

SUSIDARANČIŲ TERŠALŲ EMISIJŲ TYRIMAI, PANAUDOJANT BIOKURO IR MEDIENOS ATLIEKŲ MIŠINIUS

Aleksandras Chlebnikovas

*Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Aplinkos inžinerijos fakultetas,
Aplinkos apsaugos institutas*

El. p. aleksandras.chlebnikovas@vilniustech.lt

Anotacija. Energijos (taip pat ir šiluminės energijos) poreikiai sparčiai auga visame pasaulyje, o tai skatina didinti energijos gamybą. Atsižvelgiant į griežtėjančius reikalavimus neatsinaujinančių energijos šaltinių naudojimui biokuro panaudojimas energetikos objektuose yra vienas iš geriausių pasirinkimų, turintis didelį augimo potencialą ir Baltijos šalių regione, ir visoje Europos Sąjungoje, jis ilgainiui tik didės. Publikacijoje ištirtos įvairių biokuro mišinių su ligninu panaudojimo šilumos gamybai galimybės ir jų degimo procesų metu susidarancios emisijos į orą. Įvertinta skirtingo lignino santykio kuro mišinyje, kietą biokurą deginančių įrenginių (katilų) galios bei kuro padavimo į degimo kamerą įtaka dujinių teršalų (CO, NO_x, SO₂) ir kietųjų dalelių emisijoms. Lignino panaudojimas gali efektyviai sumažinti įprasto biokuro poreikį – nuo 30 % iki 100 %, pavyzdžiui, medienos skiedrų panaudojimą degimui, taip pat padidinti išmetamųjų dujų degimo temperatūrą. Nustatyta, kad mažiausios emisijos gali būti pasiektos panaudojant 30 % lignino ir biokuro SM3 mišinį katiluose, kurių galia yra žemiausiame diapazone (2,5–4 MW). Esant optimaliam deguonies/temperatūriniam režimui anglies monoksido koncentracijos siekia apie 20 mg/Nm³, azoto oksidų – apie 500 mg/Nm³. Kietųjų dalelių koncentracija emisijose siekia apie 150 mg/Nm³, todėl būtina taikyti oro valymo įrenginius.

Reikšminiai žodžiai: biokuras, ligninas, dujiniai teršalai, kietosios dalelės, energijos gamyba.

Įvadas

Medienos išteklių kaip vienas iš sąlygiškai atsinaujinančių šaltinių užima svarbią vietą energijos ir išteklių balanse (Chakraborty et al., 2008; Riffell et al., 2011; Toscano et al., 2020).

Panaudojant visas energijos rūšis per 2021 metus pasaulyje buvo pagaminta 25 850 TWh elektros energijos ir 14 510 PJ šilumos energijos, iš kurių atitinkamai 10 065 TWh ir 6270 PJ pagamintos panaudojus kietąjį kurą. ES rodikliai rodo, kad lyginant su 1995 m., kietojo kuro vartojimas 2020 metais sumažėjo nuo 20,9 % iki 10,2 % dėl išaugusios atsinaujinančios energijos ir energijos, gautos perdirbant atliekas. Taip pat kuro diversifikavimas lėmė degalų ir jų produktų vartojimo mažėjimą (European Union, 2022; Miskinis et al., 2013; Subramaniam & Masron, 2020; Toscano et al., 2020).

ES šalys narės įsipareigojo siekti atsinaujinančių energijos šaltinių užsibrėžtų rodiklių visame energijos balanse. Šalių vidurkis yra: transporto sektorius – 6,7 %; elektros energija – 28,8 %; šildymas ir vėsinimas – 18,6 %; bendras išteklių vidurkis – 16,7 %. Atsinaujinančios

energijos dalis bendrame balanse 2020 metų pabaigoje turėjo siekti 20 %.

Akivaizdu, kad biomasė bei atsinaujinančios atliekos yra pagrindiniai energijos išteklių, kurių dalis ateityje tik didės (Riffell et al., 2011). Kaip ES, taip ir Lietuvoje didžiausias biokuro kiekis yra sunaudojamas namų ūkiuose (Ebadian et al., 2020; Havukainen et al., 2018; Subramaniam & Masron, 2020), Lietuvoje šis rodiklis siekia 59 %, o centralizuoto šilumos tiekimo įmonių katilinėse – apie 23,6 % viso medienos kuro kiekio (Ambrulevičius, 2010; Verbickas et al., 2013).

Pagrindinė ir labiausiai naudojama kietojo biokuro rūšis yra mediena. Pagal žaliavos kilmę medienos kuras gali būti skirstomas į kurą iš miškų, iš greitai augančių (energetinių) miškų bei pakartotinai naudojamą medieną. Kuro rūšys, gautos iš miškų bei iš energetinių miškų, gali būti laikomos ekologiškai priimtiniomis, skirtingai negu pakartotinai naudojama mediena, nes ji paprastai būna impregnuota ir dažyta, joje būna įvairių priemaišų (metalo, stiklo, plastmasių ir t. t.), todėl tokios medienos apdorojimas yra sudėtingas (Hedde et al., 2013). Pagrindinę atsinaujinančių energijos išteklių dalį sudarė taip

pat biokuras, kurio kiekis buvo artimas ES-27 vidurkiui ir siekė 86 % (Ebadian et al., 2020).

Lietuvos nacionaliniuose energetinio sektoriaus dokumentuose numatyta, kad centralizuotai tiekiamos šilumos energijos dalis, pagaminta iš atsinaujinančių energijos išteklių, iki 2020 m. turėjo siekti ne mažiau kaip 60 %, pasiekta 50,1 %, o namų ūkiuose – ne mažiau kaip iki 80 %, pasiekta 37,6 % (Statistika, 2021). Mokslininkų vertinama racionali biokuro dalis 2020 m. galėtų siekti 53–62 % (Miskinis et al., 2020).

Būtina pažymėti, kad dabar Lietuvoje malkinės medienos, medienos apdirbimo pramonės atliekų ir sumedėjusių energetinių plantacijų sektoriuose paruošiamo biokuro kiekis šilumos gamybai yra išnaudojamas 100 % (Virbickas & Kliopova, 2017).

