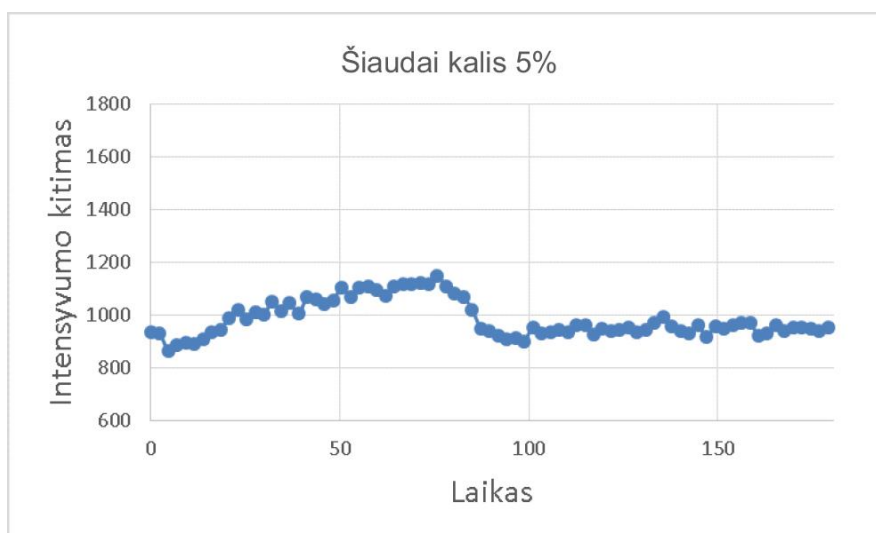
42 paveiksle pavaizduotas šiaudų, prisotintų 2 proc. kaliumu, mėginių tyrimo rezultatai. Iš grafiko matyti, kad šio cheminio elemento išskyrimas nuo bandymo pradžios iki 75 s., kai intensyvumo rodiklis siekia 930, laiko momento darosi vis didesnis. Tai yra beveik 2 kartus didesnis intensyvumas

nei 0,5 proc. koncentracijos mėginio didžiausia vertė. Toliau kreivė leidžiasi ir ties 100 s. nusistovi žemiausioje vertėje. Tokios pačios koncentracijos medienos mėginiai (27 pav.) kalį išskyrė neintensyviai (didžiausia vertė 720), o tai yra 3 kartus mažesnis intensyvumas nei šiaudų mėginių. Tačiau net ir šiaudų bandymo metu vertė, nusistovėjusi nuo 100 s., siekia 720 rodiklį. Tai parodo, kad viso bandymo metu cheminis elementas buvo išskiriamas intensyviau nei tokios pačios koncentracijos medienos mėginių tyrimo metu pasiekta didžiausia vertė.



42 pav. Šiaudų, prisotintų 2 proc. kaliu, bandymų rezultatai

5 proc. kalio koncentracija prisotintų šiaudų mėginių rezultatai pavaizduoti 43 paveiksle. Grafikas parodo intensyvumo kylimą nuo bandymo pradžios iki 75 s., pasiekta didžiausia vertė 1180. Tada kreivė krenta iki 850 vertės ties 100 s. laiko momentu ir iki bandymo pabaigos svyruoja tarp 850 ir 1000 intensyvumo rodiklio. Šis grafikas visai kitoks nei medienos tokios pačios koncentracijos mėginių, kurių rezultatai didžiąją dalį laiko laikėsi virš 1300 intensyvumo rodiklio.

