



Kauno technologijos universitetas

Cheminės technologijos fakultetas

**Medienos kompozitų atliekų panaudojimo energijos
gamybai vertinimas**

Baigiamasis magistro projektas

Simonas Blauzdys

Projekto autorius

Doc. Violeta Kaunelienė

Vadovė

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Cheminės technologijos fakultetas

Medienos kompozitų atliekų panaudojimo energijos gamybai vertinimas

Baigiamasis magistro projektas

Aplinkosaugos inžinerija (6211EX003)

Simonas Blauzdys

Projekto autorius

Doc. Violeta Kaunelienė

Vadovė

Dr. Edvinas Krugly

Recenzentas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Cheminės technologijos fakultetas

Simonas Blauzdys

Medienos kompozitų atliekų panaudojimo energijos gamybai vertinimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Simono Blauzdžio, baigiamasis projektas tema „Medienos kompozitų atliekų panaudojimo energijos gamybai vertinimas“ 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)

Blauzdys Simonas. Medienos kompozitų atliekų panaudojimo energijos gamybai vertinimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. Violeta Kaunelienė; Kauno technologijos universitetas, Cheminės technologijos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų kryptių grupė): Aplinkos inžinerija (E03), Inžinerijos mokslai (E).

Reikšminiai žodžiai: medienos kompozitai, dujiniai teršalai, tarša, pramoninis katilas, buitinis katilas, geras degimas, blogas degimas.

Kaunas, 2020. 72 p.

Santrauka

Magistro baigiamajame projekte yra nagrinėjamos medienos kompozitų atliekų panaudojimo galimybės energijai gaminti. Mediena yra viena iš plačiausiai naudojamų žaliavų pasaulyje, o tai lemia greitą miškų nykimą visoje planetoje, todėl šiai problemai spręsti gali būti taikoma medienos kompozitų alternatyva. Šie kompozitai yra ilgiau išsilaikantys ir jų matmenys yra stabilesni, taip pat jiems reikia mažiau priežiūros, juos yra lengviau transportuoti ir montuoti, nei įprastą medieną. Pagrindinė medienos kompozitų naudojimo problema – tai susidarantis atliekų perteklius medienos apdirbimo įmonėse, kuris patenka į sąvartynus. Medienos kompozitų atliekų deginimas šiluminei energijai išgauti, galėtų būti išeitis šioje situacijoje, bet dėl nepakankamo taršos reglamentavimo šiuo atveju, yra būtina išsiaiškinti apie galima pavojingų teršalų išsiskyrimą.

Literatūros apžvalgoje apžvelgiamas medienos bei panaudotos medienos klasifikavimas ir naudojimas ES šalyse, teršalų išsiskyrimas deginant medienos kompozitus ir jų teisinis reglamentavimas. Medienos ir jos kompozitų atliekos, kuriose nėra konservantų bei organinių chloro junginių ir sunkiųjų metalų kiekis neviršija nustatytų ribų, yra leidžiamos deginti energijos gamybai visose nagrinėtose šalyse (Vokietija, Jungtinė Karalystė, Nyderlandai, Suomija), tačiau deginimui apibrėžiama minimali katilo galia. Remiantis literatūros apžvalga, eksperimentiniams tyrimams naudoti ėminiai suklasifikuojami į 6 klases (01, 02, A, B1, B2, B3/C).

Eksperimento metu buvo tiriami degimo produktai, išsiskiriantys deginant natūralią neapdorotą medieną ir įvairiomis dangomis dengtas medienos apdirbimo liekanas. Medienos kompozitų deginimo tyrimai buvo atlikti dviejuose skirtinguose stenduose: pramoniniame biokuro katile (galia 30 kW) ir buitiniame granuliniame katile „Kalvis“ – 17 (galia 13 kW). Tyrimų metu, pramoniniame katile prie dviejų degimo režimų (geras ir blogas) buvo deginamos beveik visos kuro rūšys, išskyrus malkas, neapdorotą MDP ir medienos plokščių atliekų granules. Buitiniame katile buvo deginamos tik pirmos, antros ir A klasės kuro rūšys (natūrali mediena ir neapdoroti kompozitai). Medienos kompozitų deginimo metu, dujinės fazės teršalų koncentracijoms išmatuoti buvo naudojami trys įrenginiai: dujinių degimo produktų analizatorius „Gasmel“, degimo produktų komponentų analizatorius „Multilyzer NG“ ir optinis kietųjų dalelių koncentracijos matavimo prietaisas „Afriso STM 225“.

Tyrimų metu gauti rezultatai parodė, kad didžiajai daliai tirtų teršalų deginimo technologija buvo svarbiausias veiksnys. Esant blogam degimui, didėja anglies monoksido, organinių junginių (angliavandenilių), kietųjų dalelių koncentracijos. Buitiniame katile visų junginių koncentracijos buvo aukštesnės, palyginus su pramoninio katilo stende gautomis koncentracijomis. Buitiniame katile CO koncentracijos siekia virš 20 000 mg/m³. Pramoniniame katile išmatuotos NO_x koncentracijos

buvo didesnės nei buitiniame katile – esant pilno degimo režimui siekė $> 1600 \text{ mg/m}^3$. Didelius NO_x kiekius nulemia medienos kompozitai (kaširuota MDP ir MDP su HPL danga) savo sudėtyje turintys azoto. Rezultatai parodė, kad medienos kompozitų sudėtyje esanti siera ir chloras daro įtaką atitinkamų teršalų susidarymui (SO_2 , HCl). SO_2 koncentracijos abiejuose katiluose esant skirtingiems režimams, svyruoja iki 200 mg/m^3 . Druskos rūgšties koncentracija yra nedidelė deginant kurą abiejuose katiluose – siekia iki 9 mg/m^3 .

Remiantis tyrimų rezultatais, darbe pateikiamos rekomendacijos ir išvados dėl galimybių deginti medienos kompozitus šilumos energijai išgauti. Buitiniame katile rekomenduojama uždrausti deginti medienos kompozitus, nes nėra sudaromos geros degimo sąlygos ir yra aukštos teršalų koncentracijos. Pramoniniuose katiluose užtikrinus tinkamas degimo sąlygas, galima deginti medienos kompozitus, kuriuose nėra konservantų bei organinių chloro junginių ir sunkiųjų metalų kiekis neviršija nustatytų ribų.

Blauzdys, Simonas. Evaluation of Engineered Wood Waste Use for Energy Production. Master 's Final Degree Project / supervisor doc. Violeta Kaunelienė. The Faculty of Chemical Technology, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Environmental Engineering (E03), Engineering Sciences (E).

Keywords: wood composites, gaseous pollutants, pollution, domestic boiler, industrial boiler, complete and incomplete combustion.

Kaunas, 2020. 72 p.

Summary

The master's final project analyzes the possibilities of using engineered wood waste for energy production. Wood is one of the most widely used raw materials in the world, leading to rapid deforestation across the planet, so wood composites could be used as an alternative to address this problem. These composites are longer lasting and have more stable dimensions, require less maintenance and are easier to transport and install than regular wood. The main problem with the use of wood composites is the resulting excess waste generated in wood processing companies, which ends up in landfills. Incineration of wood composite waste for thermal energy recovery could be a solution in this situation, but due to insufficient regulation of pollution, in this case, it is necessary to find out about the possible release of hazardous pollutants.

The literature review shows the classification and use of wood and used wood in EU countries, the emission of pollutants from the burning of wood composites and their legal regulation. Engineered wood waste, which do not contain preservatives and organochlorine compounds and heavy metals do not exceed the established limits, are allowed to be incinerated for energy production in all countries studied (Germany, United Kingdom, Netherlands, Finland), but the minimum boiler capacity is defined for incineration. Based on a review of the literature, the samples, used for the experimental research, are classified into 6 classes (01, 02, A, B1, B2, B3/C).

During the experiment, combustion products, released through the combustion of natural untreated wood and wood processing residues coated with various coatings, were investigated. The research of wood composite combustion was performed in two different stands: in the industrial biofuel boiler (power 30 kW) and in the household pellet boiler "Kalvis" – 17 (power 13 kW). During the research, almost all types of fuel were burned in the industrial boiler at 2 combustion modes (good and bad), except firewood, raw MDP and wood panel waste pellets. Only classes 1, 2 and A fuels (natural wood and untreated composites) were burned in the domestic boiler. During the combustion of wood composites, three devices were used to measure the concentrations of gaseous pollutants: Gasmeter gas combustion product analyzer, Multilyzer NG combustion product component analyzer, Afriso STM 225 optical particle concentration measuring device.

The results obtained during the research showed that the combustion regimes have a significant influence on the results received. Concentrations of carbon monoxide, organic compounds (hydrocarbons) and particulate matter increase during bad combustion. In the domestic boiler, the concentrations of all compounds were higher compared to the concentrations obtained in the

industrial biofuel boiler. In the domestic boiler, CO concentrations reached over 20,000 mg/m³. The NO_x concentrations measured in the industrial boiler were higher than in the domestic boiler at full combustion, reaching > 1600 mg/m³. High levels of NO_x are caused by nitrogen-containing wood composites (laminated MDP and MDP with HPL coating). The results showed that the sulfur and chlorine, in wood composites influences the formation of respective pollutants (SO₂, HCl). SO₂ concentrations in both boilers at different modes range up to 200 mg/m³. The concentration of hydrochloric acid is low when burning fuel in both boilers, reaching up to 9 mg/m³.

Based on the results of the research, the paper presents recommendations and conclusions on the possibilities of burning engineered wood to extract heat energy. It is recommended to prohibit the burning of wood composites in a domestic boiler, because appropriate combustion conditions are not created, and pollutant concentrations are high. Ensuring proper combustion conditions in industrial boilers, it is possible to burn engineered wood that do not contain preservatives and organochlorine compounds and the content of heavy metals does not exceed the limits.

Turinys

Lentelių sąrašas	9
Paveikslų sąrašas	10
Santrumpų sąrašas	11
Įvadas.....	12
1. Literatūros apžvalga	13
1.1. Medienos kompozitai	13
1.1.1. Medienos drožlių plokštės (MDP).....	13
1.1.2. Medienos plaušų plokštės (MPP)	14
1.1.3. Faneros plokštė	16
1.1.4. Medžio masyvo plokštė.....	17
1.1.5. Orientuotų skiedrų plokštė (OSB).....	17
1.2. Medienos ir panaudotos medienos klasifikavimas ir naudojimas ES šalyse.....	18
1.3. Taršos susidarymas deginant kompozitus ir medienos atliekas	23
1.3.1. Medienos kompozitų degimo procesas	23
1.3.2. Emisijų išsiskyrimas degimo metu.....	23
1.4. Medienos kompozitų panaudojimo kaip kuro energijai gauti teisinis reglamentavimas Lietuvoje	26
1.5. Literatūros apžvalgos apibendrinimas	27
2. Tyrimų metodika	29
2.1. Tyrimams naudoti standai	29
2.2. Tiriamų medžiagų atranka ir jų aprašymas	33
2.3. Teršalų koncentracijos matuokliai.....	37
2.4. Emisijų koncentracijų perskaičiavimai.....	39
2.5. Gero ir blogo degimo režimo nustatymas stenduose.....	40
2.6. Analizuojami degimo teršalai.....	40
2.7. Tyrimų eiga	41
3. Tyrimų rezultatai.....	42
3.1 Kuro deginimo įrenginių normomis reglamentuojami teršalai	42
3.2 Nepilno degimo dujiniai teršalai	46
3.3 Specifiniai teršalai	53
3.4 Tyrimų rezultatų apibendrinimas.....	55
3.5 Eksperimentinių verčių palyginimas su normatyvinėmis.....	56
Išvados	58
Literatūros sąrašas	59
Priedai.....	63
1 Priedas. Panaudotos medienos ir medienos perdirbimo pramonės atliekų ir šalutinių produktų klasifikavimas, Suomija	63
2 Priedas. Medienos atliekų klasifikacija Jungtinėje karalystėje	64
3 Priedas. Nustatytos išmetamųjų teršalų ribinės vertės, katilinėms nuo 0,4-3 MW, Jungtinė Karalystė	65
4 Priedas. Atskirų parametrų pokyčiai degimo metu ir analizuojamų degimo produktų emisijos....	66
5 Priedas. Kuro deginimo įrenginių normomis reglamentuojami teršalai.....	68
6 Priedas. Kietajame biokure leistinos maksimalios cheminių elementų koncentracijos vertės.....	71

Lentelių sąrašas

1.1 lentelė. Medienos bei panaudotos medienos naudojimas medienos drožlių plokščių gamybai Europos šalyse [20]	18
1.2 lentelė. Medienos ir panaudotos medienos kategorijos Vokietijoje [20]	19
1.3 lentelė. Panaudotos medienos deginimo galimybės pagal katilų galingumą (Vokietija) [21]	20
1.4 lentelė. Ribinės vertės išmetamųjų teršalų, deginant B klasės panaudotą medieną (Suomija) [24]	22
1.5 lentelė. Elementinė kuro sudėtis, pritaikius terminį oksidacijos skilimą [27].....	24
1.6 lentelė. Emisijų vertės, deginant medienos granules ir medienos drožlių plokštes prie 850 °C [28]	25
1.7 lentelė. Emisijų vertės, deginant buko fanerą su skirtingoms klijų/dervų rūšimis, prie 850 °C [28]	25
1.8 lentelė. Azoto virtimas į NO _x degimo metu, prie 850 °C [28]	26
1.9 lentelė. Kietojo biokuro gamyboje naudojamų medžiagų kilmė ir šaltiniai [32]	27
2.1 lentelė. Techniniai buitinio katilo parametrai [26]	32
2.2 lentelė. Tiriamų ėminių klasifikavimas, esant skirtingiems katilams ir degimo režimams [3] ...	35
3. 1 lentelė. Iš kurų deginančių įrenginių, išmetamųjų teršalų ribinės vertės.....	56

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Medienos drožlių plokštės (MDP) [8]	14
1.2 pav. MDP gamyba Europoje [7].....	14
1.3 pav. Medienos plaušų plokštė (MPP) [9]	15
1.4 pav. Didelio tankio medienos plaušų plokštė (HDF) [12].....	16
1.5 pav. Mažo tankio medienos plaušų plokštė (LDF) [14]	16
1.6 pav. Faneros plokštė [16]	17
1.7 pav. Medžio masyvo plokštės [17].....	17
1.8 pav. Orientuotų skiedrų plokštė [18].....	18
1.9 pav. Srautų diagrama parodanti, kaip nustatyti panaudotos medienos klasę (Suomija) [24].....	21
2.1 pav. Pramoninio biokuro katilo modelis	30
2.2 pav. Pramoninio katilo modelio schema [35].....	30
2.3 pav. Kuro bunkeris su padavimo sraigtu (proceso metu)	31
2.4 pav. Granuliuoto kuro buitinis katilas „Kalvis“-17	32
2.5 pav. Granuliuoto kuro buitinio vandens šildymo katilo „Kalvis“-17 schema [26]	33
2.6 pav. Tiriamos medžiagos laboratorijoje	34
2.7 pav. Dujinių degimo produktų analizatorius Gasmeter DX 4000	37
2.8 pav. Analizatorius Multilyzer NG	38
2.9 pav. Kietųjų dalelių koncentracijos matuoklis Afriso STM 225 tyrimų metu	39
3.1 pav. Azoto oksidų (NO_x) koncentracija, mg/m^3	42
3.2 pav. Sieros dioksido (SO_2) koncentracija mg/m^3	43
3.3 pav. Anglies monoksido (CO) koncentracija mg/m^3	44
3.4 pav. Kietųjų dalelių (KD) koncentracija mg/m^3	45
3.5 pav. NO_x koncentracijos (mg/m^3) dūmuose priklausomybė nuo CO koncentracijos (mg/m^3) ...	46
3.6 pav. Metano (CH_4) koncentracija mg/m^3	47
3.7 pav. Etileno (C_2H_4) koncentracija mg/m^3	48
3.8 pav. Acto rūgšties ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$) koncentracija mg/m^3	49
3.9 pav. Benzono (C_6H_6) koncentracija mg/m^3	50
3.10 pav. Formaldehido (CH_2O) koncentracija mg/m^3	51
3.11 pav. Suminė organinių junginių koncentracija apskaičiuojama kiekvienos rūšies angliavandeniliui atskirai mg/m^3	52
3.12 pav. Suminės organinių junginių koncentracijos (mg/m^3) dūmuose priklausomybė nuo CO koncentracijos (mg/m^3).....	53
3.13 pav. Druskos rūgšties (HCl) koncentracija mg/m^3	54
3.14 pav. Vandenilio cianido (HCN) koncentracija mg/m^3	55

Santrumpų sąrašas

Santrumpos:

CO – anglies monoksidas;

KD – kietosios dalelės;

NO_x – azoto oksidai;

SO₂ – sieros dioksidas;

KDI – kurą deginantis įrenginys;

EN – Europos standartas;

MDP – medienos drožlių plokštė;

LDF – mažo tankio medienos plaušo plokštė (angl. *low-density fiberboard*);

MDF – vidutinio tankio medienos plaušo plokštė (angl. *medium-density fiberboard*);

HDF – didelio tankio medienos plaušo plokštė (angl. *high-density fiberboard*);

OSB – orientuotų skiedrų plokštė (angl. *oriented strand board*);

PCP – pentachlorfenolis;

UV – ultravioletinis;

MPP – medienos plaušų plokštė;

PVC – polivinilchloridas;

ES – Europos sąjunga;

HCN – vandenilio cianidas;

HCl – vandenilio chloridas;

UF – karbamido formaldehidinė derva;

PF – fenolio formaldehidinė derva;

EPI – emulsijos polimero izocianatas;

MUF – melamino karbamido formaldehidas;

HPL – aukšto slėgio laminatas (angl. *high pressure laminate*)

Įvadas

Mediena yra plačiai naudojama pasauliniu mastu. Ji – natūralus kompozitas, sudarytas iš celiuliozės bei lignino ir pastaruoju metu plačiai taikomas kaip statybinė medžiaga, kuras, tai pat naudojamas įvairiose pramonės šakose. Tačiau medienos gavyba skatina miškų nykimą: remiantis Jungtinių Tautų maisto ir žemės ūkio organizacijos duomenimis, pasaulio miškų plotas 1990 – 2010 metais sumažėjo 135 mln. ha. Miškų nykimo problemai spręsti gali būti taikoma medienos kompozitų alternatyva [1]. Lyginant su paprasta mediena, medienos kompozitai turi akivaizdžių pranašumų: ilgiau išsilaiko, jų matmenys išlieka stabilūs net veikiami įvairių aplinkos sąlygų, kompozitams reikia mažiau priežiūros, juos lengva transportuoti ir montuoti, nes yra daug lengvesni negu įprasta mediena, šios medžiagos atsparios vabzdžiams ir kitiems kenkėjams [2].

Viena iš opiausių medienos kompozitų naudojimo problemų – tai kompozito atliekų perteklius, kuris susidaro medienos apdirbimo įmonėse. Nepanaudotos atliekos patenka į sąvartyną. Išėitis, padedanti išspręsti šią problemą – medienos kompozitų deginimas, kuris įgalintų išgauti šilumos energiją ir ją panaudoti technologiniams procesams. Tačiau tarša, leistina šilumai gaminti naudojant kompozitus, yra nepakankamai reglamentuota, todėl svarbu išsiaiškinti galimą pavojingų teršalų, medienos kompozitus deginant buitiniuose ir pramoniniuose katiluose, išsiskyrimą [3]. Atsižvelgiant į tai, galima teigti, jog medienos kompozitų deginimo tyrimai svarbūs ir aplinkos apsaugos ir ekonominiu požiūriu.

Tyrimo objektas: išlakų, susidarančių deginant medienos kompozitus buitiniuose ir pramoniniuose katiluose, sudėtis ir kiekis.

Darbo tikslas – įvertinti medienos kompozitų atliekų panaudojimą energijai gauti, atsižvelgiant į reglamentuojamas oro emisijų ribines vertes.

Uždaviniai:

1. atlikti mokslinės literatūros apžvalgą, siekiant išanalizuoti medienos kompozitų rūšis, medienos kompozitų klasifikavimą Europoje, taršos susidarymą deginant kompozitus ir jų teisinį reglamentavimą;
2. atlikti klasifikuotų medienos kompozitų deginimo eksperimentus pramoniniame ir buitiniame katiluose įvairiomis deginimo sąlygomis (geras ir blogas degimas) bei įvertinti išlakų sudėtį;
3. išanalizuoti gautus rezultatus ir įvertinti aplinkos taršą deginant medienos kompozitus, palyginant su normatyvinėmis vertėmis;
4. apibendrinti medienos kompozitų panaudojimo energijai gaminti galimybes.

1. Literatūros apžvalga

Šioje dalyje apžvelgiama – medienos kompozitų rūšys, medienos kompozitų atliekų klasifikavimas ir panaudojimas tam tikrose ES šalyse (Vokietija, Nyderlandai, Suomija, Jungtinė Karalystė), taršos susidarymas ir išlakų sudėtis deginant medienos kompozitus bei teisinis reglamentavimas dėl medienos kompozitų panaudojimo kaip kuro energijai gauti.

1.1. Medienos kompozitai

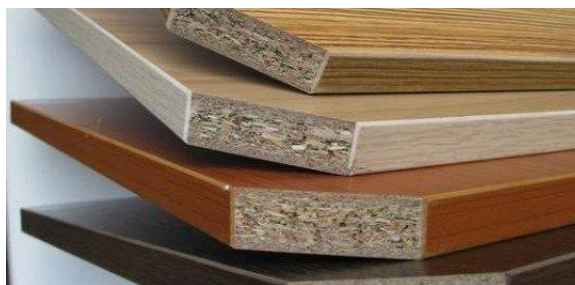
Medienos kompozitai – tai įvairūs daugiakomponenčiai medienos produktai. Jie yra pagaminami suklijuojant pluoštus, plaušus, plokštes, lakštus ir skiedras. Panašūs kompozitiniai produktai gali būti pagaminti iš augalinių pluoštų naudojant lignino turinčias medžiagas (kanapių stiebai, cukranendrių likučiai, rugių ir kviečių šiaudai) su cheminiais priedais, kurie leidžia lengviau integruotis polimerui ir medienos milteliams. Kompozitai sutvirtinami naudojant klijus / dervas, konstruojami pagal tam tikras specifikacijas, todėl jų yra daug skirtingų rūšių ir pritaikymo būdų. Esminis medienos kompozitų privalumas yra tai, kad jie sukuriama naudojant medienos atliekas ar mažesnius medžius, taip mažinant poreikį kirsti miškus [4].

Plačiausiai naudojamos kompozitų rūšys, kurios gali būti pagamintos įvairių dydžių ir formų, yra šios: medienos drožlių plokštės (toliau MDP); medienos plaušų plokštės (trys rūšys: mažo tankio medienos plaušo plokštė (toliau LDF), vidutinio tankio medienos plaušo plokštė (toliau MDF) ir didelio tankio medienos plaušo plokštė (toliau HDF); faneros plokštė; medžio masyvo plokštė; orientuotų skiedrų plokštė (toliau OSB) ir cemento pjuvenų plokštė. Šios kompozitų rūšys yra gaminamos panašiu principu – naudojant sintetintas dervas, klijus ir veikiant kompozitus skirtingu šilumos ir slėgio kiekiu [5]. Vadovaujantis Lietuvos standartizacijos departamento patvirtintais EN standartais, medienos kompozitai yra klasifikuojami pagal fizikinius ir cheminius parametrus, pavyzdžiui:

- gamybos būdą – drėgnas / sausas;
- naudojimo aplinką – drėgna / sausa / išorinė;
- paskirtį – bendrosios paskirties / veikiant apkrovai;
- apkrovos trukmę – ilgalaikė / trumpalaikė;
- storį;
- tankį;
- formaldehido išsiskyrimą;
- pentachlorfenolio (PCP) kiekį: < 5 ppm arba > 5 ppm;
- specifines savybes – atsparumas ugniai, drėgmei, biologiniam poveikiui, UV spinduliams [3].