Augalai sudaryti iš celiuliozės, hemiceliuliozės ir lignino. Ligninas sudarytas iš C, H, O atomų. Ligninas – tai mišrus polimeras su aromatiniais ir alifatiniais komponentais (Sheng et al., 2021). Jis, kaip antrinė medienos pramonės žaliava, išgaunamas hidrolizės būdu iš smulkinotos medienos pašalinus polisacharidus (celiuliozę) (Leibensperger et al., 2021; Poveda-Giraldo et al., 2021). Ligninas yra netoksiškas, chemiškai mažai aktyvus, todėl turi keletą panaudojimo sričių: specialiai paruoštas ligninas naudojamas kaip biokuras arba kaip žaliava granuliu ar briketų gamybai (Yu et al., 2021). Naudojant ligniną išgaunama 20 % daugiau energijos nei naudojant medieną. Ligninui būdinga aukšta šiluminė vertė (lignine yra apie 64 % anglies) (Ren et al., 2020).

Biokure esantis chloras gali sukelti problemų deginant spygliuočių skiedras, kadangi spyglių kiekis kure yra gana didelis (Brandão et al., 2011). Nors sunkiųjų metalų koncentracijos medienos kure nėra pavojingai didelės, į jų kiekį reikėtų atsižvelgti tuo atveju, kai aplinkosauginiai apribojimai yra gana griežti. Skirtingų malkinės medienos dalių sudėtyje gali būti randami nedideli kiekiai nikelio, arseno, kadmio, chromo, vario, gyvsidabrio, švino ir cinko (Abbasi & Abbasi, 2010).

Kuro drėgnumas charakterizuojamas drėgmės kiekiu, išreikštu procentais kuro naudojamosios masės atžvilgiu. Santykinė kuro drėgmė gali kisti plačiose ribose nuo 0 iki ≥ 60 %. Esant dideliame drėgnumui, kurą sunkiau uždegti, mažesnis jo šilumingumas, nes kure esančiam vandens kiekiui išgarinti suvartojama dalis degimo metu išsiskyrusios šilumos. 30 % drėgnumo medienos šilumingumas yra apie 3,4 MWh/t (Chakraborty et al., 2008).

Kietojo biokuro deginimo indėlis klimato kaitai laikomas neutraliu procesu (Ambrulevičius, 2010), t. y. biokuro degimo metu išsiskyręs CO₂ kiekis yra pasisavinamas aplinkoje augančios augalijos.

Nustatytos vidutinės įvairių kuro rūšių šiltnamio dujų emisijų per gyvavimo ciklą (gCO₂/kWh) palyginimo

reikšmės (1 lentelė). Kietasis biokuras, palyginti su tradiciniu organiniu kuru, pavyzdžiui, akmens anglimis, per visą gyvavimo ciklą pagamintam energijos vienetui išskiria vidutiniškai 16,7 kartus mažiau šiltnamio dujų (CO₂ ekvivalentu) (Shi et al., 2015).

1 lentelė. Įvairių kuro rūšių šiltnamio dujų emisijų per gyvavimo ciklą (gCO₂/kWh) santykinės palyginimo reikšmės (Verbickas et al., 2013)

Kuro tipas	Anglis	Skystasis naftos kuras	Gamtinės dujos	Medienos biokuras
gCO ₂ /kWh	951,9	832,7	607,6	56,9

Išaugęs kietojo biokuro naudojimas centralizuotai gaminamos šilumos sektoriuje, atsisakant mazuto naudojimo, leistų sumažinti 4,9 % viso šalyje susidarančio šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekio, o namų ūkių sektoriaus indėlis siektų 1,1 %. Tad bendras šiltnamio dujų emisijų sumažėjimas sudarytų 6 %, o atskirai šilumos sektoriuje net 35,5 %. Panaudojant sunkiuosius naftos produktus 2019 metais pagaminta 893 TJ energijos (Statistika, 2021).

Oro teršalų emisijų rodikliai (g/kWh) deginant skirtingas kuro rūšis pateikti 2 lentelėje. Pažymėtina, kad ES šalyse oro teršalų emisijos tai pačiai kuro rūšiai kinta dėl taikomų skirtingų technologinių bei inžinerinių ir teršalų surinkimo, skirtingų katilo reguliavimo sprendimų bei biokuro žaliavos kokybės, jos drėgno, šilumingumo (European Environmental Agency..., 2008; Sadauskienė et al., 2012).

2 lentelė. Oro teršalų emisijų rodikliai (g/kWh) deginant skirtingas kuro rūšis (Nomura et al., 2001)

Oro teršalas	Kuro tipas			
	Anglis	Skystasis naftos kuras	Gamtinės dujos	Medienos biokuras
SO ₂	13,23	22,85	0,67	0,69
NO _x	4,63	3,62	1,37	0,82
VOC	0,15	0,14	0,04	0,09
CO	1,27	0,27	0,26	1,23
PM	19,53	0,35	0,003	0,23

Darbuose atliktais skaičiavimais nustatyta, kad SO₂ emisijos labiau sumažėtų namų ūkiuose – 7,2 % nei centralizuotai tiekiamos šilumos gamyboje – 5,9 % (Lietuvos Respublikos aplinkos ministerija, 2020; Lietuvos statistikos departamentas, 2013). Teigiamą aplinkosauginį efektą duotų visiškai akmens anglių pakeitimas kietuoju biokuru namų ūkiuose, o centralizuotai gaminamos šilumos sektoriuje – mazuto atsisakymas. Kietojo biokuro naudojimas leistų sumažinti NO_x emisijas 3,2 % nuo viso šalyje susidarančio NO_x kiekio. Šiuo atveju skirtumas yra

mažesnis nei SO₂ emisijų atveju dėl mažesnio skirtumo tarp mazuto, akmens anglių, gamtinių dujų ir kietojo biokuro degimo metu išskiriamų NO_x emisijų kiekio (Nazari Kudahi et al., 2020; Nazari et al., 2012). Sumedėjusiuose energetiniuose augaluose, palyginti su miško mediena, sukaupti didesni kiekiai azoto, fosforo, kalio, kadmio, taip pat didesnis sumedėjusių energetinių augalų medienos pelningumas. Azoto ir chloro kiekis energetiniuose augaluose gali būti sumažintas agrotechninėmis priemonėmis ir optimizuojant tręšimą bei mažiau naudojant cheminių apsaugos priemonių. Ypač daug teršalų sukaupti, kai plantacijos auginamos rekultivuojamuose plotuose, sanitarinėse pramoninėse zonose, nutekamųjų vandenų dumblo sandėliavimo teritorijose (Ambrulevičius, 2010; Chakraborty et al., 2008).