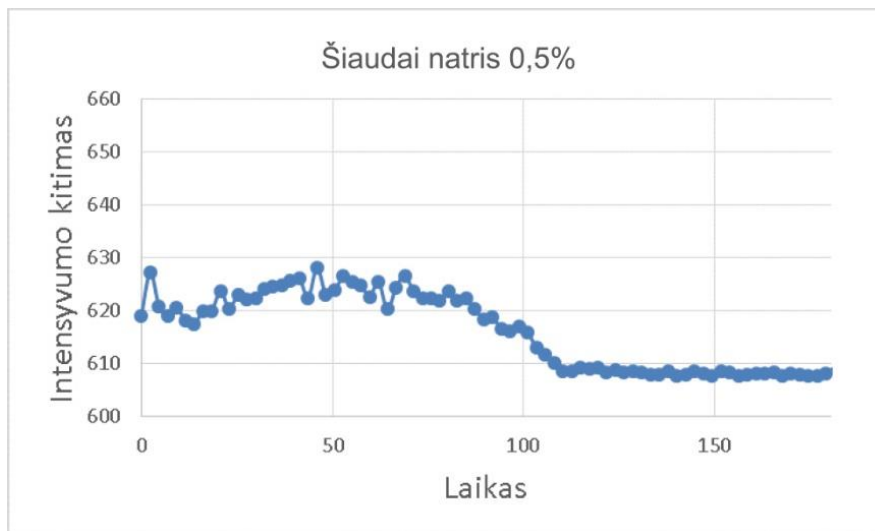


43 pav. Šiaudų, prisotintų 5 proc. kaliu, bandymų rezultatai

3.3.2.5 Šiaudų prisotintų natriu tyrimų rezultatai

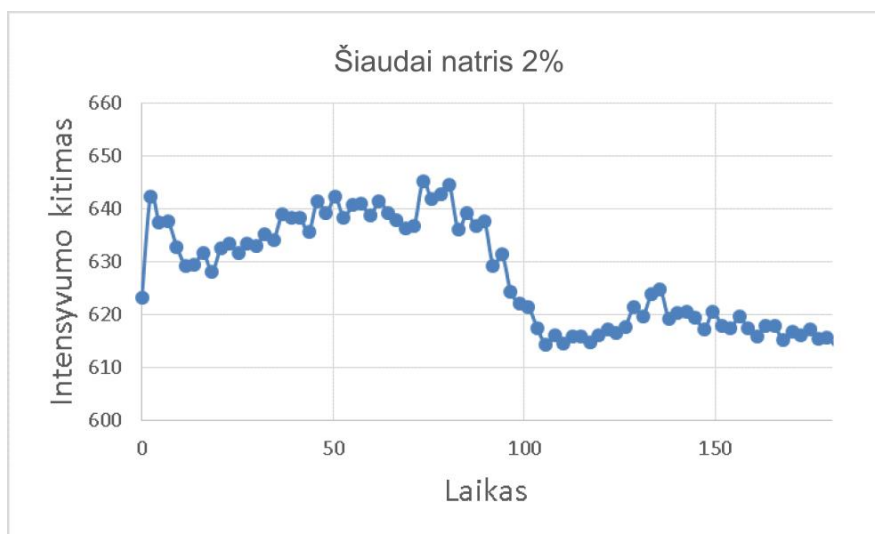
Šiaudų mėginiai taip pat buvo tiriami su papildomai prisotinamu natriu (0,5, 2 bei 5 proc. koncentracijomis). Šių bandymų rezultatai pateikti 44-46 paveiksluose.

Iš 44 paveikslėlio grafiko matyti, kad natrio išskyrimas vyksta vis intensyviau iki 45 s. kai pasiekia didžiausią 628 intensyvumo reikšmę. Tada grafikas svyruoja tarp 620 ir 628 rodiklio verčių iki 80 s. ir pradeda kristi, kol 110 s. pasiekiamas žemiausias intensyvumo reikšmė 609 bei grafikas nusistovi iki bandymo pabaigos. Medienos, prisotintos tos pačios koncentracijos natriu, mėginių rezultatai (29 pav.) atspindi panašią intensyvumo kitimo priklausomybę ir didesnių skirtumų negalima įžvelgti.



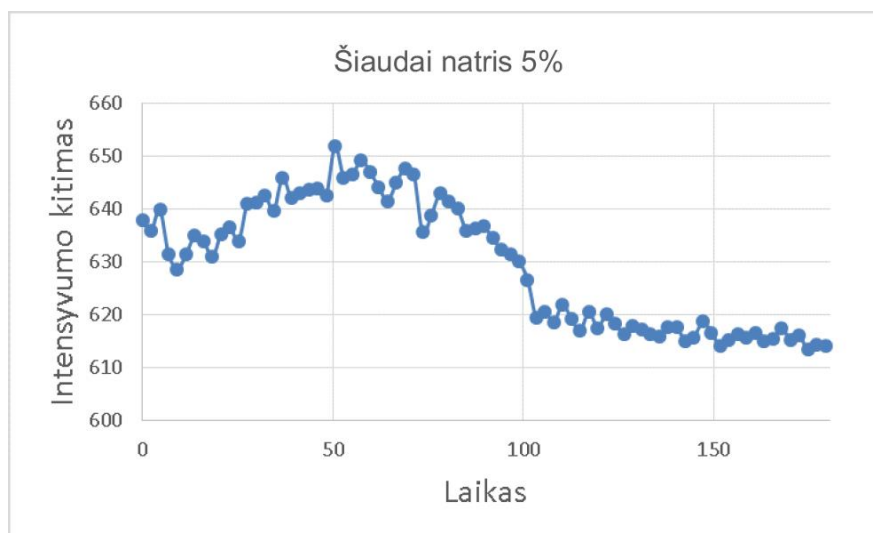
44 pav. Šiaudų, prisotintų 0,5 proc. natriu, bandymų rezultatai