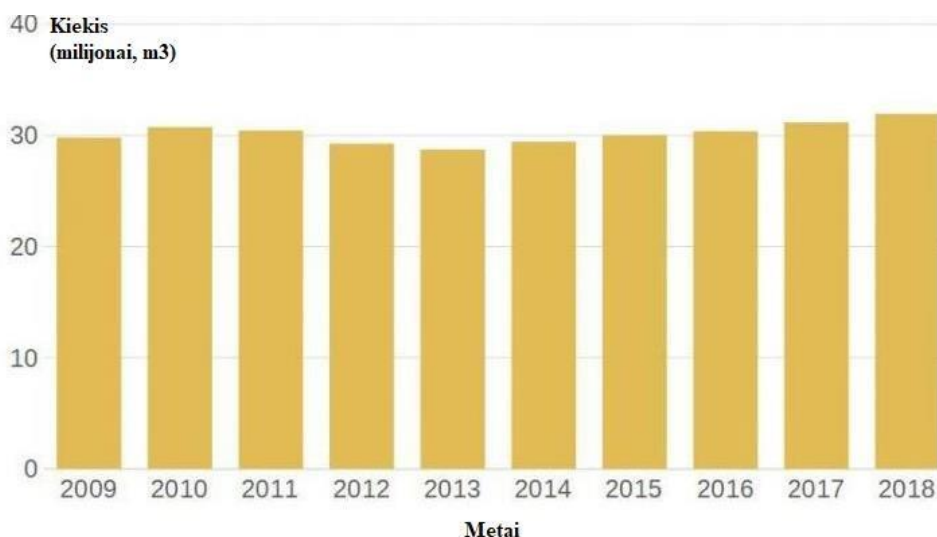
1.1.1. Medienos drožlių plokštės (MDP)

Medienos drožlių plokštės gaminamos presuojant su klijais sumaišytas smulkias medienos daleles (pjuvenas, drožles) arba iš kitų lignoceliuliozės pluoštinių medžiagų, kurios yra surištos su derva [6]. Šios plokštės yra labai tvirtos, aukštos kokybės, atsparios drėgmei bei yra pigesnė ir tankesnė nei įprasta mediena ar fanera (žr. 1.1 pav.) [7]. Medienos drožlių plokščių tankis svyruoja nuo 650 iki 750 kg/m³ [8]. Taip pat plokštės tinkamos garso izoliacijai ir priešgaisriniam stabdymui [7]. Plokščių paviršius gali būti dažomas (dažais, aliejimais dažais), laminuojamas ir tapetuojamas [8].



1.1 pav. Medienos drožlių plokštės (MDP) [8]

Šios plokštės naudojamos baldų, sienų ir lubų plokščių, pakavimo medžiagų gamybai. Dėl savo homogeniškumo ši plokštė yra paklausi pasaulinėje rinkoje (žr. 1.2 pav.), nes tinka pramonei gamybai ir konstrukcijai [6].



1.2 pav. MDP gamyba Europoje [7]

Iš paveikslo (žr. 1.2 pav) pastebima, kad nuo 2009 – 2018 metų MDP gamyba Europoje yra stabili, kasmet pagaminama apie 30 mln. kubinių metrų šių plokščių.

1.1.2. Medienos plaušų plokštės (MPP)

Medienos plaušų plokštės yra medienos kompozitai pagaminti iš medienos plaušų ir pagal tankį yra skirstomi: mažo, vidutinio ir didelio tankio medienos plaušų plokštės (žr. 1.3 pav.). Plaušai sujungiami paveikiant šiluma ir slėgiu. Paviršiuje esantys plaušai yra labiau suspaudžiami negu viduriniame sluoksnyje esantys plaušai. Tai suteikia plokštėms lygų ir kompaktišką paviršių. Plokštės savybėms gerinti yra naudojami klijai ir kiti priedai [9].



1.3 pav. Medienos plaušų plokštė (MPP) [9]

Pagrindinė plaušų plokštės žaliava yra medienos plaušas, o priedai sudaro mažiau nei 1 proc. visos plokštės sudėties. Parafinas naudojamas kaip klijai, kurie suteikia plokštei atsparumą drėgmei. Krakmolas, dirbtinė derva, grūdinta alyva yra naudojami kaip rišikliai, kad būtų pagerintas stiprumas. Medienos plaušų plokščių dangai gali būti naudojamos popierius, audinys, plastikas, austi stiklo audiniai ir metalas [9].

Vidutinio tankio medienos plaušų plokštė (MDF)

MDF plokštės yra gaminamos susmulkinant minkštą medį į medienos plaušelius, kurie surišami naudojant aukštą temperatūrą ir slėgį bei pridėdant rišamųjų medžiagų, tokių, kaip sintetinės dervos. Siekiant suteikti papildomų savybių, gamybos metu gali būti naudojami priedai. MDF plokštės nėra vienodos ir gali skirtis tekstūra, tankiu, spalva – priklausomai nuo to, iš kokios medžiagos yra gaminamos [10]. MDF tankis, priklausomai nuo plokštės storio, svyruoja nuo 650 kg/m³ iki 850 kg/m³ [11]. Šiomis dienomis MDF plokštės gaminamos iš įvairiausių medžiagų, tarp kurių yra – atliekos, perdirbtas popierius, bambukas, anglies pluoštas, polimerai, stiklas ir plienas. Gamintojų siekis ir tikslas – ekologiškų produktų gamyba, todėl pradėti testuoti netoksiški rišikliai. Nauja žaliava šioms plokštėms tampa bambukas ir šiaudai: tai yra greitai augantys bei atsinaujinantys ištekčiai.

MDF plokštės gamybos metu yra toksiškos, bet iš jų neišsiskiria lakieji organiniai junginiai. Lyginant su kitais substratais, naudojant MDF gerokai sumažėja pjaustymo atliekų [10]. Dėl savo stabilumo, puikių apdirbimo savybių, stiprumo ir tolygaus tankio visame plote ši plokštė dažniausiai naudojama iš visų medienos plaušų plokščių rūšių. Naudojama baldų ir durų gamyboje, interjero apdailoje, sienų dangai, virtuvės ir vonios spintoms, laminuotoms grindims [3]. Dėl šių savybių ji gali lengvai pakeisti fanerą ir medienos drožlių plokštes. Dėl savo savybės gerai slopinti vibracijas, MDF plokštės yra tinkamos garsiakalbių korpusams. Galutinis produktas yra tankus, plokščias, standus ir lengvai apdirbamas. Skirtingai nei faneroje ar medienos drožlių plokštėse, šiose plokštėse nėra tuščių angų ir paviršius bei kraštai yra glotnūs [10].

Didelio tankio medienos plaušų plokštė (HDF)

HDF plokštė – tai medienos kompozitas, aukšto slėgio bei aukštos temperatūros sąlygomis pagamintas iš dervomis sujungtų medienos pluoštų (žr. 1.4 pav.). Lyginant su kitais kompozitais, šios plokštės yra sunkesnės, tvirtesnės, ilgaamžiškesnės, o dėl labai plono paviršiaus tinka įvairioms dangoms faneruoti, laminuoti, dažyti, lakuoti [12].



1.4 pav. Didelio tankio medienos plaušų plokštė (HDF) [12]

Būdingos charakteristikos: lengvas apdorojimas, aukštas stabilumas, didesnis tankis, lygus paviršius – plokštė tinkama įvairiems paviršiams. HDF plokštės panaudojamos interjero dizaine, statybose bei baldų, grindų ir durų gamybai [12].

Mažo tankio medienos plaušų plokštė (LDF)

LDF plokštė yra medienos kompozitas, kuris pagamintas iš medžio atraižų, drožlių, pjuvenų ir sintetinių dervų arba kitų tinkamų rišiklių, kurie yra presuojami (žr. 1.5 pav.). Plokštės tankis yra mažesnis nei 450 kg/m^3 [13].



1.5 pav. Mažo tankio medienos plaušų plokštė (LDF) [14]

LDF plokštės yra pigesnės, tankesnės ir vienodesnės nei įprastinė mediena ir fanera, todėl dažnai jas pakeičia, kai kaina yra svarbesnis faktorius negu stiprumas ir išvaizda. Lyginant LDF plokštes su HDF ir MDF plokštėmis, jos yra silpniausios ir mažesnio tankio [13].

1.1.3. Faneros plokštė

Faneros plokštė gaminama iš suklijuotų medienos sluoksnių (lakštų) (žr. 1.6 pav.). Lakštai klijuojami taip, kad gretimų sluoksnių pluoštas būtų išsidėstęs stačiu kampu. Faneros plokštės gaminamos naudojant aukštą slėgį ir temperatūrą. Klijus sudaro termoaktyvios sintetinės dervos (fenolio formaldehidai), kurios naudojamos išorinei faneros daliai tvirtinti, o vidinei daliai – karbamido

formaldehidas. Fenolio formaldehidinė derva formuoja tvirtesnes jungtis, nei jos yra natūralioje medienoje ir tai padaro fanerą atsparesnę orui, deformacijoms, šaltam ir karštam vandeniui, garams, sausai šilumai, skilimams. Fanera, lyginant su natūralia mediena, turi daugiau privalumų: tai erdvinis stabilumas, stiprumo vienodumas, atsparumas susiskaldymui, pranašesnė plokštės forma ir dekoratyvinė vertė. Šios savybės leidžia fanerą naudoti pastatų statyboje (sienos, durys, grindys, stogai), vidaus apdailai, baldų, laivų, automobilių gamybai ir betono klojime [15].



1.6 pav. Faneros plokštė [16]

Be standartinių plokščių fanerų gaminamos ir faneros su išlenkta forma – formuojamos faneros plokštės, kurios naudojamos baldams, laivams ir kitiems gaminiams. Produktas išgaunamas lenkiant ir klijuojant lakštus tame pačiame gamybos etape, tam naudojamos lenkimo formos [15].

1.1.4. Medžio masyvo plokštė

Medžio masyvų plokštės sudaro minkštosios medienos plokštelės, kurios surinktos į daugiasluoksnes plokštės (jas sudaro lygiagretūs išoriniai sluoksniai ir šerdinis sluoksnis) (žr. 1.7 pav.) [17].



1.7 pav. Medžio masyvo plokštės [17]

Iš medienos masyvo yra gaminamos baldinės plokštės – tai medienos masyvo ir faneros derinys, kuomet pagrindą sudaro klijuoti medienos masyvo tašeliai iš abiejų pusių apdailinti lukštu [3].

1.1.5. Orientuotų skiedrų plokštė (OSB)

OSB plokštės yra pagamintos iš suspaustų medienos juostos sluoksnių, kurie sujungti kliais (žr. 1.8 pav.). Tai tvirtas, neturintis vakuomo ir drėgmei atsparus produktas. Išoriniame sluoksnyje medienos gabalėliai yra lygiagretūs su plokštės ilgiu ir pločiu. Vidiniame sluoksnyje medienos gabalėliai

išsidėstę statmenai išorinio sluoksnio medienos skiedrantams. Pagamintose OSB plokštėse 95 % sudaro medienos gijos, o 5 % – vaškas ir sintetinių dervų klijai (drėgmei ir karščiui atsparūs rišikliai, tokie, kaip fenolio formaldehidas, karbamido formaldehidas, izocianatas). OSB yra ekonomiškesnės už fanerą bei stipresnės už įprastą medieną [18].



1.8 pav. Orientuotų skiedrų plokštė [18]

OSB plokštės gaminamos iš spygliuočių medžių, bet tam tikrais atvejais naudojami ir lapuočiai. OSB plokštės naudojamos klojant grindų dangą, dengiant stogus, gaminant medines sijas, statybose, pramoniniuose konteneriuose, įrenginėjant laikinas patalpas [19].

1.2. Medienos ir panaudotos medienos klasifikavimas ir naudojimas ES šalyse

Remiantis Eurostat duomenimis, didžiausi panaudotos medienos kiekiai susidaro Vokietijoje. Toliau seka Prancūzija, Jungtinė Karalystė, Italija ir Suomija. Europos sąjungos narės laikosi visų direktyvų ir reglamentų (žr. 1.1 lentelė). Atliekų politikoje pagrindas yra atliekų direktyva (2008/98/EC). Medienos apdorojimui nustatyti, yra apibrėžiamos medienos atliekų kategorijos. Panaudota mediena priskiriama 1 iš 4 medienos atliekų kategorijų, priklausomai nuo užteršimo lygio [20].

1.1 lentelė. Medienos bei panaudotos medienos naudojimas medienos drožlių plokščių gamybai Europos šalyse [20]

	Apvali mediena ¹ , %	Pramoninės medienos atliekos ² , %	Perdirbtos medienos atliekos ³ , %
Vokietija	20	46	34
Prancūzija	41	37	22
Italija	0	5	95
Lenkija	38	47	15
Ispanija	31	41	28
Šveicarija	20	45	35
Jungtinė Karalystė	16	31	53

¹ mažų gabaritų stiebų nuopjovos, nebetinkamos lentų, kuro ir kitų medienos gaminių

² medienos apdirbimo atliekos, liekanos ir šalutiniai produktai

³ mediena iš perdirbimo įmonių

Nyderlandai aktyviai dalyvauja atliekų valdymo planavime. Tai lemia nacionalinio atliekų tvarkymo plano (angl. *NWMP*) įvedimas nuo 2009 m. iki 2021 m. Jame apžvelgiama skirtingos atliekų rūšys, jų apibrėžimai, importo ir eksporto įstatymai bei galutinis atliekų panaudojimas. Panaudota mediena (medienos atliekos) Nyderlanduose suskirstoma į 3 tipus:

- A tipo panaudota mediena: švari mediena be jokių dažų ar pavojingų medžiagų;
- B tipo panaudota mediena: medienos atliekos su dažais ar klijais, kurie lengvai pašalinami;
- C tipo panaudota mediena: medienos atliekos su impregnuotomis pavojingomis medžiagomis ar apdorotos jomis, siekiant pailginti produkto gyvavimo laiką [21].

Nacionalinis atliekų tvarkymo planas taip pat siūlo galutinį medienos atliekų panaudojimą kiekvienam tipui. A ir B tipai medienos atliekos turi būti atgaunamos, perdirbant medžiagas arba išgaunant energiją, o pašalinimas į sąvartyną negalimas. C tipo panaudotos medienos negalima perdirbti ir dažniausiai yra sudeginama [21].

Vokietijoje prieš 20 metų dauguma panaudotos medienos buvo deginama energijos gamybai arba šalinama sąvartynuose. Šioje šalyje remiantis panaudotos medienos charakteristikomis, medienos atliekos gali būti klasifikuojamos į 4 kategorijas: A I, A II, A III ir A IV (žr. 1.2 lentelė). Tik A I kategorijos medieną galima naudoti materialiams ir energetiniams tikslams be išankstinio apdorojimo. Dauguma pakartotinio panaudojimo medienos susidaro iš pakuočių bei statybos / griovimo sektorių ir įprastai patenka į A II ir A III kategorijas. Apie 20 proc. panaudotos medienos (daugiausiai A I ir A II kategorijos) panaudojama medienos drožlių plokščių gamybai, tuo tarpu apie 80 proc. (daugiausiai A II ir A III kategorijos) deginama energijos gamybai [22, 23].

1.2 lentelė. Medienos ir panaudotos medienos kategorijos Vokietijoje [20]

Kategorija	Apibūdinimas	Pritaikymas
A I	Neapdorota arba tik mechaniškai apdorota mediena	Skiedrų gamybai, kurios panaudojamos medienos kompozitų gamybai, dujų bei aktyvuotos anglies gamybai (galimai energijos gamybai deginant)
A II	Klijuota ar dažyta mediena (be halogenintų junginių ir konservantų)	Skiedrų gamybai, kurios panaudojamos medienos kompozitų gamybai, dujų bei aktyvuotos anglies gamybai (galimai energijos gamybai deginant)
A III	Halogenintų medžiagų turinti mediena, be konservantų	Panaudojama kaip medžiaga, jei pašalinamos dangos.
A IV	Užteršta mediena, įskaitant halogenintus junginius, be PCB	Energijos gamybai dideliuose kuro deginimo įrenginiuose.

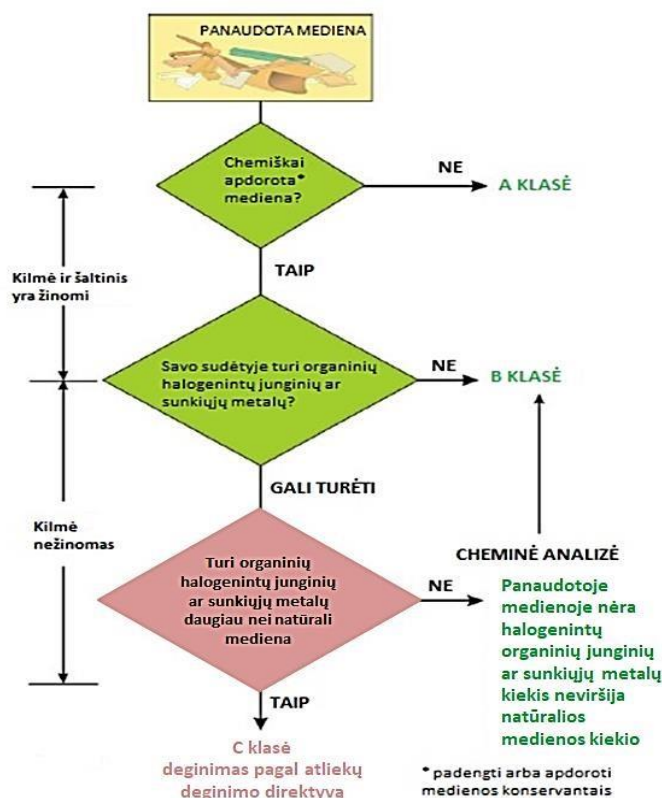
A I panaudota mediena gali būti deginama katiluose, kurių galia < 50 kW. A II kategorijos panaudotą medieną galima deginti katiluose, kurių galia didesnė nei 1 MW. A III ir A IV kategorijos medienos

atliekas galima deginti tik didelio pajėgumo įrenginiuose (žr. 1.3 lentelė). Vokietijoje šie reikalavimai tenkinami pagal ketvirtąjį ir septynioliktąjį išmetamųjų teršalų kontrolės aktus [21].

1.3 lentelė. Panaudotos medienos deginimo galimybės pagal katilų galingumą (Vokietija) [21]

Panaudotos medienos kategorija	Kurą deginančio įrenginio nominali šiluminė galia			
	< 50 kW	< 1MW	< 50 MW	≥ 50 MW
A I	Leidžiama	Leidžiama	Leidžiama	Leidžiama
A II	Neleidžiama	Leidžiama medžio apdirbimo industrijoje	Leidžiama	Leidžiama
A III	Neleidžiama	Neleidžiama	Leidžiama	Leidžiama
A IV	Neleidžiama	Neleidžiama	Leidžiama	Leidžiama

Suomijoje tiesioginis medienos naudojimas energijai gauti yra santykinai mažesnis nei ES, tačiau daug didesnis medienos naudojimas plokščių gamybos pramonei. Naudojant medieną energijai išgauti yra būtina numatyti medieną sudarančių teršalų galimą poveikį aplinkai. Tam yra naudojamas medienos kompozitų klasifikavimas ir suskirstymas į kategorijas (žr. 1.9 pav.) [24]



1.9 pav. Srautų diagrama parodanti, kaip nustatyti panaudotos medienos klasę (Suomija) [24]

Suomijoje panaudota mediena skirstoma į A, B, C, D kategorijas. Kategorijos A ir B klasifikuojamos pagal EN ISO 17225-1 kietojo biokuro standartą, o C klasė, pagal EN ISO 1539 kietojo perdirbto kuro standartą. Kuras, priskiriamas C kategorijai, turėtų būti sunaikintas remiantis atliekų deginimo aktais. D klasės mediena yra apdorojama konservantais ir traktuojama kaip pavojingos atliekos. A klasė: kuro specifikacijos taikomos remiantis EN ISO 17225-1 standartu; netaikomas atliekų deginimo įstatymas; neleidžiama naudoti jokių cheminių priemonių medienoje; gali būti naudojama visų rūšių biomasės gamyklose. B klasė: kuro specifikacijos taikomos remiantis EN ISO 17225-1 standartu; mediena turi būti deginama didesnio galingumo nei 20 MW katilinėse, laikytis prekybos taršos leidimais sistemos ir turi būti patvirtinta CO₂ faktorius iškastinei kuro daliai [24].

Panaudotos medienos ir medienos perdirbimo pramonės atliekų ir šalutinių produktų klasifikavimas Suomijoje pateikiamas lentelėje esančioje 1 priede (žr. 1 priedą).

2014 m. buvo atnaujintos gairės ir patikrintos kai kurių metalų ribinės vertės panaudotoje medienoje. B klasės medienai buvo taikomos ribinės vertės, remiantis vertėmis, kurios taikomos natūraliai medienai. Šios vertės nebuvo taikomos arsenui. Suomijoje dauguma katilinių, kurios degina panaudotą medieną yra daigafunkcinės, t.y. degina durpes, anglį su biokuru kartu. Durpės ir anglis išskiria didesnę kiekį arseno (išskiria 0.5 – 14 mg/kg sausosios masės), negu natūrali mediena (4 mg/kg sausosios masės). Nustatyta ribinė arseno vertė siekia 10 mg/kg sausosios masės. Atskiros ribinės vertės metalams (varis, chromas, arsenas) buvo pakeistos į vieną suminę vertę [24]. Ribinės vertės pateikiamos 1.4 lentelėje.

1.4 lentelė. Ribinės vertės išmetamųjų teršalų, deginant B klasės panaudotą medieną (Suomija) [24]

Junginys	Ribinės vertės, sausoji masė	Natūralios medienos dalis, pagal kurią nustatomos ribinės vertės	Klasė A		Klasė B		Klasė C
			Normatyvinis	Ne normatyvinis	Normatyvinis	Ne normatyvinis	
Siera (S)	≤ 0,2 w – %	Lapuočių žievė		X	X		X
Azotas (N)	≤ 0,9 w – %	Lapuočių žievė		X	X		X
Kalis (K)	≤ 5000 mg/ kg	Lapuočių žievė				X	
Natris (Na)	≤ 2000 mg/ kg	Lapuočių žievė				X	
Chloras (Cl)	≤ 0,1 w – %	–		X	X		X
Sunkieji metalai							
Arsenas + Chromas + Vars	≤ 70 mg/kg ²	Spygliuočių žievė Σ 74 mg/kg			X		X
Kadmis (Cd)	≤ 1 mg/kg	Spygliuočių žievė			X		X
Gyvsidabris (Hg)	≤ 0,1 mg/kg	Spygliuočių žievė			X		X
Švinas (Pb)	≤ 50 mg/kg	Spygliuočių žievė			X		X

Jungtinėje Karalystėje A kategorijos medieną galima deginti be apribojimų įvairiuose deginimo įrenginiuose, B – D kategorijos medienos atliekos turi būti deginamos laikantis Atliekų deginimo direktyvos reikalavimų [25].

Medienos atliekų klasifikacija Jungtinėje Karalystėje pateikiama lentelėje esančioje 2 priede (žr. 2 priedą).

Jungtinės Karalystės aplinkos ministerija [25] rekomendacijose apžvelgia medienos atliekų deginimą Jungtinėje Karalystėje bei išmetamųjų teršalų vertes, kurios taikomos deginimo įrenginiams, kurių galia nuo 0,4 – 3 MW. Taip pat koncentruojamasi į medienos atliekas, kurios susidaro medienos apdirbimo procesų metu (medienos drožlės, medienos dulkės, skersai pjauti medžių galai, pjuvenos) ir kurioms netaikoma atliekų deginimo direktyva.

Nustatytos išmetamųjų teršalų ribinės vertės, katilinėms nuo 0,4 – 3 MW, Jungtinėje Karalystėje pateikiamos lentelėje esančioje 3 priede (žr. 3 priedą).

1.3. Taršos susidarymas deginant kompozitus ir medienos atliekas

1.3.1. Medienos kompozitų degimo procesas

Medienos kuro sudėtyje esantys angliavandeniliai, vykstant kuro šilimui suskyla į dvi dalis: lakiąsias medžiagas (dujas) ir kietąjį likutį (medienos anglis ir kietos organinės ir neorganinės medžiagos). Lakiosios medžiagos sudega degimo kameroje, o susidaręs koksas ant ardyno [3]. Taigi, deginant medieną yra 4 etapai, per kuriuos medis tampa pelenais. Šie etapai yra tokie: 1) Kuro masės sušilimas ir vandens garinimo pradžia, 2) Intensyvus džiūvimas, pradeda išsiskirti angliavandeniliai junginiai, 3) Degiųjų dujų išsiskyrimas, 4) Kokso (kietasis likutis) degimas [26].