Numatoma, kad LOJ (lakiųjų organinių junginių) emisijos padidėtų 1,3 % nuo viso šalyje susidarančio LOJ kiekio gamtinių dujų kurą pakeitus biokuru, nes degimo metu susidaro 2,4 kartus mažiau LOJ nei deginant kietąjį biokurą. Ir nors šis kuras yra šiuo atveju švaresnis nei mazutas ar akmens anglis, bet pastarieji sudaro palyginti nedidelę dalį šildymo sektoriuje, o gamtinių dujų pakeitimas kietuoju biokuru duoda neigiamą LOJ emisijų efektą. LOJ daugiausiai susidaro deginant medienos perdirbimo atliekas, kurios dažnai užterštos technologiniuose procesuose naudojamomis cheminėmis medžiagomis: melalamino–karbamido–formaldehido dervomis, polichlorvinilu, sintetiniais lakais ir dažais.

Vis dėlto didžiausias neigiamas efektas būtų CO kiekio padidėjimas 8,2 % pakeitus gamtines dujas biokuru. Išskiriamo CO kiekius lemia biomasės kokybės parametrų netolygumas (drėgmė, šilumingumas) bei blogai nustatytas katilo darbo režimas. Todėl daugiausia (5,5 %) CO emisijos padidėtų centralizuoto šildymo sektoriuje.

Kietųjų dalelių (KD) atveju stebima gana netipinė situacija. Tipinį iškastinį kurą pakeitus biokuru, namų ūkiuose KD emisijų kiekis sumažėtų net 27,1 %, o centralizuotos šilumos gamybos sektoriuje padidėtų 1,3 %. Namų ūkiuose šildymui naudojamos akmens anglis, kurios yra net 83,5 kartus taršesnės KD atveju nei kietasis biokuras, tad kietojo biokuro naudojimas vietoj šio taršaus kuro duotų labai apčiuopiamą teigiamą efektą. Būtina pažymėti, kad toks didelis teigiamas aplinkosauginis efektas būtų pasiektas tik tokiu atveju, jei akmens anglis namų ūkiuose būtų 100 % pakeistos biokuru. Centralizuotai tiekiamos šilumos atveju situacija yra sudėtingesnė ir dėl mažesnių nei deginant mazutą, bet didesnių nei deginant gamtines dujas KD emisijų. Įgyvendinus biokuro plėtros planus, centralizuotai tiekiamos šilumos sektoriuje KD emisijos padidėtų apie 1,3 %.

Dėl platesnio kietojo biokuro naudojimo šilumos gamybos sektoriuje SO₂ emisijos sumažėtų 13,1 %, NO_x – 3,2 %, o KD – 28,4 %, tai galėtų pagerinti miestų oro kokybę (pvz., užterštumo kietosiomis dalelėmis).

Šiame straipsnyje analizuojami energijos gamybai naudojamo biokuro emisijų į orą rodikliai bei galimybės pakeisti šiuo metu tradicinį biokurą kitais biokuro mišiniais su ligninu.

Metodika

Eksperimentiniai tyrimai atlikti rajoninio tipo (apie 100 tūkst. gyv. teritorijoje) termofikacinėse katilinėse, siekta ištirti biokuro katiluose deginamo skirtingo biokuro emisijas įvairiuose dūmų išmetimo taškuose.

Katilas Nr. 1 (*Compact C-500 DH*) – vandens šildymo katilas su ardynine pakura. Jame buvo degintas SM3 biokuras, kuriame lignino dalis sudarė 1/3 nuo bendrojo kuro srauto. Vidutinė katilo šiluminė galia siekė 3,2–4 MW. Buvo atlikti tyrimai, kai biokuro–lignino mišinys tiekta į krosnį be papildomo apdorojimo, kitu atveju – maišant mechaniniu būdu.

Katilas Nr. 2 (*Compact 500 DH*) – vandens šildymo katilas su ardynine pakura, buvo tirtas naudojant SM3 tipo biokurą, lignino dalis sudarė 100 %, kitu atveju – 30 % nuo bendrojo kuro srauto. Vidutinė katilo šiluminė galia siekė 2,5 MW. Visais atvejais biokuro ir lignino mišinys buvo mechaniniu būdu maišomas prieš paduodant į pakurą.

Katilas Nr. 3 (*BFB 25-45-460*) – garų katilas, vieno būgno, vertikalios vandens vamzdžio, su savaimine recirkuliacija, biokuro deginimas verdančiame sluoksnyje, katilas buvo tirtas, kai ligninas sudarė 100 %. Vidutinė katilo šiluminė galia siekė 10 MW. Ligninas tiekta į pakurą be papildomo apdorojimo.

Katilas Nr. 4 (*Compact C-500 DH*) – vandens šildymo katilas su ardynine pakura. Jame buvo degintas SM3 biokuras, kuriame lignino dalis sudarė 1/3 nuo bendrojo kuro srauto. Vidutinė katilo šiluminė galia siekė 3,2–4 MW, maksimali šiluminė galia iki 5,1 MW. Buvo atlikti tyrimai, kai biokuro ir lignino mišinys tiekta į krosnį be papildomo apdorojimo. Katilas Nr. 4 ir Nr. 1 yra analogiški darbo principu, tačiau pastarasis turi mažesnę šiluminę galią.

Tyrimų metu 1–4 katilų parametrai buvo atitinkamai: šilumingumas – 2,5, 3,2, 4,2 ir 5,1 (MW); dūmų temperatūra po kuro deginimo katile – 136, 156, 174, 185 (°C); lyginamasis biokuro sunaudojimas 1 MWh pagaminti – 387,1, 389,1, 503,6, 433,3 (kg/MWh).

Dujinių junginių (O₂, CO, NO, NO₂ ir SO₂) koncentracija emisijose matuota *Testo 350-M/XL*. Tyrimą sudarė nenutrūkstamas 30 minučių matavimas kiekviename šaltinyje. Duomenys buvo nuskaitomi kas 5 minutes, o galutiniu kiekvieno parametro rezultatu laikomas apskaičiuotas tarpinių verčių vidurkis.

Dujinių junginių koncentracijų tyrimai atlikti prieš išmetimą į aplinką, uždaroje šilumos tinklų sistemoje. Tyrimai atlikti pramoninėmis sąlygomis (kurą deginantis įrenginys buvo įjungtas į šilumos tiekimo sistemą, degimo procesas buvo reguliuojamas operatoriaus, jokių nuokrypių nuo įprasto katilo darbo režimo nebuvo) rudens, žiemos, pavasario sezonais.

Kuro kokybės rodiklius nustatė nepriklausomi ekspertai atitinkamai prieš ir po katilų emisijų tyrimų. Cheminė medienos sudėtis medienos ir žievės sausojoje masėje atitinkamai yra: anglis (C) – 48–50 % ir 51–66 %; vandenilis – 6,0–6,5 % ir 5,9–8,4 %; deguonis – 38–42 % ir 24,3–40,2 %; azotas – 0,5–2,3 % ir 0,3–0,8 %; siera – 0,05 %; chloras – mažiau nei 0,01 % ir 0,01–0,03 %.