Šiaudų, prisotintų 2 proc. natriu, tyrimų rezultatai pavaizduoti 45 paveiksle. Iš grafiko matosi, kad bandymo pradžioje natris išskiriamas intensyviai, o rodiklis viršija 640 zoną, tačiau iškart krenta ir 20 s. laiko momentu rodiklis yra 629. Tada kreivė vėl pradeda kilti ir 75 s. pasiekia didžiausią 646 intensyvumo reikšmę. Grafikas netolygiai pradeda kristi kol 105 s. pasiekiamas mažiausias 615 bandymo reikšmė. Kaip ir medienos, prisotintos tos pačios koncentracijos natriu, bandymų rezultatų, šiaudų tyrimo kreivė vėl rodo intensyvumo kilimą, tačiau medienos grafikas rodė vertės didėjimą iki bandymo pabaigos, o šiaudų bandymų grafikas kyla iki 135 s. (intensyvumo rodiklis 625) ir tada iki tyrimo pabaigos krenta bei pasiekia 616 reikšmę bandymo gale. Abu grafikai rodo panašų intensyvumą, tik šiaudų bandymų grafikas aukštą vertę išlaiko ilgiau bei turi keliais rodiklio vienetais didesnes didžiausias ir žemiausias vertes.



45 pav. Šiaudų, prisotintų 2 proc. natriu, bandymų rezultatai

46 paveiksle pavaizduotas šiaudų, prisotintų 5 proc. natriu, tyrimo grafikas. Kreivė nuo bandymo pradžios (kai pasiekiamas 640 intensyvumo rodiklis) krenta iki 629 rodiklio, bet tada pradeda kilti iki 652 vertės laiko momentu 50 s. ir tada pasiekiamas didžiausias kreivės vertė. Grafikas netolygiai pradeda kristi ir ties 105 s. kritimas, pasiekęs 620 rodiklį, tampa tolygesnis, bet ir iki pat bandymo pabaigos vertės krenta ir gale tyrimo pasiekiamas 614 taškas. Grafikas ganėtinai panašus į šiaudų, prisotintų 2 proc. natriu, kreivę, tik gale bandymo nėra intensyvumo kilimo. Tos pačios koncentracijos medienos tyrimo rezultatai (31 pav.) kitokie. Kreivė nors ir nekyla iki 650 intensyvumo vertės, bet bandymo eigoje pasiekiamas tik 620 žemiausia riba, o tada grafikas kyla ir vėl pasiekiamas maksimali vertė.



46 pav. Šiaudų, prisotintų 5 proc. natriu, bandymų rezultatai

3.4 Rezultatų apibendrinimas

Turint rezultatus reikalinga aptarti priklausomybes. Neplautų ir plautų medienos mėginių rezultatai parodė, kad kalcis neplautoje medienoje (748,57 kalcio mg/kg koncentracija) išskiriamas ilgesnį laiko tarpą nei deginant išplautos medienos (40,59 kalcio mg/kg koncentracija), o didžiausia intensyvumo vertė buvo pasiekta 611. Tačiau išvalytų mėginių bandymuose laiko momentu nuo 50 iki 70 s. cheminio elemento išskyrimo intensyvumas buvo kelis kartus didesnis (didžiausia vertė siekė 618) nei nevalytų mėginių.

Lyginant ir šiaudų biokurą, neplautų mėginių (2024,67 kalcio mg/kg koncentracija) rezultatai parodė, kad išskyrimo intensyvumas išlieka 604-606 intensyvumo rodiklio viso bandymo metu. Taip pat iš išplautų šiaudų mėginių (104,23 kalcio koncentracija mg/kg) grafiko matyti, kad cheminio elemento išskyrimo intensyvumas tyrimo metu kilo nuo 605 iki 607.

Medienos prisotintos kalciumu rezultatai parodė, kad visų koncentracijų (0,5,2 ir 5 proc.) mėginiuose cheminio elemento išskyrimas matyti panašiu laiko momentu nuo bandymo pradžios iki 110 s. Tačiau intensyvumas 0,5 proc. kalciumu prisotintuose mėginiuose buvo didžiausias didžiąją išskyrimo laiko dalį rodiklis svyravo tarp 614 iki 625, kai tuo tarpu 2 proc. mėginių rezultatuose intensyvumo kitimas svyruoja nuo 605 iki 614, o 5 proc. koncentracijos medienos bandymų grafike užfiksuotas rodiklio pokytis nuo 605 iki 612.