Kartu su oru kietojo kuro dalelė patenka į degimo kamerą, įkaitus pasiekia 100 °C ar daugiau, dalelėje prasideda cheminiai ir fiziniai procesai ir dėl šių procesų išsiskiria angliavandeniliai, vandens garai ir lakiosios medžiagos. Nuo kuro dalelės, kuro rūšies, jo sudėties ir struktūros priklauso įkaitimo greitis ir lakiųjų medžiagų išsiskyrimas. Kuras įkaista per sekundės dešimtąsias dalis ir gali pasiekti 100 °C. Kai lakiosios medžiagos susimaišo su deguonimi, būna pasiekta užsiliepsnojimo temperatūra, kuro mišinys užsidega, o temperatūra pakyla dar labiau. Didesnė, kure buvusio vandens dalis, jau būna pasišalinus. Dujinės fazės degimo produktai kartu su nedegiosiomis dujomis bei pertekliniu oru, palieka krosnį ir išteka į aplinką. Išgaravus pagrindinei daliai lakiųjų medžiagų, kietojo kuro likutis (koksas) taip pat pradeda degti. Tam reikalinga 800 – 1000 °C temperatūra. Šis etapas yra ilgiausias ir sudaro beveik pusę viso degimo laiko. Jo degimo zona yra netoli pelenų surinkimo bunkerio. Pasišalinus degiosioms medžiagoms, nedegios kietosios medžiagos, paprastai pasiskirsto į dvi rūšis: lakiuosius ir sunkiuosius pelenus. Lokieji pelenai yra lengvosios dalelės ir išnešamos dūmų srauto, o sunkieji pelenai pasilieka krosnyje ir nusėda ant įvairių paviršių [26].

Kokybiškai visiškai sudeginti kietąjį kurą lengviau didesniuose katiluose, kuriuose kontroliuojama dūmų sudėtis, įrengtos specialios kuro ir oro santykio gerinimo sistemos bei deginimui sudarytos geresnės sąlygos. Gerame degime angliavandeniliai sudega iki galutinių produktų: vandens ir CO₂. Pagal kuro sudeginimo efektyvumą galima išskirti dvi katilų rūšis: pramoniniai katilai, buitiniai mažos galios ir panašios konstrukcijos galingesni granuliniai katilai [3, 26].

1.3.2. Emisijų išsiskyrimas degimo metu

Pagrindiniai teršalai išsiskiriantys deginant medienos kompozitus ir jos atliekas yra NO_x, KD, CO, SO₂, angliavandeniliai. Jų koncentracijos yra skirtingos ir įvairios, nes priklauso nuo kompozitų sudėties, rišamųjų medžiagų bei deginimo sąlygų [3].

Teršalų susidarymas, deginant mažos galios katile neapdorota medieną ir medienos fanerą, kuriai buvo naudotos karbamido ir fenolio formaldehidinės dervos, nagrinėtas (Cichy W., 2012) ir nustatyta kad šių medienos kompozitų deginimas yra kaip išeitis išgauti energiją būtiną technologiniams procesams. Tyrimuose buvo taikoma terminė oksidacija plastikinėms medienos kompozitų apdailoms, tai leido žymiai sumažinti susidarantį atliekų kiekį iš medienos kompozitų gamybos pramonės. Labiausiai pavojingi susidarantys degimo metu ir išsiskiriantys į aplinką išmetamieji teršalai yra NO_x ir CO [27]. 1.5 lentelėje pateikta tirtų kuro rūšių elementinė sudėtis.

1.5 lentelė. Elementinė kuro sudėtis, pritaikius terminį oksidacijos skilimą [27]

Atliekų tipas	Elementų sudėtis (%)			
	C	H	N	S
Neapdorota mediena	49,54	6,38	0,42	< 0,01
Medienos faneros atliekos (karbamido formaldehidinė derva (UF))	45,62	7,65	8,41	< 0,01
Medienos faneros atliekos (fenolio formaldehidinė derva (PF))	49,72	7,06	0,63	< 0,01

Atskirų parametrų pokyčiai degimo metu ir analizuojamų degimo produktų emisijos, pateikiamos paveiksluose esančiuose 4 priede (žr. 4 priedą).

Apibendrinus galima teigti, kad deginant medienos kompozitus kuriuose yra fenolio formaldehidinių dervų išsiskiria didesnis kiekis CO ir angliavandenilių, negu deginant medienos kompozitus su karbamido formaldehidinėmis dervomis ir paprastą neapdorotą medieną. Didinant paduodamo oro greitį, kai yra deginamos PF faneros, yra stipriai sumažinamas išsiskiriančių CO ir angliavandenilių kiekis ir yra mažesnis palyginus su tokiais pat sąlygomis degintomis UF faneromis. Deginant UF fanerą, kai paduodamo oro greitis siekė 140 m³/h, buvo pastebėtas 3 kartus didesnis NO_x kiekis lyginant su tokiais pačiomis sąlygomis deginama PF fanera ir neapdorota mediena.

Švedijoje mokslininkai atliko tyrimus, susijusius su medienos drožlių plokštės ir klijuotos faneros deginimu, norėdami išsiaiškinti neigiamą poveikį aplinkai. Medienos drožlių plokštė buvo surišta karbamido formaldehidine derva, o faneros suklijuotos įvairiais klėjais/dervomis: karbamido formaldehidine derva, polivinil acetatu, emulsijos polimero izocianatu, melamino karbamido formaldehidu ir fenolio rezorcinoliu. Medienos drožlių plokštė buvo deginama prie 500 – 1000 °C temperatūros, o klijuota fanera prie 750 – 850 °C. Kaip ir deginant paprastą medieną, tirtų medienos kompozitų emisijos, buvo gautos panašios. Tik NO_x išmetimai pastebimi dideli, kai yra deginama medienos drožlių plokštės ir azoto turintys klėjai (karbamido formaldehido dervos; melamino karbamido formaldehido dervos; emulsijos polimero izocianatas) [28].

Iš 1.6 lentelės galima pastebėti skirtingų medienos mėginių formaldehido koncentracijos svyravimus, tai įvyksta dėl degimo sąlygų svyravimo. Didesnis formaldehido koncentracijos intervalas pastebimas, deginant medienos drožlių plokštes.

1.6 lentelė. Emisijų vertės, deginant medienos granules ir medienos drožlių plokštes prie 850 °C [28]

Mėginys	Formaldehidas (mg/m ³)	Amoniakas (mg/m ³)	Rūgštys (mg/m ³)			Izocianatas (mg/m ³)	
			HCN	Acto rūgštis	Sulfatas	MIC (metilizocianatas)	MDI (metileno defenil diizocianatas)
Medienos granulės	< 0,1 – 3,9	2	< 0,3	< 0,2	2	≤ 0,01	–
Medienos drožlių plokštės	≤ 0,2 – 5,9	3	< 0,3	< 0,2	2	≤ 0,01	–

Iš 1.7 lentelės matoma, kad azoto turinčios medieną rišančios medžiagos (klijai/dervos) lemia didesnius amoniako, rūgščių, izocianato išmetimus.

1.7 lentelė. Emisijų vertės, deginant buko fanerą su skirtingoms klijų/dervų rūšimis, prie 850 °C [28]

Mėginys	Formaldehidas (mg/m ³)	Amoniakas (mg/m ³)	Rūgštys (mg/m ³)			Izocianatas (mg/m ³)	
			HCN	Acto rūgštis	Sulfatas	MIC (metilizocianatas)	MDI (metileno defenil diizocianatas)
Buko fanera	< 0,2	3	< 0,3	≤ 0,2	2	0,02	< 0,01
Fanera+ emulsijos polimero izocianatas	< 0,2	2	< 0,3	< 0,2	7	–	< 0,01
Fanera+ fenolio rezorcinolio formaldehidas	< 0,2	2	< 0,3	< 0,2	3	–	–
Fanera+ melamino karbamido formaldehidas	< 0,2	3	< 0,3	< 0,2	7	< 0,01	–
Fanera+ karbamido formaldehidas	< 0,2	2	< 0,3	< 0,2	8	< 0,01	–

1.8 lentelėje matoma, kad po degimo išsiskiria NO_x didesnės koncentracijos, ten kur yra kompozitai su klijais, kurie sudaryti iš azoto, tokie kaip UF, MUF ir EPI klijai/dervos. Deginant svarbu palaikyti tinkamas degimo sąlygas ir deguonies tiekimą, nes kitu atveju, vyks blogas degimas ir formuosis toksiški junginiai, tokie kaip vandenilio cianidas, izocianatas.

1.8 lentelė. Azoto virtimas į NO_x degimo metu, prie 850 °C [28]

Mėginys	Klijai	Azotas mėginiuose (%)	NO _x emisijos (ppm)
Medienos drožlių plokštė	UF	4,1	380
Medienos granulės	–	0,11	80
Buko fanera	–	0,08	80
Klijuota buko fanera	EPI	0,19	127
Klijuota buko fanera	MUF	1,2	278
Klijuota buko fanera	UF	1,7	275
Sukietinti klijai	EPI	3	450
Sukietinti klijai	MUF	21	630
Sukietinti klijai	UF	27	930

Apibendrinus matome, kad didėjant degimo efektyvumui, didėja NO_x kiekiai, o prie blogo degimo daugėja nepilno degimo produktų (CO, angliavandeniliai). Degimas turi būti optimizuojamas tiek pagal azoto oksidus, tiek pagal tarpinius degimo produktus.

1.4. Medienos kompozitų panaudojimo kaip kuro energijai gauti teisinis reglamentavimas Lietuvoje

Deginant medienos kompozitus į aplinką išsiskiria tam tikri teršalai: SO₂, NO_x, kietosios dalelės, CO, organiniai junginiai ir kiti specifiniai teršalai (vandenilio cianidas (HCN), druskos rūgštis (HCl), fluoro rūgštis (HF), amoniakas (NH₃), sieros trioksidas (SO₃) [3].

Todėl reikia laikytis biokurą deginančių įrenginių reikalavimų dėl išmetamų teršalų, kurie Lietuvoje išdėstyti šiuose norminiuose dokumentuose [29 – 31]:

1. Lietuvos Respublikos aplinkos ministro 2013 m. balandžio 10 d. įsakymas Nr. D1-244 „Dėl Išmetamų teršalų iš kurą deginančių įrenginių normų LAND 43-2013 patvirtinimo“.
2. Lietuvos Respublikos aplinkos ministro 2017 m. rugsėjo 18 d. įsakymas Nr. D1-778 „Dėl Išmetamų teršalų iš vidutinių kurą deginančių įrenginių normų patvirtinimo“.
3. Lietuvos Respublikos aplinkos ministro 2013 m. balandžio 10 d. įsakymas Nr. D1-240 „Dėl Specialiųjų reikalavimų dideliems kurą deginantiesiems įrenginiams patvirtinimo“.

Iš biomasę deginančių įrenginių išmetamų azoto oksidų, kietųjų dalelių, sieros dioksido, anglies monoksido ribinės vertės pateikiamos lentelėse, esančiose 5 priede (žr. 5 priedą).

Identifikuojant medienos kompozitų kilmę galima remtis Lietuvos Respublikos energetikos ministro 2017 m. gruodžio 6 d. įsakymu Nr. 1-310 „Dėl Kietojo biokuro kokybės reikalavimų patvirtinimo“. Remiantis Kietojo biokuro kokybės reikalavimų 1 priedu „Kietojo biokuro gamyboje naudojamų

medžiagų kilmė ir šaltiniai“ (žr. 1.9 lentelė) matome, kad medienos biomasei priskiriama medienos ir kitų pramonės šakų šalutiniai produktai bei naudota mediena. Tačiau, medienos kompozitai turi neturėti halogenintų organinių junginių ir sunkiųjų metalų [32].

1.9 lentelė. Kietojo biokuro gamyboje naudojamų medžiagų kilmė ir šaltiniai [32]

Kilmė	Šaltiniai	
Medienos biomasė	Medienos ir kitų pramonės šakų šalutiniai produktai	Chemiškai neapdoroti (pvz. dėl žievės skutimo, pjovimo arba matmenų mažinimo, drožimo, presavimo, apdorojimo oru, vandeniu ar karščiu).
		Chemiškai apdoroti, tačiau dėl apdorojimo konservantais, klįjavimo arba dengimo neturinčios sunkiųjų metalų arba halogenintų organinių junginių, gamybos liekanos, susidariusios apdirbant ar apdorojant medieną, baldų pramonėje ar gaminant medžio plokštes.
	Naudota mediena	Vartotojų (visuomenės) naudota mediena, kuri vadovaujantis Lietuvos Respublikos atliekų tvarkymo įstatymu tampa nebe atliekomis ją panaudojus, įskaitant, kai ji perdirbama, ir ši naudota mediena yra:
		tik mechaniškai apdirbta;
		mechaniškai apdirbta ir nežymiai užteršta ar chemiškai apdorota medžiagomis, kurios paprastai nerandamos natūralioje medienoje. Dėl šio užteršimo ar apdorojimo mediena privalo neturėti sunkiųjų metalų arba halogenintų organinių junginių.

Taip pat reikia laikytis šiame įsakyme nustatytų leistinų maksimalių cheminių elementų koncentracijų verčių kietajame biokure (žr. 6 Priedą).

Gamybos metu įmonėse susidarę medienos kompozitų susidariusios liekanos, gali būti laikomos šalutiniais produktais, jeigu tenkina sąlygas išvardytas Lietuvos Respublikos aplinkos ministro ir Lietuvos Respublikos ūkio ministro 2012 m. sausio 17 d. įsakyme Nr. D1-6/4-63 „Dėl Gamybos liekanų priskyrimo prie šalutinių produktų tvarkos aprašo patvirtinimo“ [33]. Tokiu atveju, nereikia susidariusiems šalutiniams produktams (medienos kompozitams) vykdyti atliekų apskaitos ir jie nėra priskiriami atliekoms [3]. Tačiau norint naudoti medienos kompozitų liekanas kaip kurą energijai išgauti, jos dar turi atitikti anksčiau minėtus kietojo biokuro kokybės reikalavimus.

1.5. Literatūros apžvalgos apibendrinimas

Apibendrinus medienos ir panaudotos medienos klasifikavimą ir naudojimą ES šalyse, galima teigti, kad medienos, jos gaminių bei medienos atliekų klasifikavimas nagrinėtose ES šalyse (Vokietijoje, Jungtinėje Karalystėje, Suomijoje, Nyderlanduose) yra panašus (medienos kompozitai klasifikuojami į 4 klases). Medienos ir jos kompozitų atliekos, kuriose nėra konservantų bei organinių chloro junginių ir sunkiųjų metalų kiekis neviršija nustatytų ribų, leidžiamos deginti energijos gamybai visose nagrinėtose šalyse, tačiau apibrėžiama minimali katilo galia. Suomijoje taikomi kokybės rodikliai medienos atliekoms yra griežtesni už Lietuvoje galiojančius kietojo biokuro kokybės reikalavimus, o Jungtinėje Karalystėje taikomos daug griežtesnės emisijų ribinės vertės nei nustatytos LAND 43-2013 normose Lietuvoje.

Atlikus literatūros apžvalgą išsiaiškinta, kad medienos deginimo procesą sudaro 4 etapai, kuriuose deginamas kuras tampa pelenais. Ilgiausias etapas, kuris sudaro beveik pusę viso degimo laiko, yra kietojo kuro likučio (kokso) degimas. Jam reikalinga 800 – 1000 °C temperatūra. Kalbant apie reglamentuojamų teršalų (NO_x, CO) emisijų išsiskyrimus deginant medienos kompozitus, galima teigti, kad kompozituose, kuriuose yra fenolio formaldehidinių dervų išsiskiria didesnis kiekis CO ir angliavandenilių, negu deginant juos su karbamido formaldehidinėmis dervomis ir paprastą neapdorotą medieną. NO_x didesnės emisijos susidaro ten, kur yra kompozitai su klėjais, kurie sudaryti iš azoto, tokie kaip UF, MUF ir EPI klėjai/dervos.

2. Tyrimų metodika

2.1. Tyrimams naudoti standai

Medienos kompozitų deginimo tyrimai buvo atlikti dviejuose skirtinguose stenduose: pramoniniame biokuro katile ir buitiniame granuliniame katile „Kalvis“ – 17.

Pramoninis biokuro katilas

Pramoninio katilo modelis yra skirtas įvairių biokuro rūšių bei jų formų deginimui. Tai gali būti spygliuočių ir lapuočių skiedros, granulės, pjuvenos ir kitas kuras. Leistinas deginimui kuro drėgnumas < 55 proc. Šį katilą pagamino biokuro katilų gamintoja įmonė UAB „Enerstena“. Katile sienos padengtos mūru, todėl degimo zonoje aukšta temperatūra, degimo produktai ilgai išbūna degimo zonoje [3].

Kuras iš kuro bunkerio į pakurą yra paduodamas sraigtiniu transporteriu. Kuro padavimo į pakurą intensyvumas reguliuojamas dažnio keitikliu, o sraigta suka variklis su reduktoriumi. Tai lemia nuolatinį ir pastovų kuro tiekimą. Mechanškai reguliuojamas kuro judėjimas judančiu ardynu, nepriklauso nuo kuro padavimo spartos. Būtent judančios ardelės stumia kurą pro atskiras džiovinimo ir degimo zonas [35].

Visas oras, dalyvaujantis biokuro sudeginime, gali būti valdomas ventiliatoriais. Degimui ant ardyno palaikyti tiekiamas pirminis oras. Pirminis oras užtikrina biokuro degimui skirtą pakankamą oro kiekį naudojant ventiliatorių. Šis oras paduodamas į degimo kamerą po ardynu ir teka pro ardelių plyšius. Tokio degimo metu vyksta pirolizė. Taip pat pirminis oras atlieka ardelių aušinimą. Antrinis oras skirtas galutinai sudeginti pirolizės metu išsiskyrusias lakiąsias medžiagas iš biokuro. Antrinis oras yra paduodamas į degimo zoną virš ardyno [35].

Degimo metu susidarę karšti degimo produktai tiekiami į dviejų eigių katilą. Katilo maksimali galia – 30 kW. Dūmų šalinimą užtikrina dūmsiurbis. Pakuroje sudegus kurui, nesudegusi dalis (sunkieji pelenai) krenta į pakuros apačioje įrengtas pelenų talpas [35].

Katilo techniniai rodikliai [35]:

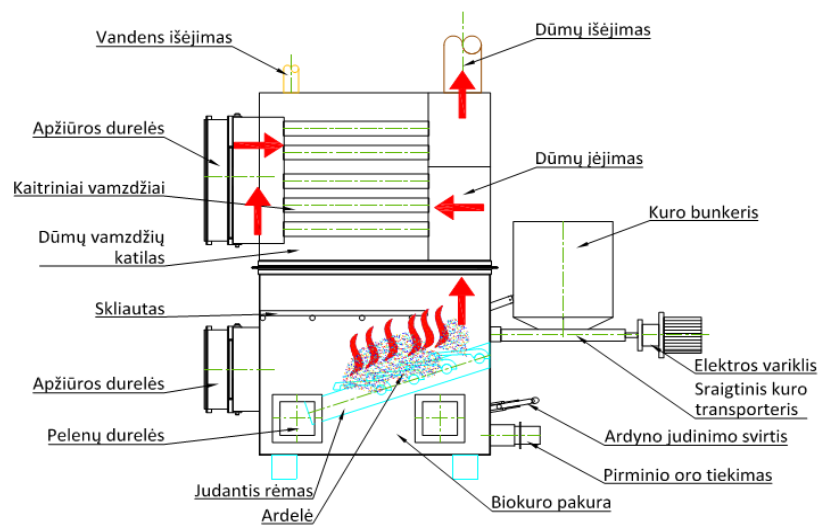
- Maksimali galia 30 kW;
- Nominali galia 17 kW;
- Darbinis slėgis – 2 bar;
- Darbinė temperatūra – iki 95 ° C;
- Minimali vandens temperatūra prieš katilą – 60 ° C.

Paveiksle matoma (žr. 2.1 pav.) įmonės UAB „Enerstena“ sukonstruotas pramoninio biokuro katilo modelis, jau vykstant degimo procesui.



2.1 pav. Pramoninio biokuro katilo modelis

Iš schemos matoma (žr. 2.2 pav.), kad kūrykloje įrengtas judinamasis ardynas, pirminio ir antrinio oro tiekimo degimui ventiliatoriai, dūmų šalinimo sistema bei įrengtas apžiūros langas, kad būtų galima stebėti procesą. Schemoje pavaizduota ir dūmų srauto judėjimo kryptis.



2.2 pav. Pramoninio katilo modelio schema [35]

Paveiksle matoma (žr. 2.3 pav.) naudojamas sraigtas kuro padavimui į pakurą. Variklis su reduktoriumi ir dažnio keitikliu suka šį sraigatą ir taip užtikrina nuolatinį bei nekintantį naudojamo kuro tiekimą.



2.3 pav. Kuro bunkeris su padavimo sraigtu (proceso metu)

Pramoniniame katile pasiekiamas geras kuro sudegimas, degimo režimas stabilus ir svyravimai nedideli [3].

Buitinis granulių katilas

Medienos granulėms deginti skirtas butinis katilas „Kalvis“ – 17. Šiame katile galima deginti malkas, skiedras, pjuvenas, ir granules. Gamintojo numatytas leistinas kuro drėgnumas < 30 proc. Katilams būdinga žema degimo temperatūra, nes sienelės aušinamos vandeniu. Katilo tūris skirtas granulių degimui, nes yra kelis kartus mažesnis. Antra – pakuroje kuras yra stumiamas tik transporterio, o ne judančio ardyno. Trečia – pirminis oras yra paduodamas iš pakuros šonų.

Šiems katilams būdingas veikimo periodiškumas, nes kuras iš bunkerio tiekiamas kuro padavimo sraigtu į pakurą per kelias sekundas ir vėliau kelias minutes netiekiamas. Pakuroje ventiliatoriumi tiekiamas pirminis oras, palaikantis degimą. Sudegusio kuro pelenai iš pakuros į pelenų bunkerį yra pašalinami automatiškai pelenų šalinimo sraigtiniu transporteriu. Dūmai teka vertikaliais kaitrovamzdžiais dūmtakio link. Katile kuro sluoksnis nejudinamas, todėl kuro sudegimas yra blogas ir atsiranda daugiau nesudegimo produktų, kurių sudėtis yra nepastovi [3, 26, 34].

Paveiksle matomas (žr. 2.4 pav.) granuliuoto kuro buitinis katilas tyrimų metu. Buitiniame katile buvo deginamos tik 1, 2 ir A klasės kuro rūšys (natūrali mediena ir neapdoroti kompozitai). Techniniai katilo parametrai pateikiami lentelėje (žr. 2.1 lentelė).



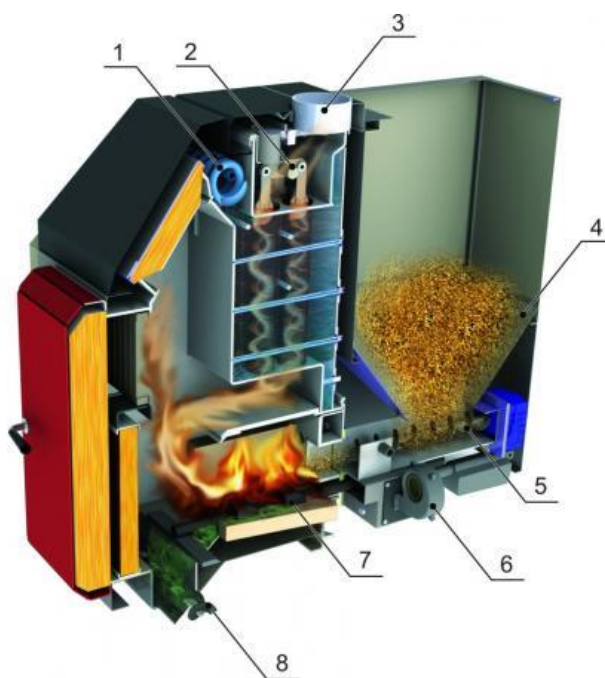
2.4 pav. Granuliuoto kuro buitinis katilas “Kalvis”-17

2.1 lentelėje pateikiami buitinio katilo techniniai parametrai. Buitiniai kuro katilai skirti administracinių, visuomeninių ar nedidelių gamybinių (iki 1000 m²) dydžio patalpų apšildymui, todėl jie yra mažesnio tūrio ir galingumo, palyginus su pramonės paskirties katilais.