Rezultatai ir jų analizė

Skirtingo biokuro tipų emisijų tyrimai grindžiami galimybe panaudoti labiau energetiniu požiūriu efektyvų kurą arba analogišką jam, kartu sumažinant išsiskiriančių teršalų koncentraciją ir / arba pakeičiant išmetamųjų dujų sudėtį į tokią, kuri yra aplinkosauginiu požiūriu priimtinesnė.

Prieš emisijų tyrimus buvo atlikta cheminė elementinė skirtingų kuro mišinių mėginių sudėties analizė. Tyrimais nustatyta, kad lignine daugiausiai yra bendrojo chloro 138,50 mg/kg bei cinko 98,95 mg/kg, kiek mažiau vario 54 mg/kg bei chromo 32,35 mg/kg. Cheminių elementų kiekio mažėjimo tvarka: švinas, nikelis, fluoras, boras, arsenas, kadmis, gyvsidabris.

Kuro rūšims taikomi kokybės rodikliai:

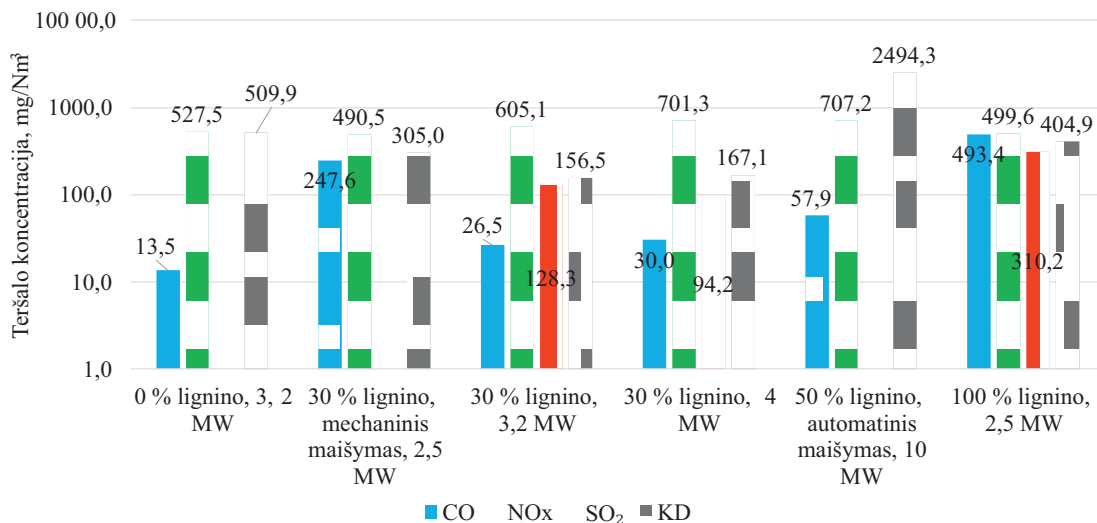
1. SM3 klasės biokurui: peleningumas – ne daugiau kaip 5 % (EN 14775), sieros (% pagal masę) – ne daugiau kaip 0,04 % (CEN/TS 15289), chloro (% pagal masę) – 0,03 % (CEN/TS 15289);

2. Ligninui: peleningumas – ne daugiau kaip 8 % (LBM klasė), sieros – ne daugiau kaip 0,3 % (CEN/TS 15289).

Emisijų tyrimais nustatytos tendencijos, priklausimai nuo kuro mišinio sudėties, skirtingų apkrovų katilams. Gauti rezultatai rodo, kad esant mažiausiai lignino daliai kuro mišinyje (30 %), emisijų sudėtis dūmtakelyje, esančiame iškart po katilo (nominali galia 5 MW), kurio galia buvo nustatyta ties 3,2 MW, buvo: CO – 24,7–28,6 mg/Nm³, NO_x – 590,0–618,5 mg/Nm³, SO₂ – 123,9–132,9 mg/Nm³, KD – 150,1–162,3 mg/Nm³, deguonies dalis siekė 8,05–8,52 %. Dujų srauto temperatūra dūmtakelyje siekė 141–145 °C, o tūrio debitas 1,54 Nm³/s. Šiame katile naudojant kaip kurą vien tik biokuro SM3 masę, emisijos buvo: CO – 12,1–14,9 mg/Nm³, NO_x – 505,8–552,8 mg/Nm³, SO₂ – 5,5–11,5 mg/Nm³, KD – 480,5–540,6 mg/Nm³, kai deguonies dalis siekė 7,84–7,94 %, o temperatūra siekė 136–141 °C, tūrio debitas buvo lygus 1,56 Nm³/s (1 paveikslas).

Atsižvelgiant į rezultatus galima teigti, kad trečdalis biokuro SM3 sutaupymas panaudojant vietoj jo ligniną padidina tik sieros dioksido koncentracijas, tačiau sumažina iki 3,5 karto kietųjų dalelių koncentraciją. Biokuro ir lignino mišinys, kitaip nei grynas biokuras SM3, kiek padidina šiluminį efektyvumą, pakeldamas degimo temperatūrą kiek mažiau nei 10 %.

Galios padidinimas nuo 3,2 MW iki 4 MW deginant mišinį, kuriame lignino dalis kure sudarė 30 %, pakėlė išmetamųjų dujų temperatūrą iki 152,4–155,6 °C, tūrio debitas išliko pastovus ir lygus 1,57 Nm³/s, deguonies koncentracija buvo 5,71–6,92 %. Tuo metu CO koncentracija siekė 28,4–31,6 mg/Nm³, NO_x – 694,3–709,5 mg/Nm³, SO₂ – 91,8–96,8 mg/Nm³, o kietųjų dalelių – 156,1–178 mg/Nm³. Katilo apkrovos didinimas esant biokuro SM3 ir lignino mišiniui nesukelia



1 paveikslas. Išsiskiriančių teršalų vidutinės koncentracijos esant skirtingai lignino daliai deginamame kure ir katilo galiai deginimo režimo metu

papildomų technologinių kliūčių, o pasiekama aukštesnė temperatūra lyginant su atveju deginant vien tik biokurą SM3 įrodo lignino energetinį potencialą (aukštą kaloringumą) jo taikymui energijai gauti.