Šiaudų prisotintų ta pačia medžiaga ir tomis pačiomis koncentracijomis bandymų rezultatai parodė, kad 0,5 proc. koncentracijos mėginiai kalcij išskiria ribose nuo 604 iki 612. 2 proc. kalcio koncentracijos šiaudų mėginių grafikas kinta žemesnėse ribose – nuo 604 iki 608, o 5 proc. koncentracijos bandymuose dar mažiau 604-607 (vienas fiksuotas taškas grafike išsiskiria ir siekia 609).

Tiek medienos, tiek šiaudų, plautų ir neplautų, mėginių bandymai parodė, kad kalis juose išskiriamas žymiai intensyviau nei kalcio ar natrio. Neplautos medienos mėginių grafike matyti didžiausia 649 intensyvumo vertė (50 s.), tačiau taip aukštai išsilaiko tik iki 60 s. ir toliau iki pat bandymo pabaigos krenta žemyn. Išplautos medienos rezultatai parodė, kad grafikas kyla iki 680 intensyvumo, o nuo 75 s. kreivė krenta ir likusį laiką yra 630-40 ribose. Šiaudų mėginių rezultatais nustatyta dar didesnės reikšmės, neplautų mėginių grafikas kilo iki 687 intensyvumo didžiausios vertės, o išplautų mėginių iki 664.

Didesni kitimai fiksuojami prisotintuose mėginiuose. Medienos, prisotintos 0,5 ir 2 proc. kaliu, tablečių deginimo rezultatai atspindi panašų kitimą, kai kalis išskiriamas intensyviau laiko momentu nuo bandymo pradžios iki 110 s. ir intensyvumo rodiklis 0,5 proc. mėginių rezultatuose kinta tarp 660 ir 710 verčių, o 2 proc. tyrimai parodo intensyvumą tarp 680 ir 738 ribų. Tačiau medienos, prisotintos 5 proc. kaliu, grafikas parodė didelį kalio išskyrimo intensyvumą, nuo bandymo pradžios grafikas kyla iškart nuo 850 ribos ir ties 40 s. pasiekia 1600 intensyvumo kitimo ribą, toliau kreivė svyruoja tarp 1350 ir 1750 ribų iki pat bandymo pabaigos.

Šiauduose, prisotintuose kalio, kitimai dar kitokie. 0,5 proc. koncentracijos šiaudų mėginių deginimo metu pastebimas intensyvesnis kitimas nuo bandymo pradžios iki 110 s., o intensyvumo rodiklis svyruoja tarp 750 iki 800. 2 proc. koncentracijos bandinių grafike matyti kiek didesnis kalio išskyrimas, kuris vyksta nuo tyrimo pradžios iki 95 s. laiko momento, ir kreivė svyruoja tarp 750 ir 925 kitimo rodiklio, vėliau grafikas nusistovi ties 720 verte. Tačiau 5 proc. koncentracija prisotintų šiaudų mėginių deginimo metu matyti didesnis kitimas, kuris vyksta nuo 0 s. iki 80 s. laiko momento ir kyla nuo 825 iki 1180 rodiklio. Taip pat pastebimas kitos nuo kitų bandymų rezultatas bandymo pabaigoje, kadangi kreivė nuo 85 s. iki bandymo pabaigos svyruoja tarp 850 ir 1000 ribų.