2.1 lentelė. Techniniai buitinio katilo parametrai [26]

Modelis	KSM – 175 – 13 – U
Galingumas	13 kW
Naudingumo koeficientas	87 %
Naudojamas kuras	Pjuvenų, durpių granulės 6 – 8 mm. Užkraunant rankomis: malkos, medienos atliekos, pjuvenų-durpių briketai, akmens anglis.
Darbinis slėgis	0,15 MPa
Vandens kiekis katile	900 l
Vandens temperatūros	70 – 90 °C

Toliau pateikiama detali buitinio katilo schema (žr. 2.5 pav.). Schemoje matoma apatinio degimo kietojo kuro katilas, jis yra efektyvesnis už viršutinio degimo katilus, nes kuro įkrova dega tolygiau, pastoviau išsiskiria ir šiluma. Kai dega apatinė degimo įkrovos dalis, kuro sluoksnis pamažu slenka, vyksta savaiminis judėjimas į degimo židinį [26].



2.5 pav. Granulioto kuro buitinio vandens šildymo katilo „Kalvis“-17 schema [26]

- 1- vandens šildymo spiralė, 2 – dūmų turbulizatoriai ir judinimo mechanizmas, 3 – dūmų ištekėjimas,
 4 – kuro talpykla, 5- kuro tiekimo į pakurą sraigtas, 6- oro tiekimo ventiliatorius, 7-pelenų stūmiklis, 8- pelenų šalinimo sraigtas.

2.2. Tiriamų medžiagų atranka ir jų aprašymas

Iš įvairių Lietuvos įmonių (baldų gamintojai, plokščių gamintojai, granuliuotojai) buvo atrinkti ėminiai (natūrali mediena, žievė, granulės ir medienos kompozitai) tyrimams atlikti (žr. 2.6 pav.). Kiekvieno ėminio turėta apie 60 – 90 kg. Prieš atliekant deginimo tyrimus, tam tikri kompozitai buvo smulkinti (malami) ir atsijojami iki 5 – 10 mm dalelių.



2.6 pav. Tiriamos medžiagos laboratorijoje

Trumpas medžiagų apibūdinimas ir klasifikavimas (kuro rūšies šaltinis, degimo sąlygos (geras ir blogas degimas) ir katilo rūšis), pateikiami žemiau esančioje lentelėje (žr. 2.2 lentelė).

2.2 lentelė. Tiriamų ėminių klasifikavimas, esant skirtingiems katilams ir degimo režimams [3]

Klasė		Tiriamų ėminių apibūdinimas		Buitinis katilas "Kalvis"-17		Pramoninis katilas		Šaltinis
				Geras degimas	Blogas degimas	Geras degimas	Blogas degimas	
1	1.1	Natūrali neapdorota mediena	Natūralios medienos granules	BT-1-1-p	BT-1-1-np	PR-1-1-p	PR-1-1-np	LT granulių gamintojas
	1.2		Natūralios medienos drožlės (skiedra, čipsai)	BT-1-2-p	BT-1-2-np	PR-1-2-p	PR-1-2-np	LT biokuro katilinė
	1.3		Malkos (nesmulkintos)	-	BT-1-3-np	-	-	Namų ūkis
2	2	Žievė	Pušų ir beržo smulkinta žievė	BT-2-p	BT-2-np	PR-2-p	PR-2-np	LT ūkininkai
A	A1	Neapdoroti medienos kompozitai (MDP,MPP, fanera, medžio masyvo plokštė)	MDP (neapdorota) smulkinta	-	-	PR-A1-p	PR-A1-np	LT plokščių gamintojas
	A2		MDP (neapdorota) nesmulkinta	-	BT-A2-np	-	-	Namų ūkis
	A3		Fanera neapdorota	BT-A3-p	BT-A3-np	BT-A3-p	BT-A3-np	LT baldų gamintojas
	A4		Medienos plokščių atliekų granules	BT-A4-p	BT-A4-np	-	-	LT granulių gamintojas
B1	B1.1	Lakštinė dangom (melamine ir fenolio kaširatas (popieriaus danga), natūralus lukštas, HPL) dengtos plokštės (MDP, MPP, fanera, medžio masyvo plokštė)	MDP kaširuota	-	-	PR-B1-1-p	PR-B1-1-np	LT plokščių gamintojas
	B1.2		MDP dengta dažytu melamino popieriumi	-	-	PR-B1-2-p	PR-B1-2-np	LT plokščių gamintojas
	B1.3		MDP su HPL danga (stalviršiai)	-	-	PR-B1-3-p	PR-B1-3-np	LT plokščių gamintojas

2.2 lentelės tęsinys

Klasė		Tiriamų ėminių apibūdinimas		Buitinis katilas “Kalvis”-17		Pramoninis katilas		Šaltinis
				Geras degimas	Blogas degimas	Geras degimas	Blogas degimas	
B2	B2.1	skystom dangom (dažai, lakai, gruntai, ir kt.) dengtos plokštės (MDP, MPP, fanera, medžio masyvo plokštė), kurių apdorojimo medžiagose nėra halogenintų organinių junginių, sunkiųjų metalų ir konservantų	MPP (MDF dengta vandeniniais dažais)	-	-	PR-B2-1-p	PR-B2-1-np	LT baldų gamintojas
	B2.2		Fanera (lakuota)	-	-	PR-B2-2-p	PR-B2-2-np	LT faneros gamintojas
B3/C	B3.1	įvairiom dangom (kietom ir/ar skystom) dengtos plokštės (MDP, MPP, fanera, medžio masyvo plokštė), kurių apdorojimo medžiagose yra arba gali būti (nežinoma) halogenintų organinių junginių, sunkiųjų metalų ir konservantų	MDP dengta UV medžiagomis (balta)	-	-	PR-B3-1-p	PR-B3-1-np	LT baldų gamintojas
	B3.2		HDF, MDP ir korys su lukštu, dažytas vandeninio pagrindo beicu (tamsi ruda)	-	-	PR-B3-2-p	PR-B3-2-np	LT baldų gamintojas

Šių tyrimų metu buvo deginama 15 kuro rūšių. Pramoniniame katile prie dviejų degimo režimų (geras ir blogas) buvo deginamos beveik visos kuro rūšys, išskyrus malkas, neapdorotą MDP ir medienos plokščių atliekų granules. Buitiniame katile buvo deginamos tik pirmos, antros ir A klasės kuro rūšys (natūrali mediena ir neapdoroti kompozitai).

2.3. Teršalų koncentracijos matuokliai

Medienos kompozitų deginimo metu dujinės fazės teršalų koncentracijoms išmatuoti buvo naudojami trys įrenginiai: dujinių degimo produktų analizatorius „Gasmet“, degimo produktų komponentų analizatorius „Multilyzer NG“ ir optinis kietųjų dalelių koncentracijos matavimo prietaisas „Afriso STM 225“. Dujinių degimo produktų ir kietųjų dalelių koncentracijos matuojamos nerūdijančio plieno kanale, kuris yra termiškai izoliuotas. Matavimo zondai įstatomi į atitinkamas angas, kad būtų statmeni dūmų judėjimo kryptims.

Dujinių degimo produktų analizatorius Gasmet DX 4000

Emisijose esančių dujinių išlakų kiekio matavimui buvo naudojamas degimo produktų (H_2O , CO_2 , CO , NO , NO_2 , N_2O , SO_2 , NH_3 , CH_4 , HCl , HF , CiH_j , O_2 ir kt.) analizatorius DX-4000, kuris gali matuoti iki 50 skirtingų dujų vienu metu (žr. 2.7 pav.). Tai yra kilnojamas FTIR (Furjė transformacijos infraraudonųjų spindulių spektroskopija) dujų analizatorius, skirtas tirti dujinių junginių koncentraciją karštoje ir drėgnoje dujų aplinkoje. Furjė transformacijos infraraudonųjų spindulių spektroskopijos analizatorius veikia, skenuojant visą infraraudonųjų spindulių spektrą. Programinė įranga apskaičiuoja kiekvieno mėginio dujų koncentraciją, remiantis charakteringa adsorbcija [36].



2.7 pav. Dujinių degimo produktų analizatorius Gasmet DX 4000

Visos mėginio dujos gali būti matuojamos vienu metu, nes visas infraraudonųjų spindulių spektras yra nuskaitymas iš karto. Tai leidžia atlikti labai greitus daugiakomponentinius matavimus ir kompensuoti bet kokius besikertančius trukdžius. Kadangi visos dujos matuojamos skenuojant tą patį infraraudonųjų spindulių spektrą, naujus junginius galima lengvai nustatyti programinėje įrangoje, nereikalaujant jokių įrangos pakeitimų. Korozijai atspari mėginio celė yra kaitinama iki 180 °C, kas užtikrina, mėginio buvimą dujinėje fazėje, net kai yra aukštos koncentracijos H₂O arba korozinių dujų [36].

Degimo produktų komponentų analizatorius Multilyzer NG

Dujų matavimams buvo naudotas degimo produktų analizatorius „Multilyzer NG“ (Vokietija) (žr. 2.8 pav.). Dūmų sudėties matuoklis, arba kitaip dūmų analizatorius, matuoja: NO_x, CO, SO₂, O₂ ir dūmų srauto temperatūras. Šiuos taksogenus iš dūmų trakto per zondą siurbia analizatoriuje integruotas dujų siurblys. Siurbiamos dujos yra nusausinamos drėgmės surinktuve. Nusausintos dujos filtruojamos pro mechaninį filtrą nuo nesudegusių produktų tokių kaip suodžiai kurie galėtų užteršti elektrocheminius jutiklius. Paruoštos dujos tiekiamos į tris, dažniausiai nuosekliai sujungtus, kietus skirtingus elektrocheminius jutiklius (celes). Kiekvienas elektrocheminis jutiklis yra atsakingas tik už tam tikro teršalo koncentracijos matavimą. Iš jutiklių išeinantys analoginiai signalai konvertuojami į skaitmeninį kodą. Prietaiso operatyvinėje atmintyje atlikus skaičiavimus rezultatai pateikiami prietaiso ekrane, gali būti atspausdinti, išsaugoti vidinėje atmintyje arba kompiuteryje. [37].



2.8 pav. Analizatorius Multilyzer NG

CO, NO_x ir SO₂ emisijų koncentracijos perskaičiuojamos pagal normines reikšmes, esant 6 proc. deguonies.

Optinis kietųjų dalelių koncentracijos matavimo prietaisas STM 225

Kietųjų dalelių koncentracijai realiu laiku nustatyti buvo naudotas Afriso STM 225 matuoklis (žr. 2.9 pav.). Jis nuolat dujų sraute nustatinėja dalelių masę ir per 15 minučių (pasirinktinai 30 minučių) pateikia matavimo metu nustatytą vidutinę dalelių koncentracijos vertę. SMT 225 veikia išsklaidytos šviesos matavimo principu, optinio matavimo metodu su 1 klasės lazeriu. Lazerio tarnavimo laikas priklauso nuo panaudojimo ir vartotojo, yra maždaug 5000 valandų [38].



2.9 pav. Kietųjų dalelių koncentracijos matuoklis Afriso STM 225 tyrimų metu

Šio įrenginio komplektą sudaro kietų dalelių monitorius SMT 225 ir šildoma mėginių linija su paėmimo zonda. Siurbiamos dujos yra tiekiamos per zondą ir kaitinamą žarną. Kaitinimo žarna palaiko pastovią 60 °C laipsnių temperatūrą. Matavimo taškai buvo už šilumokaičio [38].

2.4. Emisijų koncentracijų perskaičiavimai

Dujų analizatorius emisijų koncentracijas pateikia milijoninių dalių išraiška, todėl gauti emisijų koncentracijų rezultatai perskaičiuojami į miligramus kubiniame metre normaliomis sąlygomis. Normalios sąlygos apibrėžiamos, kai yra 0 °C temperatūra ir išmetamosiose dujose atmetami atmosferinis slėgis bei vandens garai [3].

Emisijų koncentracijų rezultatai perskaičiuojami pagal (2.1) formulę [39]:

$$C_{i\check{s}} \left(\frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \right) = C_{i\check{s}}(\text{ppm}) \cdot \frac{M_x}{V_M} \quad (2.1 \text{ formulė})$$

čia

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

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

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

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

Emisijų koncentracijų rezultatai taip pat pateikti perskaičiuavus prie standartinio O₂ kiekio – 6 proc. (vidutinio dydžio kietąjį kurą deginantiesiems įrenginiams).

Atskiro išmetamo teršalo išmatuotos koncentracijos perskaičiuojamos, esant standartinei O₂ koncentracijai, pagal (2.2) formulę [39]:

$$C_{st} = C \cdot \frac{21 - O_{2st}}{21 - O_{2iš}} \quad (2.2 \text{ formulė})$$

čia

C_{st} – nustatomo teršalo koncentracija mg/Nm³ perskaičiuota esant standartinei deguonies koncentracijai;

O_{2st} – standartinė deguonies koncentracija, nurodyta normatyviniuose dokumentuose, tūrio procentais;

$O_{2iš}$ – išmatuota deguonies koncentracija išmetamosiose dujose, tūrio procentais.

2.5. Gero ir blogo degimo režimo nustatymas stenduose

Atliekant eksperimentus pramoninio ir buitinio katilo stenduose, buvo sudaryti du degimo režimai – geras ir blogas degimas. Norint pasiekti gero sudegimo režimą, reikia taip suderinti katilo veikimą, kad būtų kuo mažesnė anglies monoksido koncentracija dūmuose. Padavus daugiau deguonies į pakurą, pramoninio biokuro katilo stende minimalios CO koncentracijos siekė tik kelis šimtus mg/m³. Tuo tarpu, buitinio katilo stende CO koncentracijos – viršijo tūkstančius mg/m³. Pramoninio katilo stende blogo degimo režimas buvo pasiektas mažinant antrinio oro kiekį, o buitinio katilo stende – mažinant oro tiekimą į sistemą.

Visi kuro degimo procesai stenduose atlikti vienodai, kaip ir vyksta realiai veikiančiuose įrenginiuose. Pramoninio katilo stende – nenutraukiamai buvo tiekiamas kuras, judinamas ardynas, stabiliai tiekiamas pirminis ir antrinis oras į skirtingas degimo zonas, degimo produktų kelias ilgas. Buitinio katilo stende – kuro tiekimas vyko nutraukiamai, oras buvo tiekiamas vienodai (nekeičiamas), ardynas buvo stacionarus.

2.6. Analizuojami degimo teršalai

Atliekant tyrimus buvo matuota degimo produktų sudėtis ir buvo nustatyta apie 40 komponentų koncentracijų, kai buvo deginama 15 kuro rūšių prie skirtingų degimo režimų. Kuro degimo procesui iliustruoti buvo pasirinkta tam tikri degimo produktai, iš kurių rezultatų būtų galima daryti atitinkamai reikšmingas išvadas, susijusias su medienos kompozitų deginimu buitiniuose ir pramoniniuose katiluose. Buvo atsižvelgta į analizuojamų degimo produktų poveikį aplinkai ir žmogui. Rezultatuose pateikiamos koncentracijos kuro deginimo įrenginių normomis reglamentuojamų teršalų: sieros dioksido (SO₂), azoto oksidų (NO_x), anglies monoksido (CO) ir kietųjų dalelių (KD). Taip pat nepilno degimo dujiniai produktai, tokie kaip sotieji angliavandeniliai (metanas (CH₄)), nesotieji angliavandeniliai (etilenas (C₂H₄)), aromatiniai angliavandeniliai (benzenas (C₆H₆)), aldehydai (formaldehidai (CH₂O)), organinės rūgštys (acto rūgštis (C₂H₄O₂)). Apibendrinimui, organiniams junginiams, apžvelgtas suminės organinių junginių koncentracijos kitimas. Taip pat atsižvelgta ir į

specifinius teršalus, kurie gali susidaryti deginant medienos kompozitus: vandenilio cianidas (HCN), druskos rūgštis (HCl).

Visų, minėtų teršalų, koncentracijų kitimai pavaizduoti grafiškai (žr. 3.1, 3.2, 3.3 poskyrius) kai medienos kompozitai buvo deginami buitinio ir pramoninio katilo stenduose prie skirtingų degimo režimų (gero ir blogo degimo).

Matavimo rezultatai buvo gauti drėgnuose dūmuose, esant realiai oro pertekliaus koeficiento reikšmei. Norint palyginti išmatuotas reikšmes su reglamentuose normuojamomis vertėmis, teršalų koncentracijos buvo perskaičiuotos į norminį oro perteklių, atitinkantį 6 proc. deguonies koncentraciją, taip pat sausų dūmų atžvilgiu (žr. 2.4 skyrių) bei yra pateikiamos mg/m^3 . Taip pat grafinėje medžiagoje (žr. 3.5 ir 3.12 pav) pateikiami palyginamieji koreliacijos grafikai su tam tikrais teršalais.

2.7. Tyrimų eiga

Prieš atliekant matavimus, tam tikri ėminiai buvo permaišomi, kad frakcijos pasiskirstymas būtų vienodas. Pirmiausia nustatomi visi reikalingi nustatymai ir paruošiamas kuras bei katilas degimo procesams vykdyti. Abu katilai (buitinis ir pramoninis) pačioje tyrimų pradžioje buvo užpildomi įprastomis medžio granulėmis. Toliau sujungiamas pultas ir nustatomi žinomi pirminio, antrinio oro, kuro tiekimo sraigto, ardyno judėjimo ir traukos nustatymai. Įjungiami: plokštelinis vandens šilumokaitis, orinis kaloriferis, cirkuliacinis siurblys. Kai kuras vienodai pasiskirsto ant ardyno, jis yra uždegamas. Pasiekus užduotą, grįžtančio iš aušinimo sistemos į katilą vandens, temperatūrą ($65\text{ }^\circ\text{C}$) nustatyti norimi degimo režimai. Geras degimas vyksta, kai yra paduodama daugiau deguonies į pakurą (CO koncentracija yra mažiau nei $400\text{ mg}/\text{m}^3$), o blogas degimas vyksta esant nepakankamam oro kiekiui (CO koncentracija yra daugiau nei $400\text{ mg}/\text{m}^3$).

Pasirinktas degimo režimas pasiekiamas atitinkamai nustačius pirminio ir antrinio oro kiekius. Pirminio oro kiekis svyravo nuo $1 - 1,1\text{ m/s}$, o antrinio oro – nuo $0,5 - 0,6\text{ m/s}$. Maždaug praėjus 30 min. po kuro ėminio pakeitimo kuro bunkeryje, buvo atliekamas dujinių junginių emisijų ir kietųjų dalelių matavimas. Kietųjų dalelių koncentracijos matavimai buvo atliekami po 15 min. Dujinių degimo produktų įrenginio „Gasmel“ matavimo laikas buvo derinamas prie kietųjų dalelių matavimo įrenginio laiko. Tik nusistovėjus degimo sąlygoms (deguonies ir CO koncentracijos nekinta), atliekami dujinių produktų ir kietųjų dalelių koncentracijų matavimai. Atlikus konkrečios kuro rūšies dujinės fazės teršalų matavimus, tiriamasis kuras keičiamas ir viskas kartojama iš naujo. Po kiekvieno kuro rūšies sudeginimo, reguliariai buvo ištuštinami pelenų bunkeriai. Reikalui esant, reguliuojamas ir kuro padavimo į pakurą greitis.

Pramoniniame katile kartu su dūmo parametrais, matuojamas ir pastoviai stebimas kintamasis parametras – liepsnos temperatūra. Temperatūra matuota pirmoje ir antroje pakuros degimo zonoje naudojant termoporinius zondus. Pagrindinis tikslas išlaikyti temperatūrą prie $800\text{ }^\circ\text{C}$, kad būtų sudarytos geros sąlygos sudegti pilnai lakiesiems junginiams.

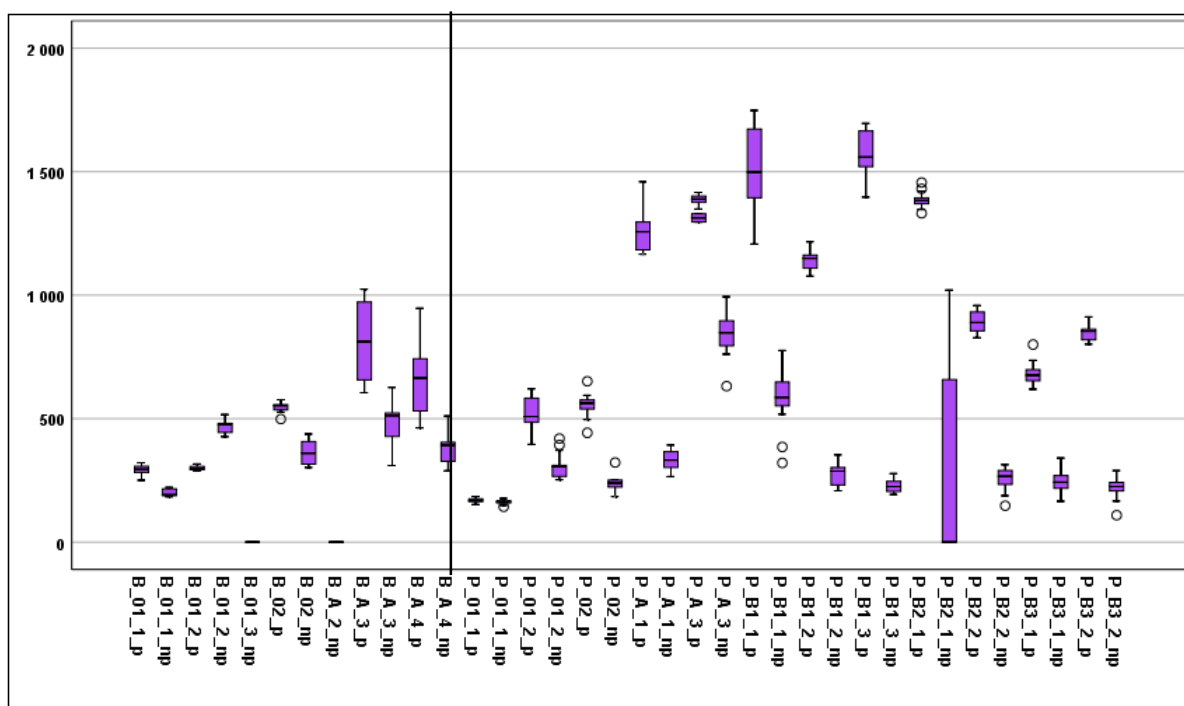
3. Tyrimų rezultatai

3.1 Kuro deginimo įrenginių normomis reglamentuojami teršalai

Azoto oksidai NO_x

Kure azotas yra surištas įvairiuose junginiuose, kuriems skylant degimo reakcijos metu, jis praranda molekulinis ryšius ir jungdamasis su deguonimi formuoja NO_x . Išmetamieji teršalai priklauso nuo azoto kiekio kure ir nuo oro ir kuro mišinio santykio. Aukšta temperatūra ir vykstanti oksidacija deginant kurą lemia didelius NO_x kiekius. NO_2 ir NO sukelia reikšmingą poveikį žmonių sveikatai: NO_2 dirgina kvėpavimo takus, skatina susirgimą kvėpavimo ligomis, o NO trikdo deguonies transportavimą kraujyje [40].