Didinant temperatūrą įvyksta geresnis kuro mišinio sudegimas bei sumažėja sieros dioksido emisijos iki 1,5 karto, anglies monoksido ir kietųjų dalelių išlieka panašios. Dėl aukštesnės temperatūros azoto oksidų koncentracijos padidėja, tačiau tai įvyksta esant sumažėjusiam deguonies kiekiui iki apytiksliai 6,3 %.

Katile Nr. 2, kurio galia siekė 2,3–2,5 MW, mechaniniu būdu buvo tiekiamas lignino ir biokuro SM3 mišinys santykiu 30:70, biokuro katilo sistemoje buvo galimybė nustatyti teršalų koncentracijas iškart po kuro deginimo katile: CO – 238,1–258,2 mg/Nm³, NO_x – 482,8–499,0 mg/Nm³, SO₂ – 10,5–12,5 mg/Nm³, KD – 297,4–311,3 mg/Nm³, deguonies koncentracija siekė 9,58–9,60 %. Dujų srauto temperatūra dūmtakyje siekė 154,3–159,7 °C, o tūrio debitas 1,85 Nm³/s.

Akivaizdu, kad, taikant abiejų biokuro tipų mišinį, vidutinės galios katile pagal LAND 43-2013 „Išmetamų teršalų iš kurų deginančių įrenginių normas“ ir išlaikant apie 9,5 % deguonies koncentraciją, yra pasiekiamos mažiausios emisijos tarp visų analizuojamų šiame tyrime atvejų. Nors anglies monoksido ir kietųjų dalelių koncentracijos šiuo atveju yra didesnės nei atveju, kai buvo išlaikoma apie 6,3 % deguonies koncentracija, tačiau sieros ir azoto oksidų vertės yra itin sumažėjusios.

Galima daryti prielaidą, kad išlaikant 7–8 % deguonies koncentraciją, anglies monoksido koncentracija sumažės ir siekia iki 100 mg/m³. Mechaninis mišinio tiekimas į degimo kamerą galimai padidina skendinčiųjų ore ypač smulkių kietųjų dalelių koncentraciją. Dėl papildomo mišinio struktūros ardymo ir maišymo tik dalis skendinčiųjų ore dalelių patenka į pagrindinę degimo zoną, kita dalis išnešama su atidirbusiais dūmais ir patenka į aplinką. Todėl būtų vertinga taikyti pusiau uždaro tipo degimo kamerą, kurioje kietosios dalelės

nebūtų pakeltos esamais srautais dėl konvekcijos ir / ar sukuriama priverstinio judėjimo dūmų siurbliais, o jų dalis sudegtų ir liktų pelenų pavidalu.

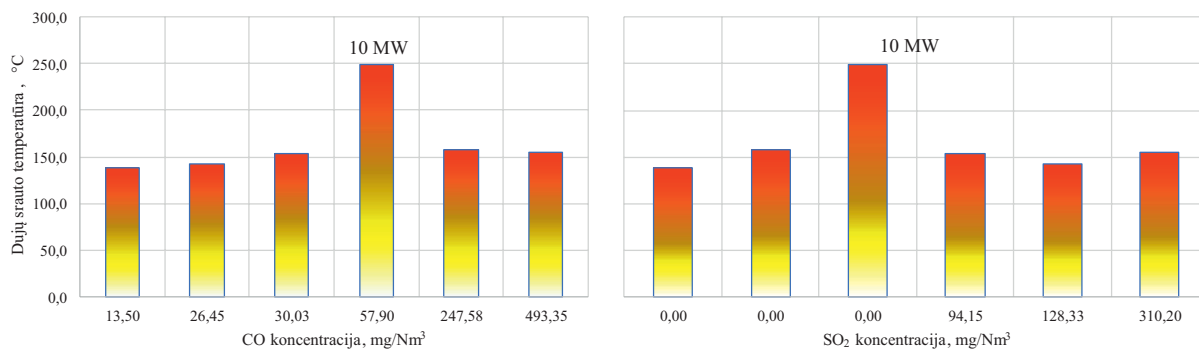
Katile Nr. 2 buvo atlikti tyrimai, kai šiluminė galia buvo 2,5 MW, o į kuro degimo kamerą buvo tiekiamas vien tik lignino masė. Tyrimų stende buvo galimybė nustatyti teršalų koncentracijas iškart po katilo: CO – 444,3–545,0 mg/Nm³, NO_x – 448,0–564,3 mg/Nm³, SO₂ – 299,9–321,9 mg/Nm³, KD – 392,6–419,7 mg/Nm³, deguonies dalis siekė 7,96–9,12 %. Dujų srauto temperatūra dūmtakyje siekė 151,6–158,9 °C, o tūrio debitas 1,41 Nm³/s.

Remiantis emisijų rezultatais, kai buvo degintas grynas ligninas, vidutinės galios katile koncentracijos padidėja gana stipriai lyginant su atvejais, kai lignino dalis sudarė 30 %: CO – apie 1,8 karto, SO₂ – apie 10 kartų, KD – 1,3 karto, tačiau NO_x vertės yra apylygės. Galima teigti, kad gryno lignino mišinio panaudojimas nedidelės apkrovos katile sukelia problemų, kurios susijusios su viso degimo proceso palaikymu, tai atsispindi ypač didelės anglies monoksido ir kintančios deguonies koncentracijose, taip pat ir kitų teršalų koncentracijose, kurios, bendrai vertinant, yra didesnės nei kitais nagrinėjama atvejais. Todėl tokio proceso taikymas nėra racionalus lignino naudojimo deginimui atvejis energijai gauti.

Katile Nr. 3 buvo naudotas automatinis mišinio paruošimas ir tiekimas į katilą, visais atvejais lignino ir biokuro SM3 santykis išlaikomas 50:50 pagal masę. Katilo šiluminė galia iš visų nagrinėjamų atvejų buvo didžiausia ir siekė 10 MW.

Emisijų ir dujų srauto parametrų tyrimas atliktas taške, nutolusiame 15 metrų nuo dūmtakio iš katilo ardymo. Nustatytos emisijos buvo: CO – 55,0–60,1 mg/Nm³, NO_x – 702,4–711,7 mg/Nm³, SO₂ – 0 mg/Nm³, KD – 2447,8–2539,4 mg/Nm³, deguonies dalis siekė 8,60–8,92 %. Dujų srauto temperatūra dūmtakyje siekė 248,9–249,8 °C, o tūrio debitas 10,65 Nm³/s.