Neplautoje medienoje yra 3,63 mg/kg natrio, o išplautoje medienoje 0,64 mg/kg. Neplautos medienos natrio filtro grafikas parodė, kad šis cheminis elementas išskiriamas intensyviau laiko momentu nuo bandymo pradžios iki 70 s., o intensyvumas svyruoja nuo 608 iki 614. Vėliau kreivė iki pat bandymo pabaigos beveik tiesiškai leidžiasi žemyn ir gale pasiekia 604 rodiklį. Išplautos medienos bandymo grafikas su natrio filtru rodo panašius rezultatus, tik intensyvumo kitimo ribos nuo bandymo pradžios iki 65 s. laiko momento svyruoja nuo 606 iki 611, o toliau grafikas, kaip ir neplautos medienos rezultatuose, smunka žemyn bei 110 s. pasiekia 604 intensyvumo vertę bei toks išlieka iki bandymo pabaigos. Didesni intensyvumo kitimai fiksuojami natriu prisotintuose medienos mėginių tyrimuose. 0,5 proc. koncentracijos bandymo grafikas nuo bandymo pradžios, kai intensyvumo vertė 610, kyla iki 624 (didžiausia bandymo vertė). Ties 105 s. grafikas nusistovi žemiausioje bandymo vertėje 608 ir svyruodamas mažiau nei 1 vertės skirtumu išlieka toks pat iki bandymo pabaigos. Didesni skirtumai matomi 2 proc. natrio koncentracijos medienos bandymuose. Grafikas bandymo pirmoje pusėje (0 – 80 s.) svyruoja tarp 625 ir 640 verčių. Toliau kreivė krenta ir 105 s. pasiekia žemiausią ribą 610, tačiau ir vėl pradeda kilti, ir kylantis intensyvumas fiksuojamas iki bandymo pabaigos (620 vertė). Panašus grafikas matomas ir medienos, prisotintos 5 proc. natriu, tik pirmoje bandymo dalyje kreivė svyruoja tarp 630 ir 646 intensyvumo kitimo ribų, o žemiausia nustatyta vertė matoma ties 100 s.

laiko momentu 620. Kaip ir 2 proc. koncentracijos bandymo metu fiksuoti rezultatai, taip ir šiuose matomas intensyvumo didėjimas antroje bandymo dalyje (nuo 100 s. iki bandymo pabaigos) ir kreivė kyla net iki 642 vertės prieš pat bandymo pabaigą.

Neplautų šiaudų mėginiuose yra 21,18 mg/kg natrio koncentracija. Tačiau nors ir natrio koncentracija didesnė nei neplautos medienos mėginiuose, tyrimo rezultatų grafikas rodo, kad neplautų šiaudų bandymų metu natriis išskiriamas pastoviu 604-607 vertės intensyvumu. Išplautų šiaudų natrio koncentracija yra 8,18 mg/kg, o rezultatų kreivė praktiškai tokia pati kaip ir neplautų šiaudų bandymų rezultatų grafikas. Kaip ir medienos bandymuose su natriu, taip ir šiaudų tyrimų rezultatai atrodo kitaip prisotintuose mėginiuose. Šiaudų, prisotintų 0,5 proc. natrio koncentracija, grafikas rodo cheminio elemento išskyrimo intensyvumą 619-629 ribose, nuo bandymo pradžios iki 85 s. laiko momento, tada grafikas krenta ir ties 110 s. nusistovi ties 609 verte. Skirtingi rezultatai matomi 2 proc. natrio koncentracijos šiaudų degimo metu išskiriamo natrio intensyvumo grafike. Kreivė svyruoja didesniuose intervaluose (629-648) laiko tarpe nuo bandymo pradžios iki 80 s., o toliau krenta ir ties 105 s. laiko momentu intensyvumo kitimo vertė 615, tačiau grafikas vėl pradeda kilti pasiekia 625 ribą 140 s. laiku ir pradeda kristi iki pat bandymo pabaigos kai vertė 616. Dar kitokia priklausomybė matoma 5 proc. natrio koncentracijos šiaudų tyrimo rezultatuose. Grafikas nuo bandymo pradžios pakyla iki 652 intensyvumo vertės 50 s. laiko momentu ir pradeda kristi netiesiškai, kol pasiekia 620 ribą 103 s. laiko momentu. Toliau kreivė rodo kritimą, kuris labiau panašus į tiesinį, ir bandymo pabaigoje intensyvumo kitimo vertė 614.

Iš šių rezultatų galima teigti, kad kalcis degimo metu išskiriamas intensyviau, kai jo koncentracija medžiagoje yra mažesnė, o taip pat priklauso ir nuo medžiagos tipo. Medienos mėginiai išskiria santykinai daugiau kalcio, nei šiaudų mėginiai. Tačiau tokia priklausomybė kertasi su logikos dėsniais, nes esant didesnėms kalcio koncentracijoms biokure, turėtų būti didesnės emisijos, o ne priešingai, kaip gauti rezultatai.

Priešingai atrodo kalio bandymų rezultatai. Neplautų ir išplautų mėginių (tiek medienos, tiek šiaudų) rezultatai parodė, kad kalio intensyvumas yra gerokai didesnis nei natrio ir kalcio ir didžiausios išsiskyrimo vertė pasiekta su neišplautų šiaudų mėginiais – 687 intensyvumo vertė. 0,5 proc. koncentracijos bandymai atvaizdavo šiek tiek didesnę intensyvumą – didžiausios vertės 710 (medienos) ir 800 (šiaudų). 2 proc. koncentracijos bandymų grafikai parodė dar didesnę išskyrimą – 738 (medienos) ir 925 (šiaudų) didžiausios vertės, o 5 proc. koncentracijos medienos bandymų kreivė kyla net iki 1700 ir didelis intensyvumas matomas viso tyrimo metu. Tačiau šiaudų, kuriuose yra 5 proc. kalio koncentracija, išskyrimas kilo tik iki 1180 intensyvumo vertės bei nuo 75 s. pradėjo kristi ir likusią tyrimo dalį laikėsi 900 ir 1000 verčių ribose.