Iš grafiko galime matyti (žr. 3.1 pav), kad NO_x koncentracijos yra mažiausios deginant medžio drožles ir granules. Azoto oksidų koncentracija siekė iki 200 mg/m^3 , atskirais atvejais, viršijo 250 mg/m^3 abiejuose katiluose. Deginant pušies / beržo žieves prie pilno degimo koncentracijos viršijo 500 mg/m^3 . Aukščiausios NO_x koncentracijos ($> 1600 \text{ mg/m}^3$) pastebimos deginant medienos kompozitus dengtus lakštinėm dangom: kaširuota MDP ir MDP su HPL danga. Taip pat galima pastebėti, kad buitiniame katile NO_x koncentracijos yra mažesnės nei pramoniniame katile. Tai lemia nepilnų degimo produktų oksidavimo reakcijos su NO , buitiniame katile dėl prasto degimo susidaro daugiau nepilno degimo produktų (CO), todėl mažiau aptinkama azoto oksidų. Apibendrinus galima teigti, kad mažesnės azoto oksidų koncentracijos susidaro, kai buvo deginami kompozitai, turintys savyje mažiau azoto, ir esant nepilnam degimui.

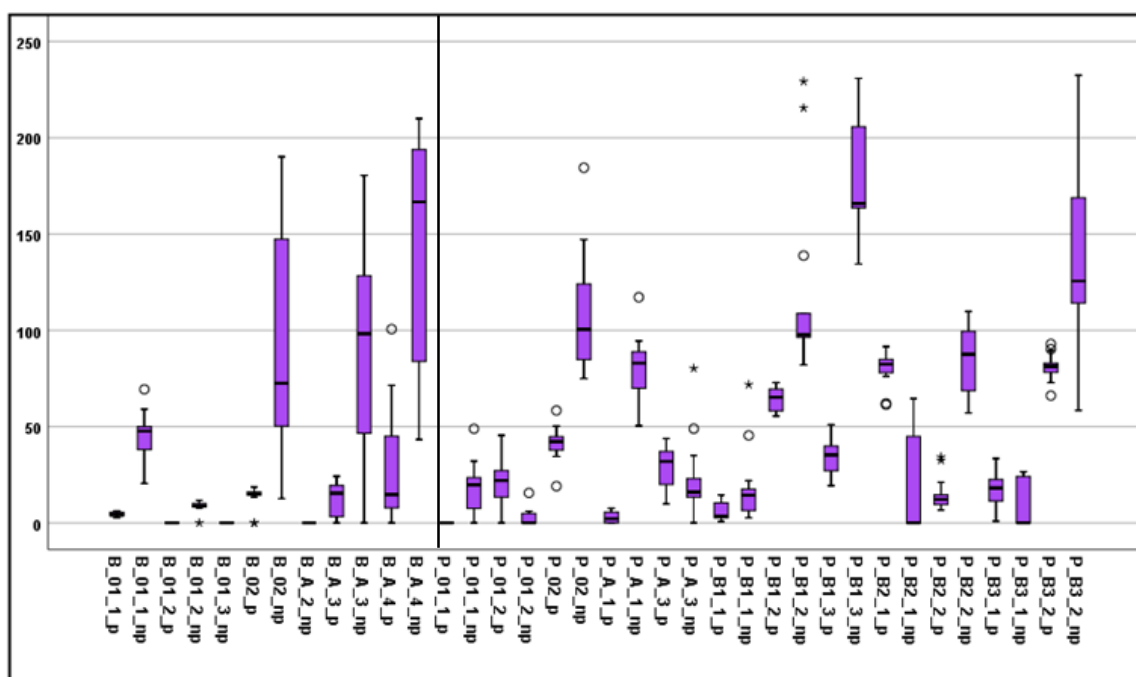


3.1 pav. Azoto oksidų (NO_x) koncentracija, mg/m^3

Sieros dioksidas (SO₂)

SO₂ koncentraciją lemia sieros kiekis kure. Dėl sieros neigiamo poveikio žmogui bei aplinkai (pavojaus sukelti koroziją), ji laikoma ypač nepageidaujamu kuro komponentu. Iš visos SO_x grupės, šis junginys kelia didžiausią susirūpinimą, nes jo koncentracija atmosferoje pastebima didžiausia, o pagrindinis SO₂ išmetimo šaltinis yra iškastinio kuro deginimas jėgainėse. Trumpalaikis SO₂ poveikis gali pakenkti žmogaus kvėpavimo sistemai, priversdamas kvėpuoti sunkiai. Kadangi tai gerai tirpios dujos, jos adsorbuojamos jau viršutiniuose kvėpavimo takuose ir įkvėpus jaučiamas rūgštus skonis [41].

Iš grafiko galima matyti (žr. 3.2 pav.), kad deginant neapdorotą medieną (medienos granules, drožles) abiejuose katiluose SO₂ koncentracija panaši (iki 50 mg/m³). Panašios šių emisijų koncentracijos abiejuose katiluose yra deginant ir neapdorotus medienos kompozitus (A klasė) bei dangom dengiamus medienos kompozitus (B klasė). Visos SO₂ koncentracijos svyruoja iki 200 mg/m³, tik dviem nepilno degimo atvejais koncentracija yra nežymiai didesnė nei 200 mg/m³.



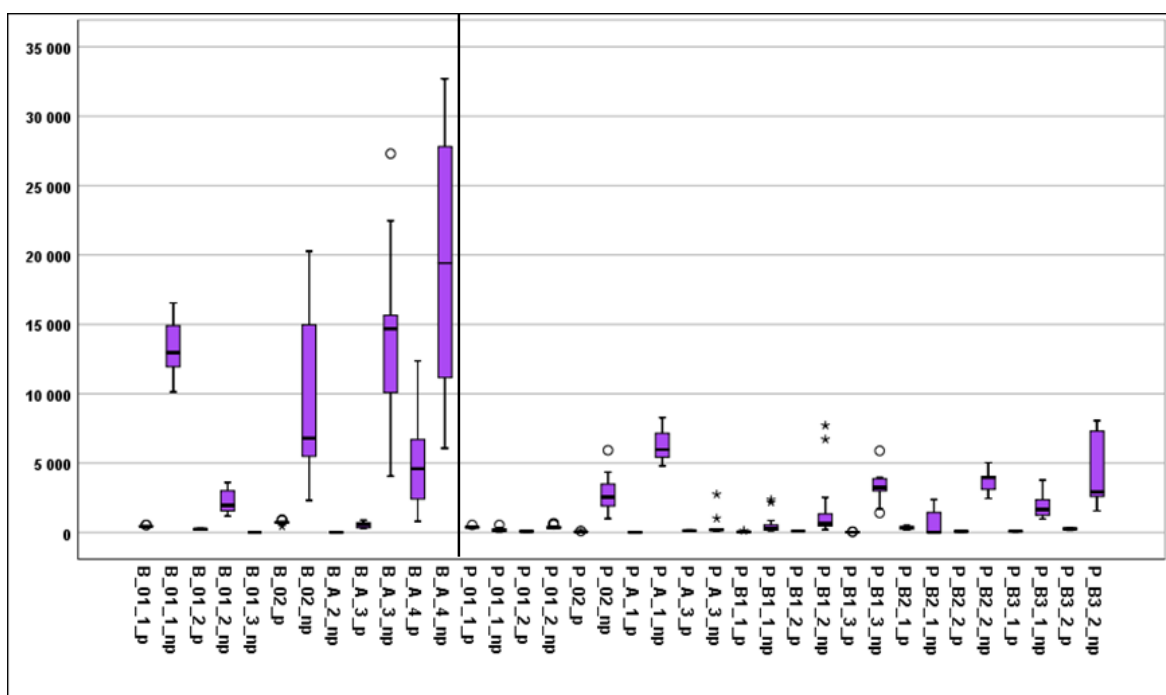
3.2 pav. Sieros dioksido (SO₂) koncentracija mg/m³

Anglies monoksidas (CO)

CO yra labai toksiškos, bekvapės ir bespalvės dujos. Jos patenka į žmogaus kraują ir trikdo deguonies transportavimą, taip žalodamos centrinę nervų sistemą (smegenis) ir širdies-kraujagyslių sistemą, o blogiausiu atveju – sukeldamos mirtį. Kalbant apie antropogeninius CO šaltinius, šis junginys susidaro nepilno degimo metu, o net 70 proc. emisijų susidaro iš vidaus degimo variklių (automobiliai) [42]. Jungtinėje Karalystėje atlikti moksliniai tyrimai, kai buvo deginama skirtinga mediena (maumedis, kaštonas, ąžuolas) esant blogam degimo režimui, 50 kW katilo galiai. Rezultatai

parodė, kad CO koncentracijos stipriai koreliuoja su policikliniais aromatiniais angliavandeniliais ir kitais nepilno degimo produktais. Nustatytas statistiškai reikšmingas ryšys ($p = 0,002$) tarp CO ir policiklinių aromatinių angliavandenilių, o vykstant kuro smilkimui (blogas degimas) abiejų junginių koncentracijos didėjo [43].

Deginant medienos kompozitus, dėl nepilno kuro sudegimo išsiskiria anglies monoksidas. Iš grafiko (žr. 3.3 pav.) galima pamatyti, kad buitiniame katile CO koncentracijos yra keliasdešimt kartų didesnės nei pramoniniame katile. Buitiniame katile galima pastebėti didesnius CO šuolius nuo kelių šimtų iki dešimčių tūkstančių mg/m^3 , tai galėjo nulemti mechaniniai procesai (netolygus kuro tiekimas ir nebirios masės sluoksnio susidarymas) taip pat fizikinės kuro savybės (forma, dydis). Medienos granulių sudarytas kuro sluoksnis dega intensyviau ir yra lengviau prapučiamas oru, negu medienos drožlių kuro sluoksnis. Buitiniame katile kuras tiekiamas netolygiai, nėra judančio ardyno, degimo procesas nestabilus ir tai lemia virš $20000 \text{ mg}/\text{m}^3$ siekiančias vertes. Pramoniniame katile kuras ir oras tiekiamas tolygiai, degimo procesas stabilus, kuro judėjimo kelias ilgas ir CO koncentracijos siekia kelis šimtus mg/m^3 . Tik atskirais atvejais (deginant HDF, MDP ir korį su lukštu) koncentracija viršijo $5000 \text{ mg}/\text{m}^3$. Deginant MDP granules pastebima labai aukšta CO koncentracija, ($> 30000 \text{ mg}/\text{m}^3$) nes tuo metu buvo reguliuotas nepilno degimo režimas, su ypatingai dideliu nesudegimu. Taip pat pastebima, kad esant didelėms CO koncentracijoms, yra išmetama ir daugiau kitų nepilno degimo produktų (žr. 3.4 poskyrį).



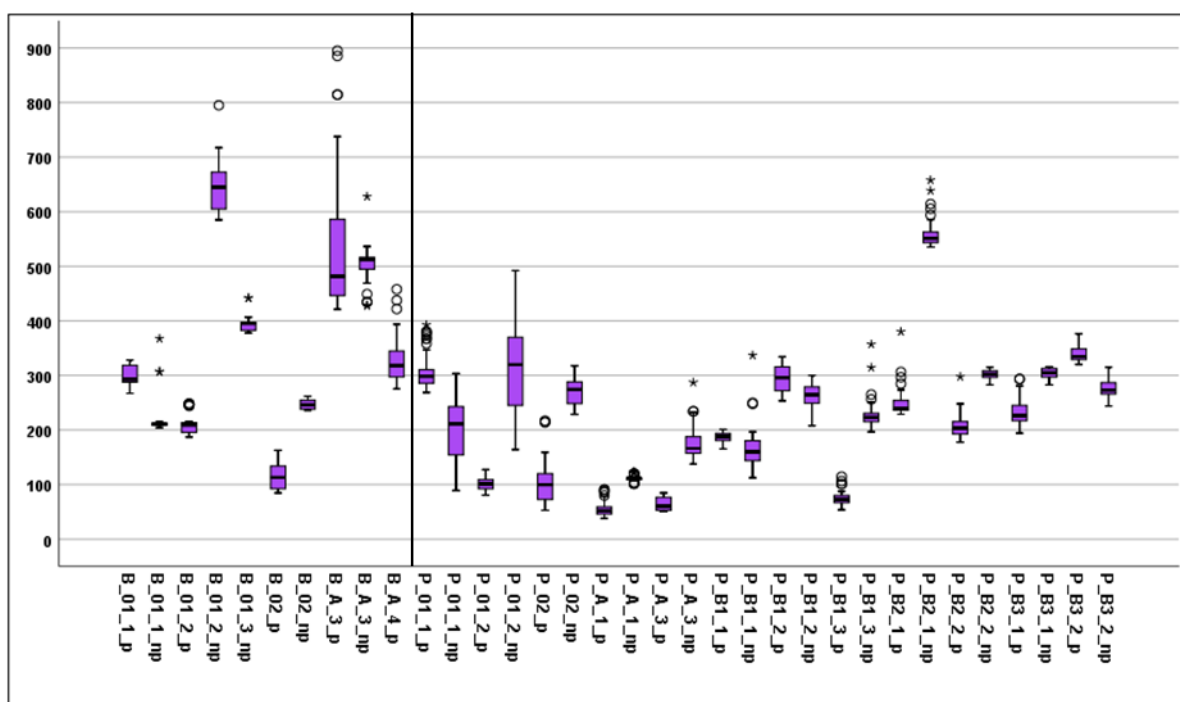
3.3 pav. Anglies monoksido (CO) koncentracija mg/m^3

Kietosios dalelės (KD)

Kietosios dalelės apibūdinamos, kaip ore esančių dalelių ir skystų lašelių mišiniai. Kietosios dalelės pasižymi tuo, kad geba lengvai adsorbuoti toksines medžiagas ir mikroorganizmus ir tai leidžia joms pernešti pavojingas medžiagas. Mažesnės dalelės už $10 \mu\text{m}$ gali prasiskverbti į žmogaus kvėpavimo

takus, bet negiliai, todėl didelis pavojus sveikatai išvengiamas. Tačiau dalelės, kurių diametras yra mažesnis už 2,5 μm sukelia didelį pavojų žmogaus sveikatai, nes skverbiasi giliai į kvėpavimo takus ir lengvai pasiekia plaučius, taip sukeldamos įvairias kvėpavimo sistemos ligas [42, 44].

Iš grafiko galime pastebėti (žr. 3.4 pav.), kad kietųjų dalelių koncentracija daugelyje atvejų pilno degimo režime yra mažesnė nei nepilno degimo režime. Abiejuose katiluose, prie abiejų degimo režimų, koncentracija svyravo 50 – 400 mg/m³. Tam tikrais atvejais, buitiniame katile kietųjų dalelių koncentracija viršijo 400 mg/m³ (deginant medienos drožles, neapdorota medieną, medienos plokščių liekanų granules). Kietųjų dalelių koncentracija priklauso nuo nepilno degimo produktų formavimosi, kuro sudėties ir peleningumo, degimo produkto greičio kūrykloje, oro greičio per kuro sluoksnį. Buitiniame katile dėl prasto kuro sudegimo, nestabilaus degimo, susidaro daugiau nepilno degimo produktų, todėl ir kietųjų dalelių koncentracijos yra didesnės nei pramoniniame katile.

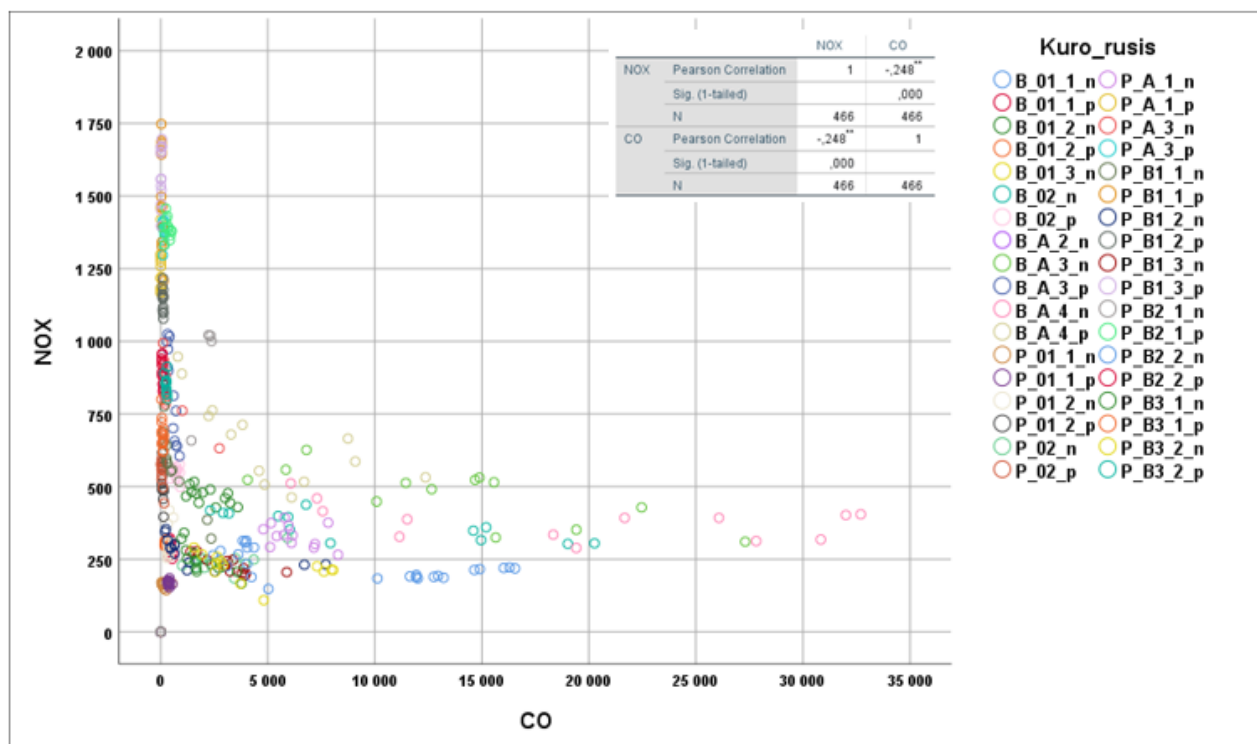


3.4 pav. Kietųjų dalelių (KD) koncentracija mg/m³

Taip pat buvo atlikta koreliacinė analizė NO_x ir CO teršalams, norint nustatyti ar kintamieji vienas nuo kito priklauso ir ar koreliacija yra statistiškai reikšminga (žr. 3.5 pav). Koreliacijos koeficiento (Pirsono koeficientas, $r = -0.248$) vertė rodo, kad ryšys tarp kintamųjų yra silpnas, nors koreliacija statistiškai reikšminga ($p = 0.000$), o pastebima ryšio kryptis – kai CO yra maži kiekiai, NO_x kiekiai išauga.

Didėjantis NO_x formavimasis atsiranda iš ore esančio azoto ir medienos kompozitų sudėtyje esančio azoto. „Terminiai“ NO susidaro aukštesnėje kaip 1260 °C temperatūroje, iš ore esančio O₂ ir N₂. Pagrindinę įtaką jų susidarymui daro fakelo (liepsnos) temperatūra: oro azoto oksidavimui būtina sąlyga yra atominio deguonies (O) buvimas fakele. Deguonies molekulė (O₂) gali disocijuoti į atominę deguonį dėl aukštos temperatūros, tada šis deguonis reaguoja su azoto molekule. Susidaro atominis azotas kuris reaguoja su deguonies molekule ($N_2 + O_2 \rightarrow 2NO$) [45].

Apibendrinus, galima teigti, kad degimo procesas turi būti sureguliuotas pagal abu išsiskiriančius teršalus (CO ir NO_x)



3.5 pav. NO_x koncentracijos (mg/m³) dūmuose priklausomybė nuo CO koncentracijos (mg/m³)

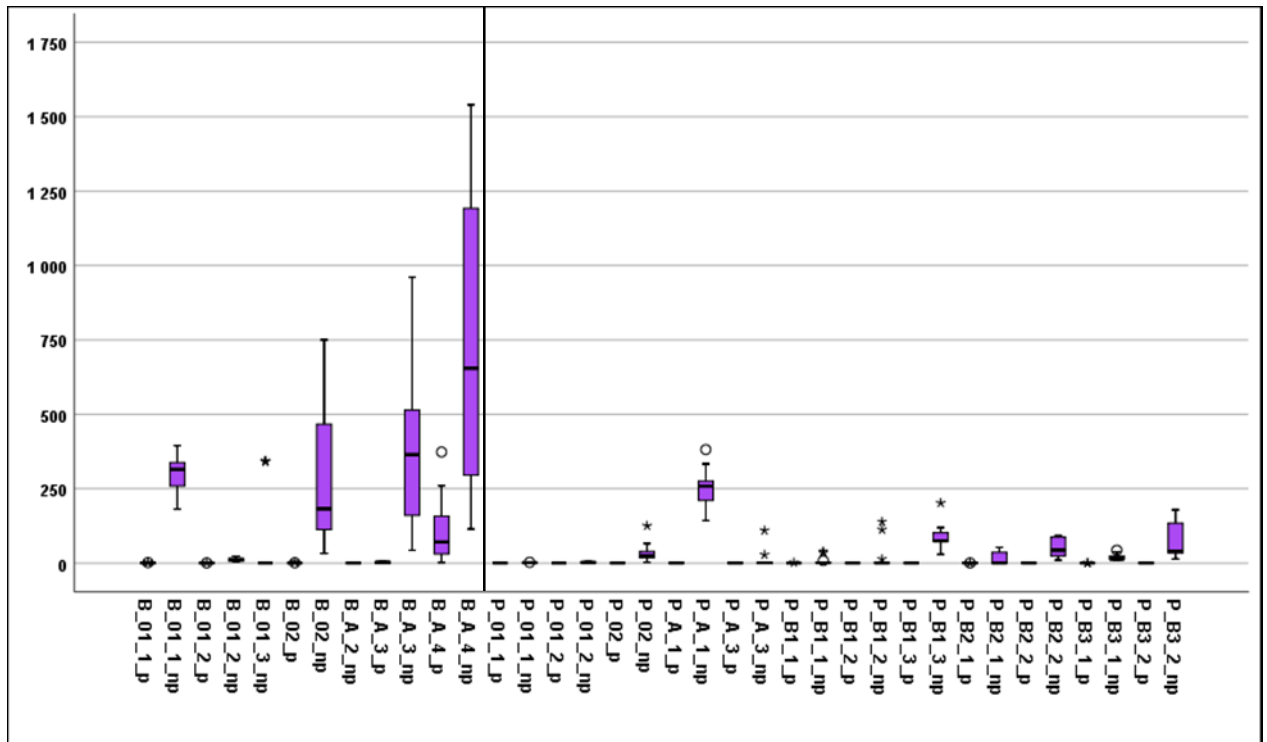
3.2 Nepilno degimo dujiniai teršalai

Organiniai junginiai

Metanas CH₄

Metanas yra pagrindinis gamtinių dujų komponentas, viena iš pagrindinių šiltnamio efektą sukeliančių dujų. Metano dujų buvimas atmosferoje daro įtaką kitų šiltnamio dujų (CO₂, troposferos ozonas, vandens garai) kiekiui. Metano poveikis klimato kaitai per 20 metų yra 84 kartus didesnis negu CO₂ dujų. 60 proc. metano emisijų atsiranda dėl žmonių veiklos, o net 40 proc. emisijų šių dujų išsiskiria iš žemės ūkio sektoriaus [46].

Iš grafiko (žr. 3.6 pav.) matoma, kad pramoniniame katile metano koncentracijos aptinkamos tik nepilno degimo režime ir svyruoja 50-300 mg/m³. Tik deginant neapdorotą MDP, koncentracija siekė > 400 mg/m³. Buitiniame katile didesnės koncentracijos taipogi buvo nepilno degimo režime, deginant neapdorotą fanerą, smulkintą žievę. Buitiniame katile išmatuotos vertės yra didesnės, svyruoja nuo 100-1000 mg/m³. Deginant MDP granules stebėtas didelis metano koncentracijos pakilimas, nes buvo vykdytas, jau anksčiau minėtas, ypač nepilno degimo režimo suregulavimas.