Didžiausios galios katile nagrinėjant sudegusio vienodo santykio biokuro tipų mišinio emisijas galima



2 paveikslas. Išsiskiriančių anglies monoksido ir sieros dioksido koncentracijų priklausomybės nuo dujų srauto temperatūros, esant skirtingai katilų šiluminei galiai ir lignino daliai kuro mišinyje

teigti, kad koncentracijos priklausomai nuo teršalų išsiskiria, pavyzdžiui, anglies monoksido koncentracijos yra nedidelės, sieros dioksido neaptikta. Tačiau azoto oksidų koncentracijos yra nedidelės, nepaisant aukštos dujų srauto temperatūros. Kietųjų dalelių koncentracija taip pat yra didelė, todėl realizuojant šį atvejį privaloma taikyti dujų srauto valymą. Valymo būdas nereikalauja sudėtingų technologijų dėl gana stambių lignino kietųjų dalelių, todėl būtų pakankama įrengti tradicinius valymo įrenginius – karščiui atsparų rankovinį filtrą arba cikloną efektyviam kietųjų dalelių nusodinimui. Taip pat moksliniais tyrimais įrodyta, kad žemesnė degimo kameros temperatūra itin sumažina azoto oksidų koncentraciją (Nazari et al., 2012).

Tokiu atveju būtų galima sudaryti preliminarią išsiskiriančių teršalų dinamiką, priklausomai nuo katilų darbo sąlygų bei deginamo kuro parametrų.

Buvo išanalizuoti katilo darbo rodikliai atsižvelgiant į temperatūrą ortakyje skirtingais deginimo režimais katiluose bei ieškoma sąryšių su degimo procesams būdingų teršalų koncentracijų kitimu.

2 paveiksle pavaizduotos dujų srauto temperatūros dūmtakyje ir dujinių teršalų koncentracijų emisijų sąryšiai leidžia optimizuoti degimo procesą priklausomai nuo katilo galios. Nustatyta, kad anglies monoksido koncentracijos išlieka gana pastovios apie 10–30 mg/Nm³ esant 140–150 °C dujų srauto temperatūrai, kai lignino dalis kure yra 30 %. 10 MW galios katilo su 50 % lignino kure atveju CO emisijos yra sąlygiškai nedidelės ir yra kiek mažiau nei 60 mg/Nm³. Deginant kurą, kuriame nebuvo lignino, CO koncentracijos taip pat buvo mažos ir siekė apie 15 mg/Nm³.

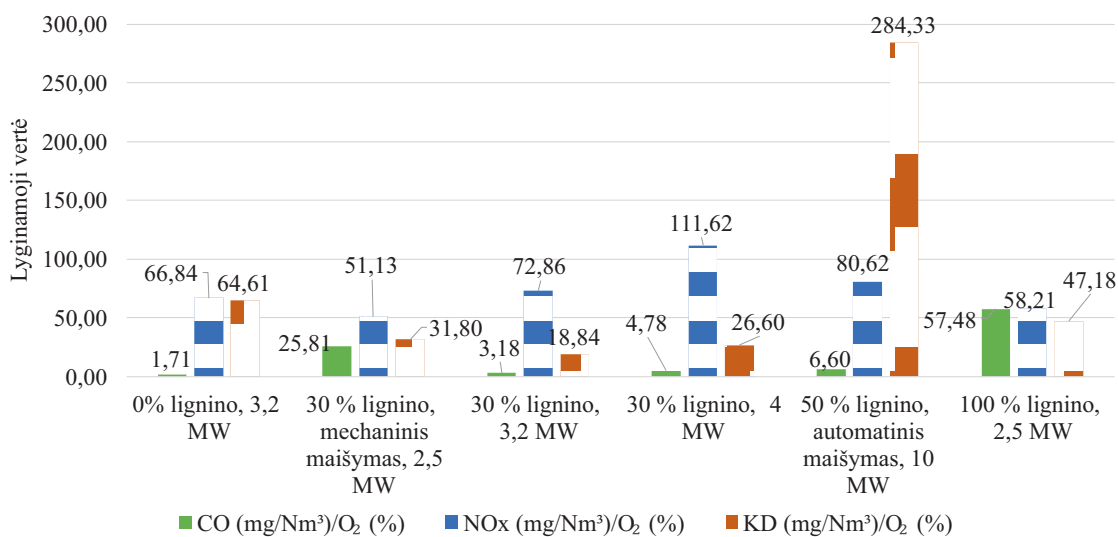
SO₂ emisijos veikiant 10 MW šiluminės galios katilui yra taip pat vienos mažiausių, t. y. 0 mg/Nm³. Nulinės koncentracijos taip pat gautos deginant kurą, sudarytą

iš 30 % lignino mažesnės galios (2,5 MW) katile, taip pat deginant gryną SM3 klasės biokurą be lignino. Kaip yra žinoma, aukšta temperatūra ypač didelę įtaką turi azoto oksidų koncentracijai, šiuo atveju temperatūros vidutinės galios katiluose siekė 140–150 °C, o didesnės galios 10 MW – apie 250 °C. Remiantis rezultatais galima teigti, kad palankiausi atvejai, kai buvo gautos kitų teršalų mažiausios koncentracijos, išlieka mažesnės galios katiluose (2,5–3,2 MW) deginamo kuro, kuris sudarytas iš 30 % lignino, kai NO_x emisijos siekė apie 500–600 mg/Nm³. Pažymėtina, kad didesnės galios katile (10 MW) NO_x emisijos buvo sąlygiškai nedidelės ir lygios apie 700 mg/Nm³, atsižvelgiant į tai, kad šiuo atveju temperatūra buvo apie 1,7 karto aukštesnė nei kitais atvejais, tai turėjo įtakos rezultatams. Taip pat azoto oksidų padidėjimas dėl temperatūrinės oksidacijos vyksta esant kiek aukštesnei temperatūrai, t. y. aukštesnei kaip 300 °C, tai šiuo atveju pasiekta nebuvo. Todėl galima teigti, kad trečdalis lignino kuro mišinyje didelės galios katile nesudaro sąlygų susidaryti didelėms NO_x koncentracijoms.

Kietųjų dalelių koncentracijos kito plačiame intervale vidutiniškai nuo 150 mg/Nm³ iki 2500 mg/Nm³. Kaip ir kitais atvejais mažiausiai užterštos dujos susidarė deginant biokurą, sudarytą 30 % iš lignino mažesnės galios (2,5–3,2 MW) katiluose, o KD emisijos siekė 150–305 mg/Nm³. Šiuo atveju didesnės galios (10 MW) katile susidarė labiausiai užterštas KD dujų srautas.

Optimizuojant degimo procesus svarbų vaidmenį atlieka deguonies koncentracija dujų sraute. 3 paveiksle pateiktas apibendrinantis teršalų ir deguonies santykių kitimas kiekvienam iš katilų, esant skirtingai kuro sudėčiai.