Natrio išskyrimo priklausomybės skiriasi visuose koncentracijų bandymuose. Neplautuose ir plautuose šiauduose šio cheminio elemento išskyrimo intensyvumas kinta nežymiai viso bandymo metu (604-607 vertės). Neplautoje ir išplautoje medienoje natrio išskyrimas vyksta kiek intensyviau ir kinta ribose nuo 604 iki 614. Galima teigti, kad natrio išskyrimo intensyvumo priklausomybė priklauso nuo kiekio medžiagoje, tačiau viršijus 2 proc. koncentraciją rezultatai lieka panašūs. Tarp medienos ir šiaudų mėginių matyti tik vienas skirtumas, kad 2 ir 5 proc. natrio koncentracijų mėginių deginimo metu bandymo pabaigoje medienos grafikai pradeda kilti, o šiaudų kreivės kristi.

4 Išvados

1. Rezultatais nustatyta, kad kalcio emisija didesnė, kai šio cheminio elemento kure yra mažiau. Neplautos medienos mėginiuose šio šarminio elemento išskiriama mažiau nei išplautos medienos bandymuose, atitinkamai didžiausios intensyvumo reikšmės 611 ir 618. Tokia priklausomybė matoma ir 0,5, 2 bei 5 proc. koncentracijos bandymuose, kur daugiausia kalcio išskiriama 0,5 proc. tyrime (didžiausia reikšmė 625), 2 proc. mažiau (614 reikšmė) ir 5 proc. mažiausiai (612). Panašiai ir su šiaudų mėginiais, tik pirminiuose neplautuose šiauduose kalcio yra daugiau 2024,67 mg/kg, lyginant su 748,57 mg/kg medienos biokure, o išplauto mėginio 104,23 mg/kg šiaudų biokure. Todėl nevalytų ir išvalytų šiaudų deginimo bandymų metu cheminio elemento išskyrimo praktiškai nematyti. Koncentruotų šiaudų biokuro rezultatais nustatyta : 0,5 proc. koncentracijos mėginiuose didžiausia intensyvumo reikšmė 612, 2 proc. 608, o 5 proc. mėginių intensyvumas vienu momentu siekia 609, tačiau tai galimai yra atsitiktinumas, nes grafikas bandymo metu tik vienu momentu pakyla iki tokios reikšmės, o visu kitu laiku kinta ribose tarp 605 ir 607.

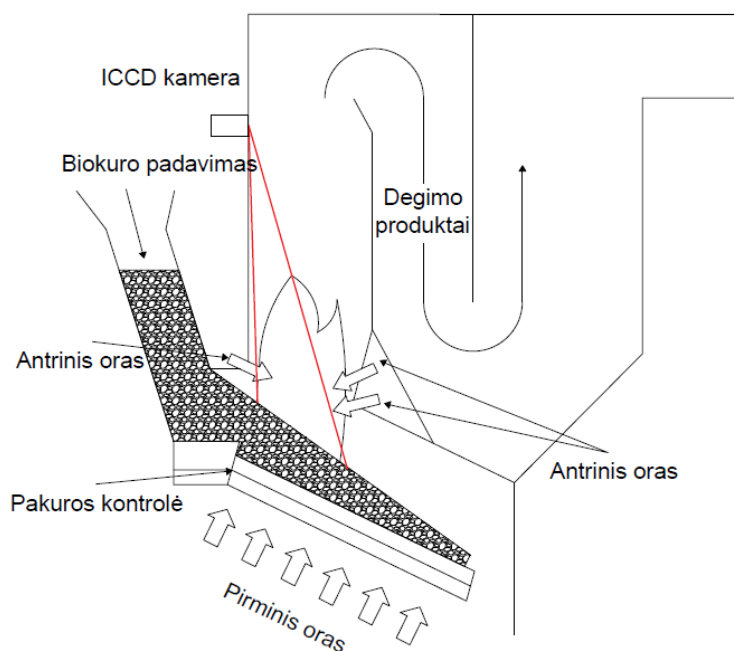
2. Logiškai kalcio emisija turėtų būti didesnė, kai šio cheminio elemento biokure yra daugiau. Rezultatais nustatyta, kad šiaudų ir medienos bandymai, naudojant kalcio filtrą, parodė priešingas logikai priklausomybes. Tai galėjo nutikti dėl to, kad gaminant mėginius, šie nepilnai įsisavino cheminį elementą. Todėl šie rezultatai nepriimtini, paliekant galimybę bandymus pakartoti tikslesniam rezultatų nustatymui ateityje.