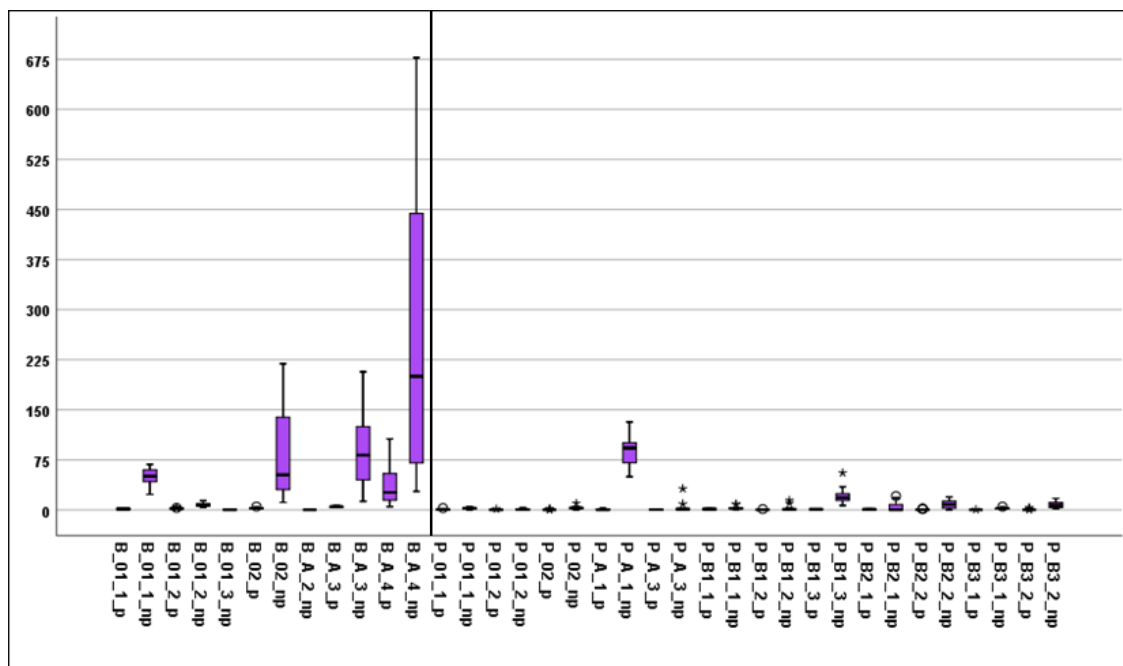


3.6 pav. Metano (CH₄) koncentracija mg/m³

Etilenas C₂H₄

Etilenas yra priskiriamas nesočiųjų angliavandenilių grupei ir yra pagaminamas iš naftos ir etano. Didžiausia poveikį aplinkai daro iki šio junginio išsiskyrimo vykdomi etapai: iškastinio kuro šaltiniai, gavyba, transportavimas. Taip yra didinamas šiltnamio efektą sukeliančių dujų išmetimas, kurios yra toksiškos oro ir vandens mikroorganizmams [47]. Etilenas yra vienas iš fotocheminio smogo (susidaro dėl transporto išmetamųjų teršalų fotocheminių reakcijų, vykstančių veikiant intensyviai saulės spinduliuotei) komponentų. Smogas yra kenksmingas žmonių ir gyvūnų sveikatai, gali sunaikinti augalus [48].

Iš grafiko (žr. 3.7 pav.) pastebima, kad šio junginio koncentracijos daugumoje atvejų buvo labai mažos (1 – 10 mg/m³). Atskirais atvejais, abiejų katilų nepilno degimo režime, pastebimas koncentracijos padidėjimas (deginant fanerą, smulkintą žievę, smulkintą neapdorotą MDP) ir etileno koncentracija siekia iki 200 mg/m³.

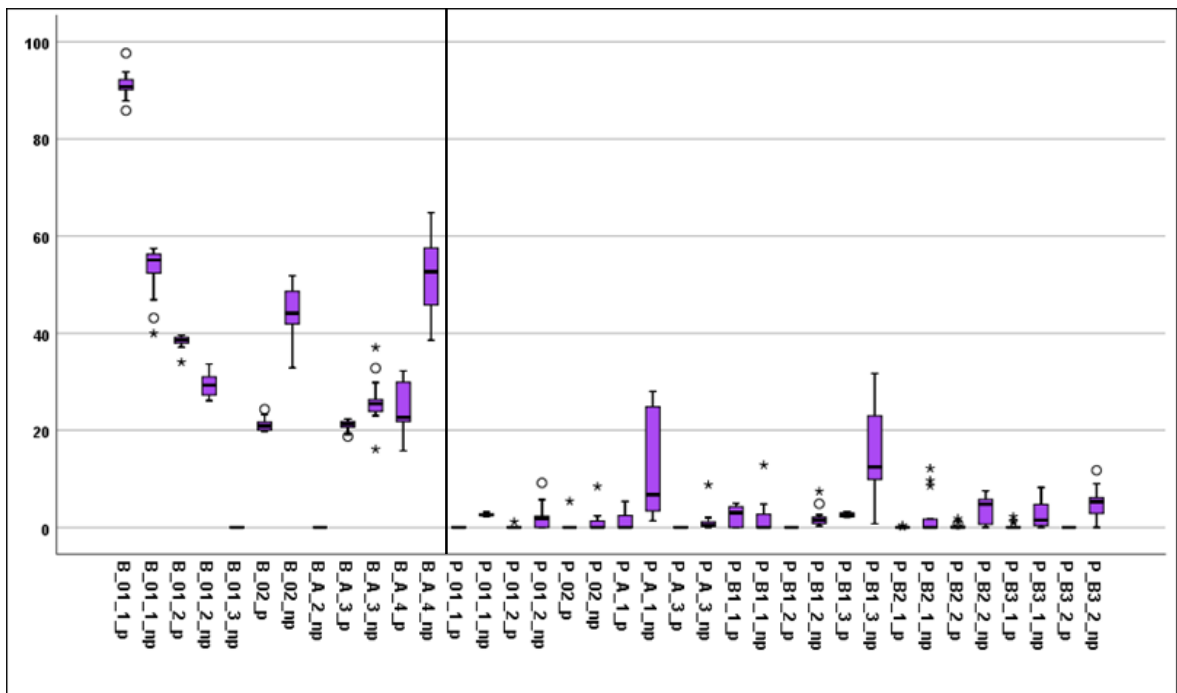


3.7 pav. Etileno (C₂H₄) koncentracija mg/m³

Acto rūgštis C₂H₄O₂

Acto rūgštis priskiriama organinių rūgščių klasei. Poveikis aplinkai priklauso nuo acto rūgšties koncentracijos ir poveikio trukmės. Didelės koncentracijos gali būti žalingos augalams, sausumos ir vandens gyvūnams. Poveikis žmogui gali atsirasti, įkvėpus rūgšties garus, vartojant geriamuosius tirpalus, kurių sudėtyje yra šios rūgšties, taip pat acto rūgščiai patekus per odą ar akis [49].

Iš grafiko, vaizduojančio acto rūgšties koncentracijos kitimą (žr. 3.8 pav.) galima matyti, kad didžiausios koncentracijos yra buitiniame katile deginant medienos granules, drožles, smulkintas žieves. Koncentracijos pasiskirsto intervale nuo 20 – 100 mg/m³. Daugelyje atvejų, pramoniniame katile acto rūgšties koncentracija yra iki 10 mg/m³. Tik deginant nepilno degimo režime (MDP neapdorota ir MDP su HPL danga) šio junginio koncentracijos buvo > 20 mg/m³.

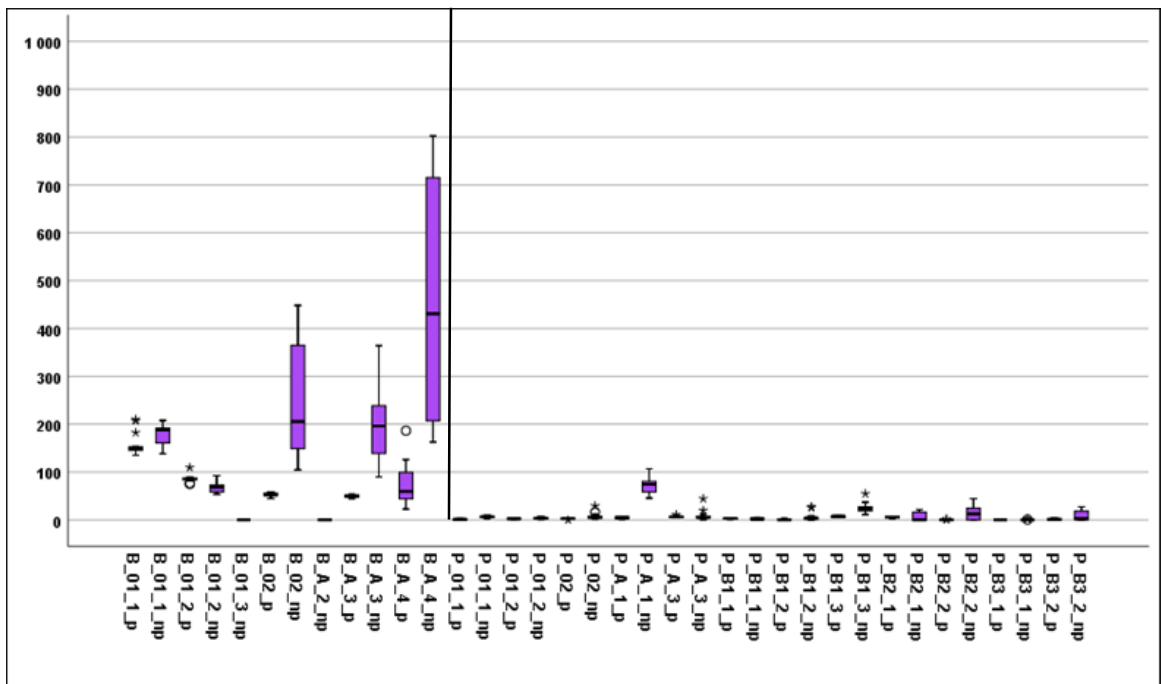


3.8 pav. Acto rūgštis (C₂H₄O₂) koncentracija mg/m³

Benzenas C₆H₆

Benzenas yra priskiriamas aromatinių angliavandenilių klasei ir yra pavojinga ir nuodinga medžiaga. Pramoniniai procesai yra pagrindiniai benzeno šaltiniai: šio junginio kiekis didinamas deginant anglį, naftą ir atliekas, kuriuose yra jo junginių. Transporto išmetamuosiuose teršaluose ir tabako dūmuose taip pat randama šio aromatinio angliavandenilio. Šis junginys lengvai patenka į orą iš vandens ir dirvožemių paviršiaus ir jo poveikis aplinkai išlieka ilgai. Poveikis žmogaus organizmui – benzeno garai patenka per kvėpavimo sistemą, kaupiasi riebaliniuose audiniuose ir kaulų čiulpuose. Taip pat žaloja kraujo kūnelius ir jų pernešimą bei sukelia vėžį [50].

Reikšmingos benzeno koncentracijos nustatytos tik deginant kurą buitiniame katile. Pramoniam katile koncentracijos labai žemos arba tam tikrais atvejais neaptinkamos. Buitiniame katile didesnės koncentracijos yra deginant medienos granules, žievę, neapdorotą fanerą ir vyrauja intervale nuo 50 – 450 mg/m³. Deginant medienos granules, buvo reguliuojamas ypač blogas sudegimas.

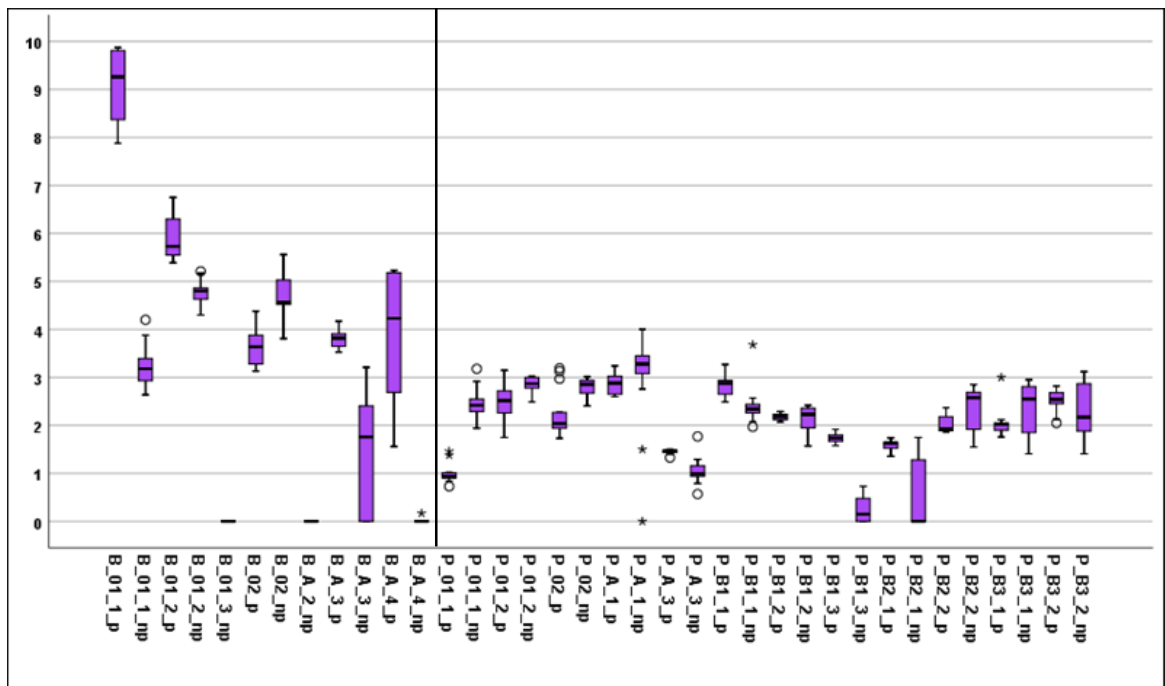


3.9 pav. Benzeno (C₆H₆) koncentracija mg/m³

Formaldehidas CH₂O

Formaldehidas priskiriamas aldehydų klasei ir yra aštraus kvapo junginys, dirginantis akis bei kvėpavimo takus. Didžiausią dalį formaldehido į aplinką išskiria tiesioginiai ir netiesioginiai deginimo procesai. Atmosferoje formaldehidą gan greitai suyra ir formuoja skruzdžių rūgštį ir CO₂. Formaldehidą plačiai naudojamas gaminant dervas medienos gaminiams. Nustatyta, kad šis junginys sukelia vėžį ir mutageninius pakitimus [51].

Iš grafiko pastebima (žr. 3.10 pav.), kad pramoniniame katile (abiejuose degimo režimuose) formaldehido koncentracijos yra labai mažos ir svyruoja nuo 0 – 4mg/m³. Buitiniame katile šio junginio koncentracijos didesnės ir vyrauja nuo 2 – 10 mg/m³. Būtent, kai vyksta didesnis organinių junginių nesudegimas, nepilno degimo režime pastebimos didesnės koncentracijos vertės.

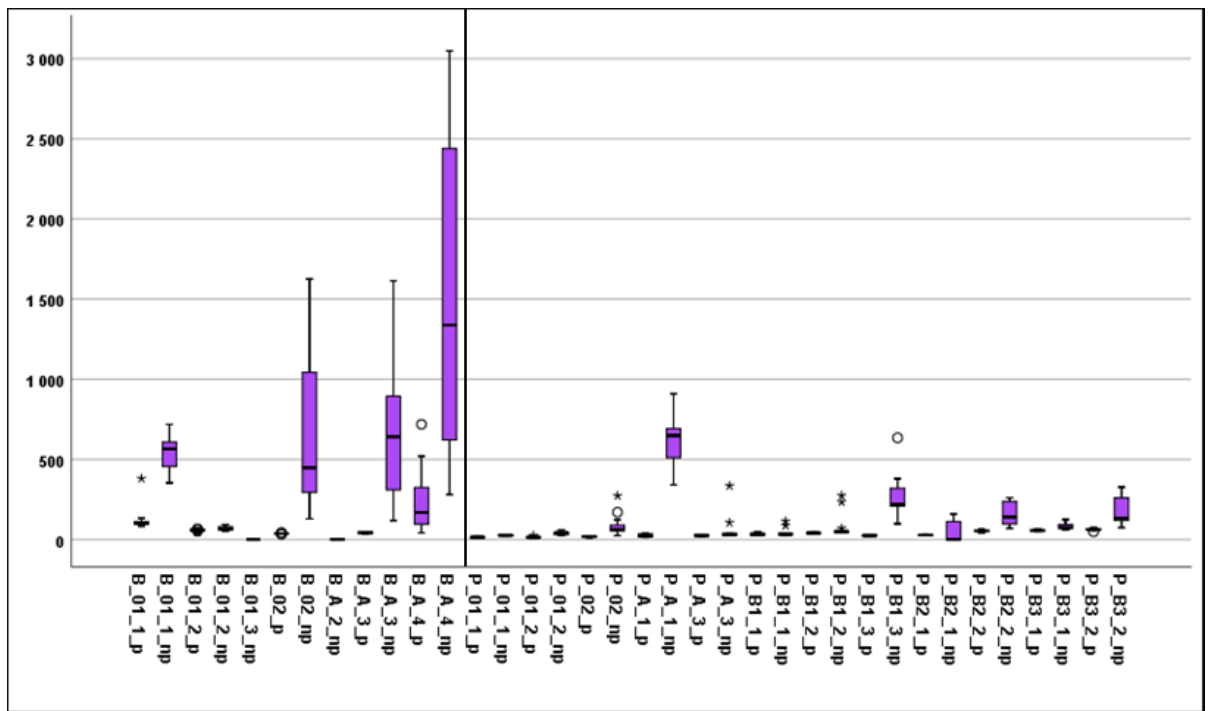


3.10 pav. Formaldehido (CH₂O) koncentracija mg/m³

Suminė organinių junginių koncentracija

Apibendrinti organinių junginių koncentracijos kitimus abiejuose katiluose prie skirtingų degimo režimų, pateikiama suminė organinių junginių koncentracija, kuri buvo paskaičiuota kiekvienam angliavandeniliui atskirai. Matuotos organinių junginių klasės: sotieji ir nesotieji angliavandeniliai, aromatiniai angliavandeniliai, aldehydai, ketonai ir alkoholiai. Svarbios yra ir kitos organinių junginių klasės, kaip policikliniai aromatiniai angliavandeniliai, polichlorinti bifenilai (dioksinai, furanai), kurie susidaro vykstant nepilnam kuro sudegimui, tačiau tyrimų metu nebuvo matuoti.

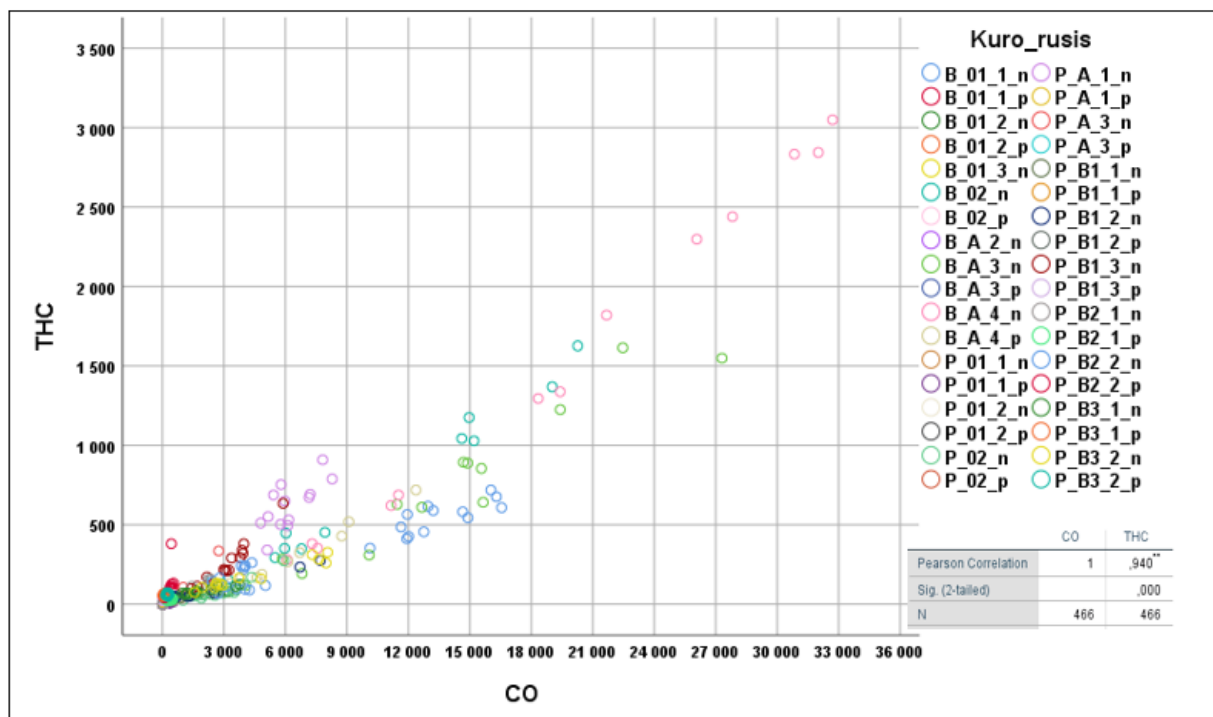
Pastebima, kad intensyvesnis organinių junginių susidarymas vyksta prie nepilno degimo režimo, abiejuose katiluose. Buitiniame katile dėl prasto degimo ir sunkiai palaikomų degimo sąlygų, koncentracijos didesnės, siekia iki 1700 mg/m³. Pramoniniame katile, nepilno degimo režime, koncentracijos svyruoja 10 – 750 mg/m³. Organinių junginių koncentracijų svyravimus ir skirtumus tarp degintų kompozitų lemia skirtingas organinių junginių susidarymo intensyvumas, taip pat organiniai junginiai pradeda degti prie tam tikrų skirtingų temperatūrų. Didelės vertės ties MDP granulių kūrenimu yra dėl tuo metu reguliuoto ypač blogo degimo režimo, tai buvo matoma ir atskirai nagrinėtuose organinių junginių koncentracijų matavimuose. Organiniai junginiai oksiduojami iki galutinių produktų (CO ir H₂O) ir pašalinami, kai yra pakankamas deguonies kiekis, aukštos temperatūros, pakankamas degimo produktų išbuvimas degimo zonoj. Tokios degimo sąlygos yra sunkiai pasiekiamos buitiniame katile.



3.11 pav. Suminė organinių junginių koncentracija apskaičiuojama kiekvienos rūšies angliavandeniliui atskirai mg/m^3

Buvo atlikta koreliacinė analizė suminei organinių junginių koncentracijai ir CO koncentracijai, norint nustatyti ar kintamieji vienas nuo kito priklauso bei ar jų koreliacija statistiškai reikšminga (žr. 3.12 pav.). Koreliacijos koeficiento (Pirsono koeficientas, $r = 0.940$) vertė rodo, kad ryšys tarp kintamųjų yra labai stiprus, taip pat matoma ryšio kryptis – didėjant CO koncentracijai, didėja ir suminė organinių junginių koncentracija.). Gauta p reikšmė ($p = 0.000$) rodo, kad CO ir suminių organinių junginių koreliacija yra statistiškai reikšminga.

Iš grafiko matosi, kad didžiausios koncentracijos yra esant nepilno degimo režimui, taigi CO ir organinių junginių suminės koncentracijos grafikai puikiai reprezentuoja nepilno degimo atvejus.