2,3–4 MW galios katiluose, kai CO koncentracija yra nedidelė, vertinant pagal Pearsono koreliacijos



3 paveikslas. Išsiskiriančių teršalų lyginamųjų verčių palyginimas deginant skirtingus biokuro mišinius

koeficientą, su NO_x koncentracija ryšys yra vidutinis, koeficientas lygus $-0,62$, tačiau NO_x koncentracija sumažėja, kai CO emisija yra apytiksliai didesnė kaip 200 mg/Nm^3 . Kietųjų dalelių koncentracija yra mažėjančios tendencijos didėjant CO koncentracijai, tai gali būti siejama su mažesnių suodžių susidarymu išmetamosiose dujose, kai CO kiekis yra mažesnis. Didžiausios SO_2 koncentracijos buvo nustatytos tais atvejais, kai CO kiekiai buvo vidutiniškai $20\text{--}30 \text{ mg/Nm}^3$, ir atveju, kai kuras buvo 100% sudarytas iš lignino ir degintas $2,5 \text{ MW}$ katile, kitais atvejais SO_2 emisija buvo lygi 0 mg/Nm^3 . Panaši situacija nustatyta ir KD-SO_2 priklausomybėje, kai SO_2 kiekiai nustatyti tik esant mažai KD koncentracijai, arba atveju, kai buvo degintas grynas ligninas.

Pagal sudarytą stulpelinę diagramą galima teigti, kad CO-O_2 sąryšis išlieka labai panašus visais atvejais, ir tik atveju, kai buvo deginamas grynas ligninas, santykio vertė padidėjo apie $6,8$ karto, o tam turėjo įtakos du kartus didesnė CO koncentracija ir degimui reikalingo O_2 kiekis nei kitais atvejais, kai ligninas sudarė 0% , 30% arba 50% .

Azoto oksidų ir deguonies santykio vertės, nors ir kito plačiame intervale $51,1\text{--}111,6$, tačiau jų pokyčiai nėra esminiai. Kietųjų dalelių ir deguonies verčių santykio vertės buvo mažėjančios tendencijos didinant lignino dalį kure. Išimtį sudaro atvejis, kai kuras, 50% sudarytas iš lignino, buvo deginamas didesnės galios katile (10 MW). Taip pat nustatyta, kad santykio vertė pradeda didėti, kai lignino dalis kure siekia link 100% . Šie du paskutiniai atvejai rodo, kad išliekant nedideliame deguonies kiekiui dujų sraute, tačiau didinant lignino dalį bendrame kuro sraute kietųjų dalelių koncentracijos didėja. Tai galima aiškinti tuo, kad ligninas kaip kuras, lyginant su įprastu SM_3 biokuru, yra labiau taršus, šiuo atveju išsiskiria daugiau lakiųjų smulkiųjų kietųjų dalelių, kurios nenusėda kaip pelenai, tačiau pagautos dujų srauto yra išnešamos pro katilo kaminą. Taip pat galima daryti prielaidą, kad deginant kurą, kurio sudėtyje yra daugiau nei 50% lignino, katile turi būti didinamas deguonies kiekis tam, kad susidarytų mažesni teršalų kiekiai.

Išvados

1. Dujinės ir kietųjų dalelių emisijos deginant lignino ir biokuro mišinį analizuotos naudojant vidutinės galios $2,3\text{--}4 \text{ MW}$ ir kiek didesnės 10 MW katilus. Panaudojant 33% lignino bendrame kure sraute kartu su biokuru SM_3 padidina sieros dioksido koncentraciją ir sumažina iki $3,5$ karto kietųjų dalelių koncentraciją. Didesnio kaloringumo ligninas kuro mišinyje, kitaip nei grynas biokuras SM_3 , padidina vidutinę degimo temperatūrą apie 10% .
2. Technologiškai didinant kuro mišinio degimo temperatūrą didesnės galios katile sumažėja sieros

dioksido emisijos iki $1,5$ karto, anglies monoksido ir kietųjų dalelių išlieka panašios. Dėl aukštesnės temperatūros azoto oksidų koncentracijos padidėja, tačiau tai įvyksta esant sumažėjusiam deguonies kiekiui, kai vertė siekia apie $6,3\%$, o išlaikant deguonies koncentraciją apie $9,5\%$ yra pasiekiamos mažiausios emisijos tarp visų analizuojamų šiame tyrime atvejų. Manoma, kad išlaikant $7\text{--}8\%$ deguonies koncentraciją, anglies monoksido koncentracija sieks tik iki 100 mg/Nm^3 .

3. Gryno lignino mišinio panaudojimas nedidelės apkrovos ($2\text{--}3 \text{ MW}$ šiluminio našumo) katile sukelia problemų, kurios susijusios su viso degimo proceso palaikymu, tai atsispindi ypač didelės anglies monoksido ir kintančios deguonies koncentracijose, taip pat ir kitų teršalų koncentracijos yra didesnės nei kitais nagrinėjamaiais atvejais, tai nėra racionalu ir tvaru energijai gauti.
4. Deginant ligniną didesnės galios (10 MW ir didesnės) katiluose susiduriama su padidėjusiomis azoto oksidų ir kietųjų dalelių koncentracijomis ypač esant aukštomis dujų srauto temperatūroms, tai reikalaus nesudėtingos kietųjų dalelių šalinimo technologijos, tokios kaip rankovinis filtras arba ciklonas, o azoto oksidams rekomenduotina mažinti degimo kameros temperatūrą, tai itin sumažintų azoto oksidų koncentraciją.