3. Nustatyta, kad kalio išskyrimo intensyvumas yra kelis kartus didesnis nei natrio ar kalcio intensyvumas. Neplautos medienos mėginių grafike matyti didžiausia 649 vertė, išplautos medienos – 680. 0,5 ir 2 proc. koncentracijos medienos mėginių rezultatais nustatytos atitinkamai 710 ir 738 vertės, o 5 proc. grafikas rodo didelį intensyvumo šuolį ir kreivė kyla iki 1750 vertės. Šiaudų mėginių rezultatais nustatyta dar didesnės reikšmės, neplautų mėginių grafikas kilo iki 687 intensyvumo didžiausios vertės, o išplautų mėginių iki 664. Intensyvėjantį kalio išskyrimą matyti ir 0,5, 2 bei 5 proc. koncentracijos šiaudų mėginiuose, atitinkamai didžiausios intensyvumo reikšmės 810, 950 ir 1180.

4. Natrio neplautame biokure yra santykinai mažiau nei kalio ar kalcio (palyginimui abiejų tipų biokure natrio yra nedaugiau kaip 22 mg/kg, o kitų elementų nemažiau nei 100 mg/kg ir net iki 9200 mg/kg). Iš gautų rezultatų matoma, kad natriis išskiriamas intensyviau, kai jo biokure yra daugiau. Medienos kuro bandymų rezultatai : neplauto mėginio didžiausia intensyvumo reikšmė - 614, išplauto – 611, 0,5 koncentracijos mėginio – 624, 2 proc. koncentracijos – 640 ir 5 proc. koncentracijos 646. Šiaudų biokuro rezultatais, kuriuose bandymai atlikti su natrio filtru, nustatyta, kad neišplauta ir išplauta biomasė išskyrė šį cheminį elementą 604-607 intensyvumo ribose. Koncentruotų mėginių rezultatai turi panašią priklausomybę kaip ir medienos bandymai, o pasiektos didžiausios intensyvumo reikšmės : 0,5 koncentracijos – 629, 2 proc. koncentracijos – 648, 5 proc. koncentracijos – 652.

5 Rekomendacijos

Pagal nustatytas cheminių elementų išsiskyrimo vertes, galima ICCD kamerą pritaikyti biokuro katilinėms. Kamera katilinėje turėtų būti sumontuota taip, kad ji fiksuotų tik ugnies vaizdus ir degimo produktai į fiksavimo ribas nepatektų. Rekomenduojamas įrenginio įtvirtinimas pavaizduotas 47 paveiksle.



47 pav. ICCD kameros rekomenduojama vieta katilinėje.

Kamera realiu laiku fiksuodama padidėjusį šarminių elementų išsiskyrimą, persiunčiamu signalu informuotų biokuro tiekimo aparatą, kuris į pakurą turėtų pateikti koreguotą kurą, t.y. į pagrindinį kurą būtų įmaišoma išvalyto biokuro (kalio ir natrio atveju), kad cheminių elementų koncentracijos sumažėtų ir emisijos nebūtų didelės. Kalcio emisijos atveju reiktų pateikti kurą su didesne šio šarminio elemento koncentracija kure, kad degimo proceso metu kalcio emisija būtų mažesnė.

Alternatyvus variantas galimas, kamrai fiksuojant netinkamas emisijos rezultatus pakuroje, įpurkšti atitinkamų tirpalų, priklausomai nuo to, kurio cheminio elemento (kalcio, kalio ar natrio) išskiriama per daug. Taip pat, galima ir koreguoti degimo temperatūrą, tai taip pat reiktų daryti taip, kad nebūtų patiriama katilinės efektingumo nuostolio, o šarminių metalų emisija būtų mažesnė.

Katilinėje papildomai sumontuojant ICCD kameros įrenginius ir juos prijungus prie automatikos aparatų, galima prailginti katilo ilgaamžiškumą.