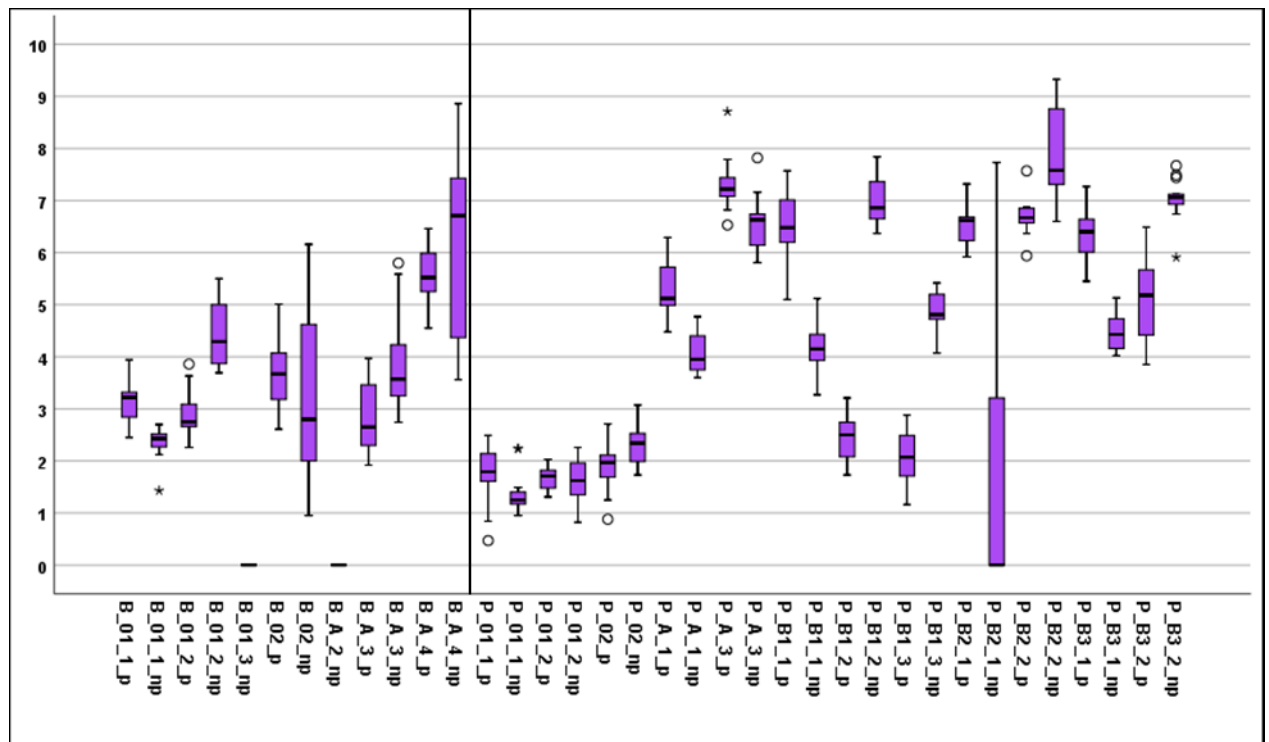
3.12 pav. Suminės organinių junginių koncentracijos (mg/m^3) dūmuose priklausomybė nuo CO koncentracijos (mg/m^3).

3.3 Specifiniai teršalai

Druskos rūgštis HCl

Esant > 900 °C temperatūrai, deginant medienos skiedras ar žievę, chloras egzistuoja kaip dujinis HCl. Esant deguoniui, chloras atlieka katalizatoriaus vaidmenį „išplėšiant“ geležį iš vamzdžių sienelių – vykdomas intensyvus korozijos procesas. Norint išvengti chloro sukeltų pasekmių katilui, rekomenduojama vidinius vamzdžių paviršius dengti chlorui atsparia antikorozyne danga [52].

Iš grafiko galima matyti (žr. 3.13 pav.), kad druskos rūgšties koncentracija yra nedidelė deginant kurą abiejuose katiluose, siekė iki $9 \text{ mg}/\text{m}^3$. Deginant kompozitus pramoniniame katile, koncentracijos pastebimos šiek tiek didesnės nei buitiniame katile. Deginant neapdorotą medieną, didesnės HCl koncentracijos išmatuotos buitiniame katile, iki $6 \text{ mg}/\text{m}^3$.

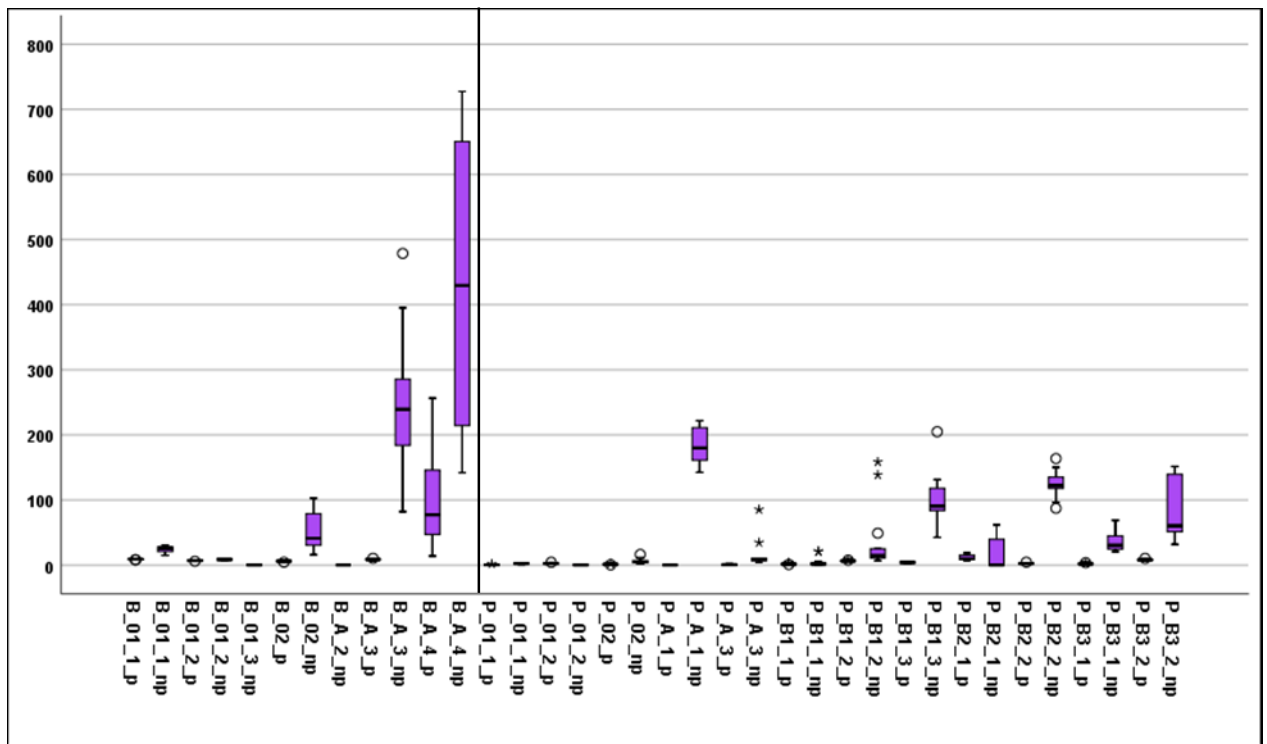


3.13 pav. Druskos rūgšties (HCl) koncentracija mg/m³

Vandenilio cianidas HCN

HCN tai bespalvės, greit reaguojančios, nuodingos dujos. Vandenilio cianidas yra dažnai naudojamas nailonų, plastikų gamyboje. Pagrindiniai šaltiniai yra pramonės industrija, tabako dūmai. Vandenilio cianidas yra toksiškas nervų, kvėpavimo, virškinimo sistemoms bei odai. Cianido toksiškumui labiausiai jautrūs yra žmogaus audiniai, kurie atlieka greičiausią deguonies metabolizmą – tai smegenų ir širdies raumenų audiniai [53].

Iš matavimų rezultatų pastebima (žr. 3.14 pav.), kad vandenilio cianido koncentracijos padidėjimai yra esant nepilno degimo režimui, didėjant nesudegimui – didėja ir koncentracijos. Pastebima, kad HCN koncentracija didesnė ten, kur buvo deginamas daugiau azoto turintis kuras – MDP dengta dažytu melamino popieriumi, MDP su HPL danga (stalviršiai), MDP korys su lukštu, dažytas vandeninio pagrindo beicu. Pramoniniame katile nepilno degimo atvejais deginant kompozitus, HCN koncentracija siekė iki 200 mg / m³. Butiniame katile deginant MDP granules stebimas didelis vandenilio cianido koncentracijos pakilimas, nes buvo vykdytas, jau anksčiau minėtas, nepilno degimo režimo sureguliuavimas.



3.14 pav. Vandenilio cianido (HCN) koncentracija mg/m³

3.4 Tyrimų rezultatų apibendrinimas

Atlikus tyrimus, kai buvo deginama medienos kompozitai buitiniame ir pramoniniame katile prie dviejų skirtingų režimų (gero ir blogo), buvo nustatyta, kad deginimo režimai turi didelę įtaką tirtų junginių koncentracijų kitimams. Esant blogam degimui, didėja anglies monoksido, organinių junginių (angliavandenilių), kietųjų dalelių koncentracijos. Buitiniame katile visų junginių koncentracijos buvo aukštesnės, palyginus su pramoninio katilo stende gautomis koncentracijomis. Buitiniame katile kuras tiekiamas netolygiai, ardyno judančio nėra, degimo procesas nestabilus ir tai lėmė virš 20 000 mg/m³ CO koncentracijas.

Pramoniniame katile išmatuotos NO_x koncentracijos buvo didesnės nei buitiniame katile, kai buvo pilno degimo režimas, siekė > 1600 mg/m³. Pramoniniame katile vyravo aukštesnės temperatūros nei buitiniame, vyko geresnis kuro sudegimas (oras paduodamas į dvi skirtingas degimo zonas), o tai lėmė spartesnę ir pilnesnę azoto oksidaciją. Taip pat didelius NO_x kiekius nulėmė ir azoto savo sudėtyje turintys medienos kompozitai (kaširuota MDP ir MDP su HPL danga). Tai lėmė ir HCN junginio koncentracijos kitimus.

Intensyvesnis organinių junginių susidarymas vyksta prie nepilno degimo režimo abiejuose katiluose. Buitiniame katile dėl prasto degimo ir sunkiai palaikomų degimo sąlygų, koncentracijos didesnės, siekė iki 1700 mg/m³. Pramoniniame katile nepilno degimo režime, koncentracijos svyruoja 10 – 750 mg/m³.

Medienos kompozitų sudėtyje esanti siera, chloras, daro įtaką atitinkamų teršalų susidarymui (SO₂, HCl). SO₂ koncentracijos abiejuose katiluose prie skirtingų režimų, svyruoja iki 200 mg/m³, tik

dviem nepilno degimo atvejais koncentracija yra neryškiai didesnė už 200 mg/m³. Druskos rūgšties koncentracija yra nedidelė deginant kurą abiejuose katiluose, siekė iki 9 mg/m³.

3.5 Eksperimentinių verčių palyginimas su normatyvinėmis

Gautos pramoninio katilo stende reglamentuojamų teršalų vertės (NO_x, SO₂, CO, KD) palyginamos su norminiuose dokumentuose (LAND 43 – 2013 normatyvas, Vidutinių KDĮ normos) pateiktomis vertėmis (žr. 3.1 lentelę), kad būtų galima spręsti apie medienos kompozitų deginimo galimybes energijai išgauti. LAND 43 – 2013 normos taikomos pradedant nuo 120 kW galios katilams, tyrimams naudotas pramoninio katilo stendas (30 kW galios), traktuojamas kaip didesnės galios įrenginys, todėl gautų išmetimų vertės yra palyginamos su iš mažos ir vidutinės galios kurą deginančių įrenginių išmetamųjų teršalų ribinėmis vertėmis.

Buitiniame katile vyrauja žema degimo temperatūra, kuras sudedamas ant nejudančio ardyno ir tiekiamas pertraukiamai, pirminis oras paduodamas iš pakuros šonų ir visas degimo procesas nestabilus. Todėl susidaro didelės nepilno degimo produktų koncentracijos (CO, angliavandeniliai). CO koncentracija viršija 20 000 mg/m³. Deginant medienos plokščių liekanas, koncentracija viršijo ir 30 000 mg/m³. Įvertinus tai, kad buitiniame vyksta blogas kuro sudegimas ir jo sureaguliavimas sudėtingas, kompozitų deginimas namų ūkio šildymo įrenginiuose traktuojamas kaip nerekomenduotinas ir su normatyvinėmis vertėmis gauti rezultatai nelyginami.

3.1 lentelė. Iš kurą deginančių įrenginių, išmetamųjų teršalų ribinės vertės.

Kurą deginančio įrenginio nominali šiluminė galia, MW	Teršalų ribinės vertės, mg/m ³					
	LAND 43 – 2013			Vidutinių KDĮ normos		
	Esamas įrenginys			Esamas įrenginys		
	NO _x	SO ₂	KD	NO _x	SO ₂	KD
0,12 ≥ MW < 1	750	2000	800	–	–	–
1 ≥ MW ≤ 5			700	650	200	50
5 > MW < 20			700			
20 ≥ MW < 50			500			

CO normatyviniuose dokumentuose nenormuojama, todėl norint pasiekti tinkamas NO_x vertes, būtų išmetami dideli kiekiai CO ir kitų nepilno degimo produktų. Aukščiausios NO_x koncentracijos (> 1600 mg/m³) pastebimos deginant medienos kompozitus dengtus lakštinėm dangom: kaširuota MDP ir MDP su HPL danga, tokios vertės netilptų į normas. Tyrimai parodė, kad leidžiant CO koncentracijai išlakose kilti iki (900 – 2000 mg/m³) deginant medienos drožlių plokštes galima pasiekti NO_x koncentracijas iki 700 mg/m³, kurios tenkintų LAND 43 – 2013 normas. Tačiau norint sumažinti poveikį aplinkai ir žmogaus sveikatai, reikia atsižvelgti į CO vertes, nes tam tikrais atvejais (deginant MDP dengta dažytu melamino popieriumi; MDP su HPL danga; lakuota fanera, HDF) CO koncentracija buvo 3000 – 6000 mg/m³. Galimas šios problemos sprendimo būdas galėtų būti,

medienos kompozitų atliekų maišymas (praskiedimas) su biokuru. Tai galėtų būti paprasta neapdorota mediena, tyrimų metu deginant neapdorotą medieną CO koncentracija vyravo iki 500 mg/m³.

Visos SO₂ koncentracijos, nustatytos tyrimų metu, svyruoja iki 200 mg/m³ ir tenkina normas. Kietųjų dalelių koncentracijos pramoniniame katile svyruoja 200 – 400 mg/m³ ribose, kurios netenkintų vidutinių KDI normų. Tačiau stenduose nėra įrengti dūmų valymo įrenginiai todėl išmatuotos vertės, rodo tik kokios medžiagos išeina iš katilo. Praktinė patirtis rodo, kad kietųjų dalelių koncentracijos didėjimo problema sprendžiama, po katilu įrengiant valymo įrenginius: elektrostatiniai, rankoviniai filtrai, skruberiai, ekonomizeriai.

Išvados

1. Atlikus medienos kompozitų Europoje klasifikavimo, taršos susidarymo juos deginant, teisinio reglamentavimo apžvalgą, nustatyta, kad dažniausiai kompozitai klasifikuojami į 4 klases (A, B, C, D). Deginti leidžiama medienos kompozitų atliekas, kuriose nėra konservantų bei nėra organinių chloro junginių ir sunkiųjų metalų kiekis neviršija nustatytų ribų (A, B), tačiau turi būti nustatoma minimali katilo galia. C klasės (chloro junginių turintys) ir D klasės (apdoroti konservantais) kompozitai gali būti deginami tik pavojingų atliekų deginimo įrenginiuose.
2. Atlikus medienos kompozitų deginimo 13 kW buitiniame katile tyrimus, nustatytos aukštos nepilno degimo produktų koncentracijos. Deginant medienos plokščių liekanas, anglies monoksido koncentracijos viršijo 30 000 mg/m³. Atlikus tyrimus 30 kW pramoniniame katile, nustatyta, kelis kartus žemesnės nepilno degimo produktų koncentracijos, CO koncentracijos siekė kelis šimtus mg/m³ tiek deginant neapdorotą medieną, tiek ir medienos kompozitus. Tačiau, dėl geresnio sudegimo efektyvumo, pramoniniame katile didėjo azoto oksidų emisijos, koncentracija siekė iki 1600 mg/m³ (CO < 1000 mg/m³). Spartesnę ir pilnesnę azoto oksidaciją lėmė aukšta temperatūra, joje formuojasi „terminiai“ NO iš ore esančio O₂ ir N₂. Taip pat didesnius NO_x kiekius nulemia ir azoto savo sudėtyje turintys medienos kompozitai.
3. Lyginant tyrimų rezultatus su išmetamųjų teršalų normatyvinėmis reikšmėmis mažos galios kurą deginantiesiems įrenginiams (< 1MW) ir vidutiniams (1-50 MW) galima konstatuoti, kad daugeliu atvejų pramoniniame katile azoto oksidai (deginant B1, B2 klasės kompozitus) neatitiko normų (norma 750 mg/m³). Nors CO koncentracijai normatyvinė reikšmė Lietuvoje nenustatyta, remiantis kitų šalių patirtimi reikia pabrėžti, kad norint subalansuoti NO_x išmetimus, reikia užtikrinti, kad pernelyg neišaugtų CO koncentracija.
4. Remiantis gautais rezultatais bei užsienio šalių patirtimi, rekomenduojama nedeginti C ir D klasės medienos kompozitų rūšių, taip pat drausti deginti medienos kompozitus buitiniuose katiluose ir mažos galios (< 1 MW) rankinio pakrovimo katiluose. Taip pat rekomenduojama esamiems pramoniniams mažos galios katilams (iki 1 MW) ir vidutiniams KDI (nuo 1 – 50 MW) atsižvelgti į CO emisijas (deginant medienos kompozitus blogo degimo režimu, koncentracija 50 – 7000 mg/m³) nuolatinei juos matuoti, o norint pasiekti koncentracijų mažėjimą, medienos kompozitų atliekas maišyti (praskiesti) su biokuru (neapdorota natūralia mediena). Šiluminės energetikos įmonėms rekomenduojama iš medienos kompozitų atliekų tiekėjų reikalauti pateikti dokumentaciją, kuri detalizuotų jų sudėtį.

Literatūros sąrašas

1. Cunningham P. William, Cunningham Mary. *Environmental Science– A Global Concern*. McGraw-Hill Higher Education, 2009. ISBN 9780073383217.
2. Composites VS. Wood - Composites Compared. Prieiga per: <http://compositeslab.com/composites-compared/composites-vs-wood/>
3. D. Martuzevičius, V. Kaunelienė, K. Buinevičius (2018 m.). *Mokslinis medienos kompozitų (plokščių) gamybos ir naudojimo atliekų panaudojimo įvairaus pajėgumo kurą deginančiuose įrenginiuose, įskaitant naudojamus namų ūkiuose būstams šildyti, galimybių įvertinimas, siekiant nustatyti kietojo kuro kokybės rodiklius*. Kaunas. 2018. [žiūrėta 2019-05-10]. Prieiga per: https://am.lrv.lt/lt/naujienos/ivertintos-galimybes-naudoti-medienos-apdirbimo-pramones-liekanas-silumai_gaminti?fbclid=IwAR1Xc6Wp6F2suSL8WC-KI9p1y6PIbpMOVP3p44mIR-7SB3cl0L2menkqmo.
4. Wood Composite - The Alternative, Sustainable Solution to Timber. [žiūrėta 2019-05-10]. Prieiga per: <https://buildabroad.org/2017/02/22/wood-composite/>
5. Youngquist, J. A. *Wood-based Composites and Panel Products*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 2000. [žiūrėta 2019-05-10]. Prieiga per: <https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fplgtr113/ch10.pdf>
6. Baharoglu M., Nemli G., Bunyamin S. *Effects of chemical composition of wood and resin type on properties of particleboard*. Karadeniz Technical University, Faculty of Forestry, Trabzon, Turkey. 2014. 174-184 p. [žiūrėta 2019-05-11]. ISSN: 2252-0287. Prieiga per: <https://www.magiran.com/paper/1144565?lang=en>
7. Particleboard – European Panel Federation. [žiūrėta 2019-05-11]. Prieiga per: <https://europanel.org/the-wood-based-panel-industry/types-of-wood-based-panels-economic-impact/particleboard/>
8. Wood products – particle board. [žiūrėta 2019-05-11]. Prieiga per: <https://www.woodproducts.fi/content/particle-board>
9. Wood Products – Wood fibre board. [žiūrėta 2019-05-11]. Prieiga per: <https://www.woodproducts.fi/content/wood-fibre-board>
10. Kubba S. Choosing Materials and Products. Green Construction Project Management and Cost Oversight. 2010. 221–266 p. [žiūrėta 2019-05-12]. Prieiga per: doi: 10.1016/B978-1-85617-676-7.00006-3
11. Medium density fiberboard. [žiūrėta 2019-05-12]. Prieiga per: <https://www.vilterra.lt/products/mdf/>
12. Kronospan - Leading manufacturer of wood-based panels, High Density Fiberboard. [žiūrėta 2019-05-12]. Prieiga per: <https://lt.kronospan-express.com/en/products/view/kronobuild/fiberboard/high-density-fiberboard-hdf/high-density-fiberboard-hdf-706#c=1210>
13. S.Misra, S. Raychaudhari. *Development of Draft Protocol for Testing of Structural Components and Systems*. Department of Civil Engineering Indian Institute of Technology Kanpur, KANPUR. 2016. [žiūrėta 2019-05-20]. Prieiga per: <http://www.iitk.ac.in/ce/test/Materials/76.html>
14. Board products, low density fiberboard. [žiūrėta 2019-05-20]. Prieiga per: <https://www.bord.com.au/products/raw-substrate/ldf-low-density-fiberboard/>
15. Wood - Plywood and laminated wood, Britannica. [žiūrėta 2019-05-20]. Prieiga per: <https://www.britannica.com/science/wood-plant-tissue/Plywood-and-laminated-wood>

16. Builder depot, plywood. [žiūrėta 2019-05-20]. Prieiga per: <https://www.builderdepot.co.uk/12mm-hardwood-external-grade-wbp-plywood-b-bb-2440mm-x-1220mm-8ft-x-4ft>
17. Solid wood panels – width joint. [žiūrėta 2019-05-20]. Prieiga per: <https://adles.si/en/solid-wood-panels-are-a-width-joint/>
18. Oriented strand board - Designing Buildings Wiki. [žiūrėta 2019-05-20]. Prieiga per: https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Oriented_strand_board
19. Oriented Strand Board (OSB) - APA – The Engineered Wood Association. [žiūrėta 2019-05-20]. Prieiga per: <https://www.apawood.org/osb>
20. Garcia, C.A., Hora, G. *State-of-the-art of waste wood supply chain in Germany and selected European countries. Waste Management*. Fraunhofer-Institut für Holzforschung Wilhelm-Klauditz Institut WKI, Bienroder Weg 54 E, 38108 Brunswick, Germany. 2017. [žiūrėta 2019-05-28]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.09.025>
21. Junginger M., Järvinen M., Olsson O. *Transboundary flows of woody biomass waste streams in Europe*. IEA Bioenergy, 2019. [žiūrėta 2019-05-28]. Prieiga per: <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2019/01/IEA-Bioenergy-2019.-Wood-waste-trade-study-FINAL.pdf>
22. Sommerhuber, P.F., Welling, J., Krause, A. *Substitution potentials of recycled HDPE and wood particles from post-consumer packaging waste in wood-plastic composites*. *Waste Manag.* 2015. [žiūrėta 2019-05-28]. 76–85 p. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.09.011>.
23. Van Benthem, M., Leek, N., Mantau, U., Weimar, H. *Markets for Recovered Wood In Europe: Case Studies for the Netherlands and Germany Based on the Bioxchange project*. Austria, 2007. [žiūrėta 2019-05-28]. Prieiga per: <https://www.probos.nl/publicaties/artikelen/616-markets-for-recovered-wood-in-europe-case-studies-for-the-netherlands-and-germany-based-on-the-bioxchange-project>
24. Alakangas, E., Koponen, K. Sokka, L. & Keränen, J. *Classification of used wood to biomass fuel or solid recycled fuel and cascading use in Finland*. Jyväskylä, Finland, 2015. [žiūrėta 2019-05-28]. Prieiga per: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/julkaisut/muut/2015/OA-Classification-of-used-wood.pdf>
25. Department for Environment Food and Rural Affairs. *Process Guidance Note 1/12(13) Statutory guidance for combustion of waste wood*. United Kingdom, London, 2013. [žiūrėta 2019-05-29]. Prieiga per: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/611476/process-guidance-note-combustion-of-waste-wood.pdf
26. V. Martinaitis, V. Lukoševičius. *Šilumos gamyba deginant kurą*. 2014. ISBN 9786094576324
27. Cichy, W. *Combustion of plywood waste in a low-power boiler*. Wood Technology Institute, Poznan, Poland. 2012, 22-36. [žiūrėta 2019-06-01]. Prieiga per: <https://pdfs.semanticscholar.org/ebe4/9e82997fe5e35f0c0d8f2be1ff060b67ec51.pdf>
28. Risholm-Sundman, M., & Vestin. *Emissions during combustion of particleboard and glued veneer. Holz Als Roh- Und Werkstoff*. 2005, 179–185. [žiūrėta 2019-06-01]. Prieiga per: doi:10.1007/s00107-004-0549-z
29. Teisės aktų registras. Lietuvos Respublikos aplinkos ministro 2013 m. balandžio 10 d. įsakymas Nr. D1–244 „Dėl Išmetamų teršalų iš kurą deginančių įrenginių normų LAND 43–2013 patvirtinimo“. Galiojanti suvestinė redakcija 2018-07-01. [žiūrėta 2019-06-05]. Prieiga per: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.446368/asr>