Literatūra

- Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2010). Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *14*, 919–937. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.006>
- Ambrulevičius, R. (2010). Biomasės deginimas mažos bei vidutinės galios katilinėse ir emisijų problemos. *Energetika*, *56*(2), 103–109.
- Brandão, M., Milà i Canals, L., & Clift, R. (2011). Soil organic carbon changes in the cultivation of energy crops: Implications for GHG balances and soil quality for use in LCA. *Biomass and Bioenergy*, *35*(6), 2323–2336. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.10.019>
- Chakraborty, N., Mukherjee, I., Santra, A., Chowdhury, S., Chakraborty, D. S., Bhattacharya, S., Mitra, A. P., & Sharma, C. (2008). Measurement of CO_2 , CO, SO_2 , and NO emissions from coal-based thermal power plants in India. *Atmospheric Environment*, *42*, 1073–1082. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.10.074>
- Ebadian, M., van Dyk, S., McMillan, J. D., & Saddler, J. (2020). Biofuels policies that have encouraged their production and use: An international perspective. *Energy Policy*, *147*, 111906. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111906>
- European Union. (2022). *Eurostat. Statistics explained*. <https://ec.europa.eu/eurostat>
- Havukainen, J., Nguyen, M., Väisänen, S., & Horttanainen, M. (2018). Life cycle assessment of small-scale combined heat and power plant: Environmental impacts of different forest

- biofuels and replacing district heat produced from natural gas. *Journal of Cleaner Production*, 172.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.241>
- Hedde, M., Oort, F., Renouf, E., Thénard, J., & Lamy, I. (2013). Dynamics of soil fauna after plantation of perennial energy crops on polluted soils. *Applied Soil Ecology*, 66, 29–39.
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2013.01.012>
- Leibensperger, C., Yang, P., Zhao, Q., Wei, S., & Cai, X. (2021). The synergy between stakeholders for cellulosic biofuel development: Perspectives, opportunities, and barriers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137, 110613.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110613>
- Lietuvos Respublikos aplinkos ministerija. (2020). *Darnaus vystymosi rodikliai*. <https://am.lrv.lt/>
- Lietuvos statistikos departamentas. (2013). *Kuro ir energijos balansas 2012*.
- Miskinis, V., Baublys, J., Lekavicius, V., & Morkvėnas, A. (2013). New changes in the Lithuanian energy sector. *Journal of Security and Sustainability Issues*, 2, 15–28.
[https://doi.org/10.9770/jssi.2013.2.3\(2\)](https://doi.org/10.9770/jssi.2013.2.3(2))
- Miskinis, V., Galinis, A., Konstantinavičiūtė, I., Lekavicius, V., & Neniškis, E. (2020). Comparative analysis of energy efficiency trends and driving factors in the Baltic States. *Energy Strategy Reviews*, 30, 100514.
<https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100514>
- Nazari Kudahi, S., Shahhoseini, O., Sohrabi-Kashani, A., Davari, S., Paydar, R., & Delavar, Z. (2020). Experimental determination and analysis of CO₂, SO₂ and NO_x emission factors in Iran's thermal power plants. *Energy*, 35, 2992–2998.
- Nazari, S., Shahhoseini, O., Sohrabi-Kashani, A., Davari, S., Sahabi, H., & Rezaeian, A. (2012). SO₂ pollution of heavy oil-fired steam power plants in Iran. *Energy Policy*, 43, 456–465. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.01.040>
- Nomura, N., Inaba, A., Tonooka, Y., & Akai, M. (2001). Life-cycle emission of oxidic gases from power-generation systems. *Applied Energy*, 68, 215–227.
- Poveda-Giraldo, J. A., Solarte-Toro, J. C., & Cardona Alzate, C. A. (2021). The potential use of lignin as a platform product in biorefineries: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138, 110688.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110688>
- Ren, T., You, S., Zhang, M., Wang, Y., Qi, W., Su, R., & He, Z. (2020). Improved conversion efficiency of lignin-to-fuel conversion by limiting catalyst deactivation. *Chemical Engineering Journal*, 410, 128270.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.128270>
- Riffell, S., Verschuyl, J., Miller, D., & Wigley, T. (2011). Biofuel harvests, coarse woody debris, and biodiversity – A meta-analysis. *Forest Ecology and Management*, 261, 878–887.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.12.021>
- Sheng, Y., Lam, S. S., Wu, Y., Ge, S., Wu, J., Cai, L., Huang, Z., Le, Q. Van, Sonne, C., & Xia, C. (2021). Enzymatic conversion of pretreated lignocellulosic biomass: A review on influence of structural changes of lignin. *Bioresource Technology*, 324, 124631.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124631>
- Shi, J., Deng, H., Bai, Z., Kong, S., Wang, X., Hao, J., Han, X., & Ning, P. (2015). Emission and profile characteristic of volatile organic compounds emitted from coke production, iron smelt, heating station and power plant in Liaoning Province, China. *Science of the Total Environment*, 515–516, 101–108.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.02.034>
- Lietuvos statistikos departamentas. (2021). *Oficialios statistikos portalas*. <https://osp.stat.gov.lt/>
- Subramaniam, Y., & Masron, T. A. (2020). The impact of economic globalization on biofuel in developing countries. *Energy Conversion and Management*, X, 100064.
<https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2020.100064>
- Toscano, G., Leoni, E., Feliciangeli, G., Duca, D., & Mancini, M. (2020). Application of ISO standards on sampling and effects on the quality assessment of solid biofuel employed in a real power plant. *Fuel*, 278, 118142.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118142>
- Verbickas, D., Juknys, R. ir Kleismantas, A. (2013). Kietojo biokuro naudojimas Lietuvos šilumos gamybos sektoriuje, tolesnės perspektyvos ir poveikis aplinkai. *Energetika*, 59.
<https://doi.org/10.6001/energetika.v59i3.2706>
- Virbickas, L., & Kliopova, I. (2017). Analysis of air emissions and greenhouse gases in woody biomass production Chain. *Environmental Research, Engineering and Management*, 73.
<https://doi.org/10.5755/j01.erem.73.2.18806>
- Yu, J., Wang, D., & Sun, L. (2021). The pyrolysis of lignin: Pathway and interaction studies. *Fuel*, 290, 120078.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.120078>

STUDY OF EMISSIONS USING BLENDS OF COKE AND WOOD WASTE

A. Chlebnikovas

Summary

The Growth of the needs for energy increases supply and production. Given strict norms for the non-renewable energy takes the possibility to use of biofuel as one of the best raw material with high efficiency for the Baltic region and the European Union as a whole. This research investigates the possibilities of using various coke and coke wastes as biofuel including lignin for energy production in a power plant and pollutant emissions to the air during the combustion of these biofuel mixtures. This publication explores the most environmental effective ratio of lignin in the fuel mixture and generated gaseous pollutants (CO, NO_x, SO₂) and particulate matter emissions. The part of lignin in the biofuel mixture reduces the quantity of conventional biofuel by 30–100% and to increase the temperature of the exhaust gases. The most suitable case and the lowest emission reached at level of lignin in mixture about 30% for combustion in average-power boiler of 2.5–4 MW. Carbon monoxide and nitrogen oxides levels were no more than 20 mg/Nm³ and 500 mg/Nm³ accordingly at optimal oxygen/temperature ratio. Particulate matter emission reached until 150 mg/Nm³, and hence applying air treatment equipment is required.

Keywords: coke, lignin, gaseous pollutants, particulate matter, energy generation.