Literatūros sąrašas

1. Kavita Parmar. *Biomass - An Overview on Composition Characteristics and Properties* [interaktyvus]. 2017. [Žiūrėta 2019-03-11]. DOI 10.21013/jas.v7.n1.p4. Prieiga per Researchgate.
2. Yu C, Zhang W. *Modeling Potassium Release in Biomass Pyrolysis. Progress in Thermochemical Biomass Conversions* [interaktyvus]. 2008. pp. 1107-1115. [Žiūrėta 2019-06-12]. DOI 10.1002/9780470694954.ch89. Prieiga per Researchgate.
3. *Database for biomass and waste* [interaktyvus]. [Žiūrėta 2019-06-12]. Internetinė prieiga <https://phyllis.nl/> (wheat straw (#3161); bark, pine (#1268); peat (A), Young surface peat (#1277); bamboo sawdust char (#2823))
4. H. Fatehi, Z. S. Li, X. S. Bai ir M. Alden. *Kinetics of alkali metal release during biomass pyrolysis. Proceedings of the Combustion Institute*. [interaktyvus]. 2016. [Žiūrėta 2019-06-11] DOI 10.1016/j.proci.2016.06.079.
5. Peter Sommersacher, Norbert Kienzl, Thomas Brunner ir Ingwald Obernberger. *Simultaneous Online Determination of S, Cl, K, Na, Zn, and Pb Release from a Single Particle during Biomass Combustion. Part 1: Experimental Setup–Implementation and Evaluation* [interaktyvus]. 2015. [Žiūrėta 2019-03-11] . DOI 10.1021/acs.energyfuels.5b00621.
6. Wenhan Cao, Jun Li, Leo Lue ir Xiaolei Zhang. *Release of alkali metals during biomass thermal conversion. Archives of Industrial Biotechnology* [interaktyvus]. 2016, t. 1, pp. 1-3. [Žiūrėta 2019-05-28] Internetinė prieiga <https://strathprints.strath.ac.uk/59501/>
7. Jacob N. Knudsen, Peter A. Jensen ir Kim Dam-Johansen. *Transformation and Release to the Gas Phase of Cl, K, and S during Combustion of Annual Biomass* [interaktyvus]. 2004. [Žiūrėta 2019-06-11]. DOI 10.1021/ef049944q.
8. Yanfen Liao, Shumei Wu, Tuo Chen, Yawen Cao, Xiaoqian Ma. *The alkali metal characteristic during biomass combustion with additives. Energy Procedia* [interaktyvus]. 2015, t. 75, pp. 124-129. [Žiūrėta 2019-03-11]. DOI 10.1016/j.egypro.2015.07.209. Prieiga per Science Direct.
9. Yanqing Niu, Houzhang Tan ir Shi'en Hui. *Ash-related issues during biomass combustion: Alkali-induced slagging, silicate melt-induced slagging (ash fusion), agglomeration, corrosion, ash utilization, and related countermeasures. Progress in Energy and Combustion Science* [interaktyvus] 2016, t. 52, pp. 1-61, [Žiūrėta 2019-03-11]. DOI 10.1016/j.peccs.2015.09.003. Prieiga per Researchgate.
10. Philip James Geddis. *Evaluation of chemiluminescence as a measurement option for industrial flame monitoring and process control*. Toronto, 2009.

11. Ines P.A. Morais, Ildiko V. Toth ir Antonio O.S.S Rangel. *An overview on flow methods for the chemiluminescence determination of phosphorus*. *Talanta* [interaktyvus] 2015, t. 66, nr. 2, pp. 341-347, [žiūrėta 2019-06-12]. DOI 10.1016/j.talanta.2004.10.007. Prieiga per Science Direct.
12. *TC-08 termoporos techninis aprašas* [interaktyvus]. [Žiūrėta 2019-12-15]. Internetinė prieiga <https://www.picotech.com/data-logger/tc-08/thermocouple-data-logger>
13. *ICCD kameros techninis aprašas* [interaktyvus]. [Žiūrėta 2019-12-15]. Internetinė prieiga <https://stanfordcomputeroptics.com/technology/iccd-system-overview.html>
14. *ICCD kamerų brošiūra naudojimuisi* [interaktyvus]. [Žiūrėta 2019-12-15]. Internetinė prieiga <https://stanfordcomputeroptics.com/download/ICCD-camera-brochure.pdf>
15. *ICCD kameros veikimo principas* [interaktyvus]. [Žiūrėta 2019-12-15]. Internetinė prieiga <https://andor.oxinst.com/learning/view/article/intensified-ccd-cameras>

Priedai

1 Priedas. Elektromagnetinis spektras. Antroje eilutėje išskirtas matomas žmogaus akiai spektras.