30. Teisės aktų registras. Lietuvos Respublikos aplinkos ministro 2017 m. rugsėjo 18 d. įsakymas Nr. D1-778 „Dėl Išmetamų teršalų iš vidutinių kurų deginančių įrenginių normų patvirtinimo“. [žiūrėta 2019-06-05]. Prieiga per: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/124775329dd411e796fec328fe7809de?jfwid=1deuyjfvj>
31. Teisės aktų registras. Lietuvos Respublikos aplinkos ministro 2013 m. balandžio 10 d. įsakymas Nr. D1-240 „Dėl Specialiųjų reikalavimų dideliems kurų deginantiems įrenginiams patvirtinimo“. [žiūrėta 2019-06-05]. Prieiga per: <https://www.e-tar.lt/portal/legalAct.html?documentId=TAR.D6E2FE994CAD>
32. Teisės aktų registras. Lietuvos Respublikos energetikos ministro 2017 m. gruodžio 6 d. įsakymas Nr. 1-310 „Dėl Kietojo biokuro kokybės reikalavimų patvirtinimo“. [žiūrėta 2019-06-05]. Prieiga per: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAP/50d5b860a81611e7a65c90dfe4655c64?jfwid=5w7avkwdz>
33. Teisės aktų registras. Lietuvos Respublikos aplinkos ministro ir Lietuvos Respublikos ūkio ministro 2012 m. sausio 17 d. įsakymas Nr. D1-46/4-63 „Dėl Gamybos liekanų priskyrimo prie šalutinių produktų tvarkos aprašo patvirtinimo“. [žiūrėta 2019-06-05]. Prieiga per: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.417378?jfwid=-9dzqnu9r2>
34. Buinevičius K., Klenauskis S., Blauzdys S. *Kietųjų dalelių emisijos mažos galios katiluose deginant skirtingą kurą*. Kauno Technologijos Universitetas, Kaunas, 2019. [žiūrėta 2020-04-10].
35. Parengta techninė dokumentacija. UAB „Enerstena“
36. Dujinių degimo produktų analizatoriaus Gasmeter DX 4000 naudojimo instrukcija ir katalogas. [žiūrėta 2020-04-10]. Prieiga per: <https://www.gasmet.com/products/category/portable-gas-analyzers/dx4000/>
37. Analizatoriaus Multilyzer NG naudojimo instrukcija. [žiūrėta 2020-04-10]. Prieiga per: <https://pdf.directindustry.com/pdf/friso-euro-index/multilyzer-ng-flue-gas-analyser/16712-563467.html>
38. Kietųjų dalelių matuoklio Afriso STM 225 naudojimo instrukcija. [žiūrėta 2020-04-10]. Prieiga per: <https://www.afriso.de/sprache2/n2301160/i2538983.html>
39. Teisės aktų registras. Lietuvos respublikos aplinkos ministro įsakymas „Dėl stacionarių taršos šaltinių išmetamų į aplinkos orą teršalų laboratorinės kontrolės metodinių rekomendacijų patvirtinimo.“ Galiojanti suvestinė redakcija: 2018-07-10 - 2020-10-31. [žiūrėta 2020-04-10]. Prieiga per: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.228489/asr>
40. European Environment Agency. *Nitrogen oxides (NOx) emissions*. 2010. [žiūrėta 2020-05-13]. Prieiga per internetą: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/eea-32-nitrogen-oxides-nox-emissions-1>
41. United States Environmental Protection Agency. *Sulfur Dioxide (SO2) Pollution*. 2017. [žiūrėta 2020-05-13]. Prieiga per internetą: <https://www.epa.gov/so2-pollution/sulfur-dioxide-basics#effects>
42. Kaunelienė V., „Procesai aplinkoje“ paskaitų konspektai. Kaunas, 2016 m. [žiūrėta 2020-05-13].
43. Bignal, K. L., Langridge, S., & Zhou, J. L. Release of polycyclic aromatic hydrocarbons, carbon monoxide and particulate matter from biomass combustion in a wood-fired boiler under varying boiler conditions. *Atmospheric Environment*, 42(39), 8863–8871, 2008. [žiūrėta 2020-05-13]. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.013>
44. Ekologija.lt *Kietosios dalelės – mažos, bet labai pavojingos*. 2012. [žiūrėta 2020-05-13]. Prieiga per internetą: <http://www.ekologija.lt/ekorasčiai/kietosios-daleles-mazos-bet-labai-pavojingos>

45. Dr. Buinevičius K. *Teršalų susidarymas biokuro degimo metu*. Kauno technologijos universitetas, „Enerstena“ Mokslo ir tyrimų centras. Prezenciacija. 2015. [žiūrėta 2020-05-13]. Prieiga per: http://www.lsta.lt/files/events/2015-02-10Biokurotaisykl/KBuinevicius_1%20dalis.pdf
46. Climate and clean air coalition, *Methane*. [žiūrėta 2020-05-13]. Prieiga per: <https://www.ccacoalition.org/en/slcp/methane>
47. Ghanta, M., Fahey, D. & Subramaniam, B. *Environmental impacts of ethylene production from diverse feedstocks and energy sources*. Appl Petrochem Res 4, 167–179, 2014. [žiūrėta 2020-05-13]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s13203-013-0029-7>
48. Peng, Y. *Application of Nanotechnology in Pollution Control of NOx From Stationary Sources. Nanomaterials for the Removal of Pollutants and Resource Reutilization*. 179–211, 2019. [žiūrėta 2020-05-13]. Prieiga per: doi:10.1016/b978-0-12-814837-2.00006-8
49. Australian Government, department of Agriculture, water and the Environment. *Facts sheets of acetic acid*. [žiūrėta 2020-05-14]. Prieiga per: <http://www.npi.gov.au/resource/acetic-acid-ethanoic-acid>
50. Department of health and human services, Public Health Service Agency for Toxic Substances and Disease Registry. *Benzene*. Atlanta, U.S, 2007. [žiūrėta 2020-05-14]. Prieiga per: <https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp3-c1-b.pdf>
51. Department of health and human services, Public Health Service Agency for Toxic Substances and Disease Registry. *Formaldehyde*. Atlanta, U.S, 2008. [žiūrėta 2020-05-14]. Prieiga per: <https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp111-c1-b.pdf>
52. Villu Vares, Ülo Kask, Peeter Muiste, Tõnu Pihu, Sulev Soosaar. *Biokuro Naudotojo žinynas*. Talino technologijos universitetas, 2005. [žiūrėta 2020-05-14]. ISBN 978-9986-34-180-2
53. National Research Council. *Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals: Volume 2*. Washington, 2002. [žiūrėta 2020-05-14]. ISBN 978-0-309-08511-3.

Priedai

1 Priedas. Panaudotos medienos ir medienos perdirbimo pramonės atliekų ir šalutinių produktų klasifikavimas, Suomija

Klasė	Medžiaga	Šaltinis	Dėl deginimo
A	Natūrali mediena, apdorota tik mechaniškai	Chemiškai nepadoroti miško ir medienos perdirbimo pramonės šalutiniai produktai arba liekanos bei mediena iš parkų, sodų, kelių tvarkymo darbų ir kt. • Chemiškai neapdorota panaudota mediena	Galima deginti visų galingumų katilinėse
B	Dengta, lakuota arba kitaip chemiškai apdorota mediena, tačiau danga neturi halogeninių organinių junginių (pvz., PVC) ir konservantų, taip pat, nepriskiriama griovimo metu susidaranti mediena	Chemiškai apdoroti šalutiniai produktai ir likučiai iš miško ir medienos perdirbimo pramonės Chemiškai apdorota panaudota mediena, išskyrus griovimo metu susidarantią medieną	Šios klasės mediena gali būti deginama katilinėse didesnėse nei 20 MW. Taip pat naujos statybos katilinėse, kurių galingumas > 5 MW, remiantis emisijų reguliavimo aktu (750/2013)
C	danga turinti halogeninių organinių junginių, pvz., PVC	1 variantas: išrūšiuotos kaip atliekos, kurioms taikomas Atliekų deginimo įstatymas, o kuro savybės atitinka „Kieto atgauto kuro“ reikalavimus. 2 variantas: Analizė patvirtina, kad teršalų lygis neviršija nustatytų chloro ir sunkiųjų metalų ribinių verčių, ir panaudota mediena gali būti priskiriama B klasei (kietasis biokuras, netaikomas Atliekų deginimo įstatymas) Atitinkamai priskiriamos ir griovimo atliekos	Šios kategorijos kuras, turi būti deginamas remiantis atliekų deginimo įstatymu (151/2013)
D	konservantais apdorota mediena	Pabėgiai Perdavimo ir telefono ryšio linijų stulpai Pavojingos atliekos	Tai pavojingos atliekos, deginamos pavojingų atliekų deginimo įrenginiuose

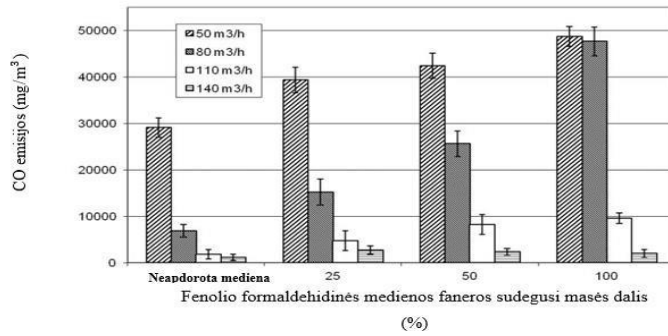
2 Priedas. Medienos atliekų klasifikacija Jungtinėje karalystėje

Klasė	Medžiagos apibūdinimas	Šaltinis	Tipinės medžiagos	Dėl deginimo
A	Neapdorota, nenatūrali mediena	Platinimas, mažmeninė prekyba ir pakuotė. Antrinė gamyba, pvz. stalių dirbtuvės. Palečių antrinis panaudojimas	Akivaizdžiai "švarios" medienos atliekos, daugiausia iš pakuočių atliekų, netinkamų naudoti padėklų, pakavimo dėžių ir kabelių būgnų, bei apdirbimo procesų liekanos iš neapdorotų produktų.	
B	Apdorota, nenatūrali mediena	A grupėje esantys šaltiniai, taip pat statybos ir griovimo darbai bei perkrovimo stotys	A klasės medienos atliekos, kartu su statybos ir griovimo, perkrovimo stočių, didelių gabaritų aikštelėse ir masyvo baldų gamybos metu susidarančiomis atliekomis.	
C	Apdorota, nenatūrali mediena	Viskas, kas buvo minėta anksčiau, taip pat iš savivaldybių surinkimo, perdirbimo centrų, perkrovimo stočių ir didelių gabaritų aikštelių.	Gali sudaryti prieš tai minėtos medienos atliekos, tačiau didžiausią dalį sudaro plokštės (MDP, MDF, faneros, OSB ir MPP).	Atliekų deginimo direktyva taikoma B, C, D kategorijoms.
D	Apdorota, nenatūrali ir pavojinga mediena	Viskas, kas buvo minėta anksčiau, taip pat tvoros, bėgių tiesimas ir elektros stulpai.	Pavojingos medienos atliekos, turinčios vario, chromo, arseno dėl konservavimo procedūros ir kreozoto. Tokias atliekas galima šalinti tik pavojingų atliekų sąvartynuose arba jas deginant.	

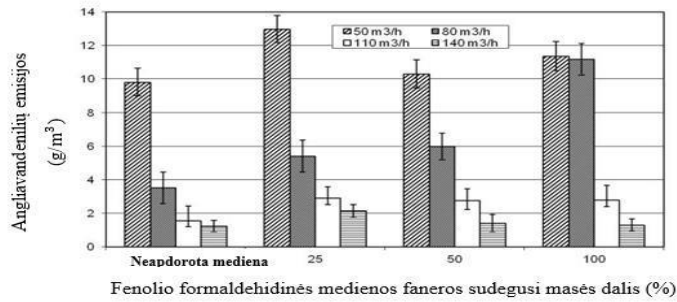
3 Priedas. Nustatytos išmetamųjų teršalų ribinės vertės, katilinėms nuo 0,4-3 MW, Jungtinė Karalystė

Medžiaga	Šaltinis	Išmetamųjų teršalų ribinės vertės	Deginimo sąlygos
CO	Vykstantys degimo procesai, kai galia < 1MW	250 mg/m ³	Išsiskiriančių teršalų ribinės vertės, išmatuotos prie 273,1 K, 101,3 kPa, 11% deguonies
	Vykstantys degimo procesai, kai galia > 1MW	150 mg/m ³	
Kietosios dalelės Visi procesai		Naujai katilinei: 60 mg/m ³	
		Esančiai katilinei: 200 mg/m ³	
NO _x	Visi procesai	Naujai katilinei: 400 mg/m ³	
Organiniai junginiai	Visi procesai	20 mg/m ³	
Cl	Dažytiems, padengtiems deginamiems kurams	100 mg/m ³	
HCN	Kuras, kuriame yra melamino	100 mg/m ³	
Formaldehidas	Fanera, medienos drožlių plokštės, medienos plaušų plokštės.	5 mg/m ³	

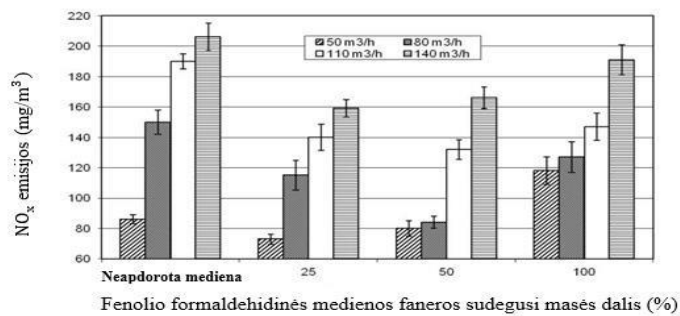
4 Priedas. Atskirų parametrų pokyčiai degimo metu ir analizuojamų degimo produktų emisijos



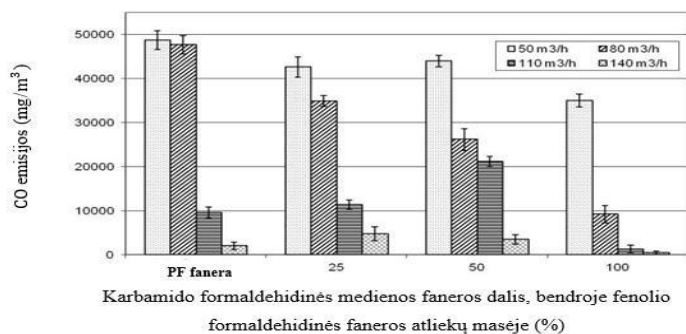
CO koncentracijos kitimas, priklausantis nuo PF faneros dalies degančiame kure [29]



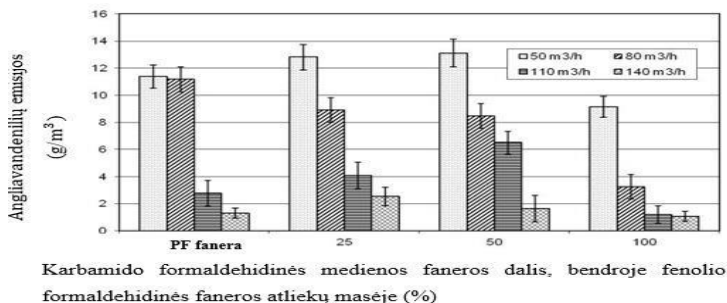
Angliavandenilių koncentracijos kitimas, priklausantis nuo PF faneros dalies degančiame kure [29]



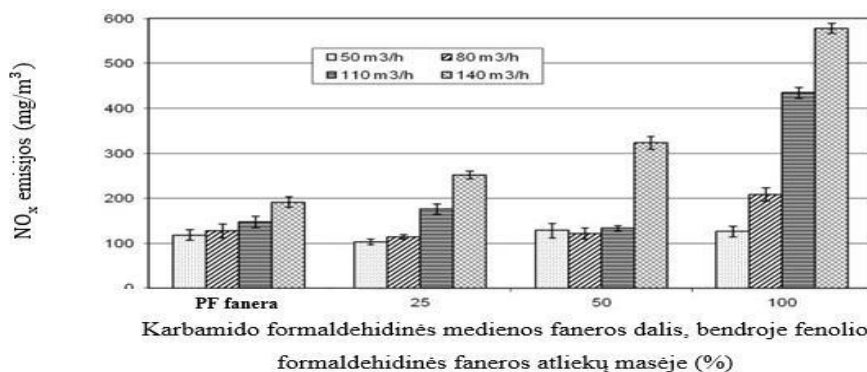
NOx koncentracijos kitimas, priklausantis nuo PF faneros dalies degančiame kure [29]



CO koncentracijos kitimas, priklausantis nuo UF faneros dalies esančios bendroje masėje PF faneros, degančiame kure [29]



Angliavandenilių koncentracijos kitimas, priklausantis nuo UF faneros dalies esančios bendroje masėje PF faneros, degančiame kure [29]



NOx koncentracijos kitimas, priklausantis nuo UF faneros dalies esančios bendroje masėje PF faneros, degančiame kure [29]

5 Priedas. Kuro deginimo įrenginių normomis reglamentuojami teršalai

Iš biomasę deginančių įrenginių išmetamų azoto oksidų (NO_x) ribinės vertės, mg/Nm³[23] [24] [25]

Kurą deginančio įrenginio nominali šiluminė galia, MW	Azoto oksidų (NO _x) ribinės vertės, mg/Nm ³				
	LAND 43–2013		Vidutinių KDĮ normos		Didelių KDĮ normos
	esamas įrenginys	naujas įrenginys	esamas įrenginys	naujas įrenginys	
0,12 ≥ MW < 1	750	750	–	–	
1 ≥ MW ≤ 5			650	500	
5 > MW < 20					
20 ≥ MW < 50					
> 50-100 MW					250

Iš biomasę deginančių įrenginių išmetamų kietųjų dalelių ribinės vertės, mg/Nm³[23] [24] [25]

Kurą deginančio įrenginio nominali šiluminė galia, MW	Kietųjų dalelių (KD) ribinės vertės, mg/Nm ³				
	LAND 43–2013		Vidutinių KDĮ normos		Didelių KDĮ normos
	esamas įrenginys	naujas įrenginys	esamas įrenginys	naujas įrenginys	
0,12 ≥ MW < 1	800	800	–	–	

$1 \geq MW \leq 5$	700	400	50	50	
$5 > MW < 20$				30	
$20 \geq MW < 50$	500	300	30	20	
$> 50-100 MW$					30

Iš biomasę deginančių įrenginių išmetamo sieros dioksido (SO₂) ribinės vertės, mg/Nm³ [23] [24] [25]

Kurą deginančio įrenginio nominali šiluminė galia, MW	Sieros dioksido (SO ₂) ribinės vertės, mg/Nm ³				
	LAND 43–2013		Vidutinių KDĮ normos		Didelių KDĮ normos
	esamas įrenginys	naujas įrenginys	esamas įrenginys ¹	naujas įrenginys ²	
$0,12 \geq MW < 1$	2000	2000	–	–	
$1 \geq MW \leq 5$			200	200	
$5 > MW < 20$					
$20 \geq MW < 50$					
$> 50-100 MW$					200

Iš biomasę deginančių įrenginių išmetamo anglies monoksido (CO) ribinės vertės, mg/Nm³ [23] [24] [25]

Kurą deginančio įrenginio nominali šiluminė galia, MW	Anglies monoksido (CO) ribinės vertės, mg/Nm ³				
	LAND 43–2013		Vidutinių KDĮ normos		Didelių KDĮ normos
	esamas įrenginys	naujas įrenginys	esamas įrenginys ¹	naujas įrenginys ²	
0,12 ≥ MW < 1	–	–	–	–	–
1 ≥ MW ≤ 5	4000	4000			
5 > MW < 20					
20 ≥ MW < 50	1500	1000			
> 50-100 MW					

6 Priedas. Kietajame biokure leistinos maksimalios cheminių elementų koncentracijos vertės

Cheminis elementas	Buitinių energijos vartotojų ir (ar) ne gamybos ir pramonės paskirties pastate įrengtame deginimo įrenginyje arba gamybos ir pramonės paskirties pastate, bet mažesnės kaip 120 kW vardinės (nominalios) galios įrengtame deginimo įrenginyje, arba deginimo įrenginyje, kuriame nėra įrengtos temperatūros kontrolės priemonės, naudojamas kietasis biokuras	Gamybos ir pramonės paskirties pastate įrengtame 120 kW ir didesnės, bet mažesnės kaip 1 MW vardinės (nominalios) galios deginimo įrenginyje, kuriame užtikrinama ne mažesnė kaip 600 0C degimo temperatūra ir kuriame įrengtos šios temperatūros kontrolės priemonės, naudojamas kietasis biokuras	Gamybos ir pramonės paskirties pastate įrengtame 1 MW ir didesnės vardinės (nominalios) galios deginimo įrenginyje, kuriame užtikrinama ne mažesnė kaip 850 0C degimo temperatūra ir kuriame įrengtos šios temperatūros kontrolės priemonės, naudojamas kietasis biokuras
1. Azotas, N (% masės, sausosios būsenos)	$N \leq 1 \%$	$N \leq 2 \%$	$N \leq 2 \%$
2. Siera, S (% masės, sausosios būsenos)	$S \leq 0,2 \%$	$S \leq 0,3 \%$	$S \leq 0,6 \%$
3. Chloras, Cl (% masės, sausosios būsenos)	$Cl \leq 0,1 \%$	$Cl \leq 0,3 \%$	$Cl \leq 0,3 \%$
4. Arsenas, As (mg/kg, sausosios būsenos)	$As \leq 1 \text{ mg/kg}$	$As \leq 2 \text{ mg/kg}$	$As \leq 2 \text{ mg/kg}$
būsenos)			

5. Kadmis, Cd (mg/kg, sausosios būsēnos)	Cd ≤ 0,5 mg/kg	Cd ≤ 2 mg/kg	Cd ≤ 2 mg/kg
6. Chromas, Cr (mg/kg, sausosios būsēnos)	Cr ≤ 50 mg/kg (Iš medienos biomasēs Cr ≤ 10 mg/kg)	Cr ≤ 50 mg/kg (iš medienos biomasēs Cr ≤ 15 mg/kg)	Cr ≤ 60 mg/kg (iš medienos biomasēs Cr ≤ 30 mg/kg)
7. Varis, Cu (mg/kg, sausosios būsēnos)	Cu ≤ 20 mg/kg	Cu ≤ 20 mg/kg	Cu ≤ 100 mg/kg
8. Švinas, Pb (mg/kg, sausosios būsēnos)	Pb ≤ 10 mg/kg	Pb ≤ 20 mg/kg	Pb ≤ 20 mg/kg
9. Gyvsidabris, Hg (mg/kg, sausosios būsēnos)	Hg ≤ 0,1 mg/kg	Hg ≤ 0,1 mg/kg	Hg ≤ 0,1 mg/kg
10. Nikelis, Ni (mg/kg, sausosios būsēnos)	Ni ≤ 10 mg/kg	Ni ≤ 10 mg/kg	Ni ≤ 10 mg/kg
11. Cinkas, Zn (mg/kg, sausosios būsēnos)	Zn ≤ 100 mg/kg	Zn ≤ 200 mg/kg	Zn ≤ 200 mg/kg