

Mažos ir vidutinės galios kietuoju kuru kūrenamų įrenginių kietųjų dalelių emisijų tyrimas

Jurij Tonkonogij,

Nerijus Pedišius,

Arūnas Stankevičius,

Andrius Tonkonogovas

*Lietuvos energetikos institutas,
Šiluminių įrengimų tyrimo ir
bandymų laboratorija,
Breslaujos g. 3, LT-44403 Kaunas
El. paštas: jurij.tonkonogij@lei.lt;
nerijus.pedisius@lei.lt;
arunas.stankevicius@lei.lt;
andrius.tonkonogovas@lei.lt*

Eksperimentiškai ištirtos Lietuvoje gaminamų mažos nuo 6 iki 50 kW galios biokuru kūrenamų šildymo įrenginių, neturinčių dūmų valymo įrangos, kietųjų dalelių (KD) emisijų masės koncentracijos. Nustatyta, kad granuliuotu kuru kūrenamų vandens šildymo katilų KD emisijos mažiausios. Iš devyniolikos tirtų tokių katilų, esant vardinei galiai, 74 % jų KD emisijos buvo $<40 \text{ mg/m}^3$ ir atitiko reikalavimus, keliamus 5 klasės katilams; 21 % jų KD emisijos siekė $<60 \text{ mg/m}^3$ ir tenkino 4 klasės reikalavimus. Malkomis kūrenamų katilų, neatsižvelgiant į jų tipą, KD emisijų masės koncentracijos kito nuo 20 iki 90 mg/m^3 ir dauguma jų tenkino 4–5 klasės reikalavimus. Malkomis kūrenamoms krosnelėms dėl mažiau intensyvaus degimo ir tinkamai sureguliuavus įsidegimą, taip pat pirminio ir antrinio oro degimui tiekiamą pasiekiamas KD emisijų lygis $30\text{--}45 \text{ mg/m}^3$.

Atlikti taip pat medienos skiedromis kūrenamo vidutinės (500 kW) vandens šildymo katilo dūmuose esančių KD dydžio ir tankio tyrimai. Ištirtas įrengto už katilo 6 elementų multiciklono veikimo efektyvumas ir KD prieš multicikloną ir už jo, atskirtų KD tankio pasiskirstymas pagal dydį. Nustatyta, kad KD emisijose yra daugiausia $0,2\text{--}0,3 \mu\text{m}$ dydžio smulkiųjų dalelių. Multiciklone sulaikomų dalelių kiekis didžiausias $2\text{--}5 \mu\text{m}$ intervale. Nors multiciklone iš dalies taip pat sulaikomos smulkiosios dalelės, bet siekiant užtikrinti mažas KD emisijas iš įrenginių, kūrenamų biokuru, svarbu naudoti papildomą įrangą, kuri leidžia sumažinti išmetamų smulkiųjų KD kiekį.

Eksperimentiniai rezultatai gerai koreliuoja su atliktos trumpos, kietuoju biokuru kūrenamų įrenginių KD emisijų charakteristikų ir jų mažinimo metodų, apžvalgos rezultatais. Patvirtinamas būtinumas, kad naudojant tokį kurą reikia taikyti metodus ir įrangą, užtikrinančius KD smulkesnių nei $1 \mu\text{m}$ sulaikymą. Elektrostatiniai KD nusodintuvai ir medžiaginiai arba keraminiai filtrai leidžia pasiekti geriausių rezultatų, o jų taikymo tyrimai sparčiai plėtojami.

Raktažodžiai: kietųjų dalelių emisija, kietasis biokuras, katilas, ciklono efektyvumas

ĮVADAS

Pastaruju metu sparčiai didėja biokuro naudojimas įvairaus tipo šildymo įrenginiuose. Tai

reikalauja skirti daugiau dėmesio biokuru kūrenamiems įrenginiams tobulinti ir juose vykstančioms procesams tirti. Lietuvoje didžiąją dalį atsinaujinančiųjų energijos išteklių sudaro kietasis

biokuras – įvairių rūšių medienos kuras, šiaudai ir kita augalinė biomasė, skirta energijai gaminti. Namų ūkiuose ir centralizuoto šildymo katilinėse dabar daugiausia naudojamas medienos kuras, nes jo ištekliai yra didžiausi ir lengviausiai pasiekiami, o deginimo technologijos ir įrenginiai labiausiai išplėtoti. Šio kuro potencialas dar nėra pakankamai tiksliai įvertintas ir gali siekti 1 300–1 400 ktne arba 7,45–8,10 mln. m³ medienos. Šiuo metu jau panaudojama apie 1 085 ktne. Pastaraisiais 20 metų medienos kuro naudojimas nuolat augo. 2014 m. duomenimis [1], namų ūkiuose buvo naudojama apie 508,7 ktne (46,9 %) bendrojo medienos kuro kiekio, o centralizuoto šildymo katilinėse ir kogeneracinėse elektrinėse atitinkamai 448,2 ktne (41,3 %). Likę kiekiai 128,1 ktne (11,8 %) šildymui ir technologiniams procesams vykdyti buvo sunaudoti pramonės, paslaugų ir žemės ūkio sektoriuose. Sparti biokuro paklausa yra susijusi su vis intensyvesniu jo naudojimu ne tik naujai įrengtose šildymo sistemose, bet ir mažiau efektyviose senose, kurių taršos emisijos yra gerokai didesnės. Lietuvoje didžioji dalis namų ūkiuose eksploatuojamų šildymo sistemų yra techniškai pasenusios. Lyginant su naujosiomis sistemomis, jos išmeta į aplinką didesnius kiekius teršalų, pavyzdžiui, anglies monoksido, organinių junginių, kietųjų dalelių ir policiklinių aromatinių angliavandenilių. Visi šie teršalai gerokai padidina gyvenamųjų rajonų, apšildomų biokuru, užterštumą, ypač šildymo sezono metu, o užterštumas kietosiomis dalelėmis (toliau – KD) KD₁₀, kurių aerodinaminis skersmuo <10 μm, dažnai yra didesnis nei reglamentuoja normos.

Šioms problemoms spręsti buvo kreipiama nepakankamai dėmesio, nes formuota nuomonė, kad biokuro panaudojimas energijai gaminti teikia tik privalumus – leidžia mažinti CO₂ emisijas bei importuojamo iškastinio kuro naudojimą. Straipsnyje pateikiama KD emisijų iš biokuru kūrenamų mažos ir vidutinės galios įrenginių charakteristikų tyrimo, jų mažinimo priemonių taikymo ir leidžiamųjų normų ES šalyse apžvalga; Lietuvoje gaminamų ir tiekiamų rinkai mažos galios biokuru kūrenamų šildymo įrenginių KD emisijų ir jų mažinimo, naudojant multicikloną vidutinės galios vandens šildymo katilui, tyrimo rezultatai.

KD EMISIJŲ MAŽINIMO METODŲ TYRIMŲ APŽVALGA

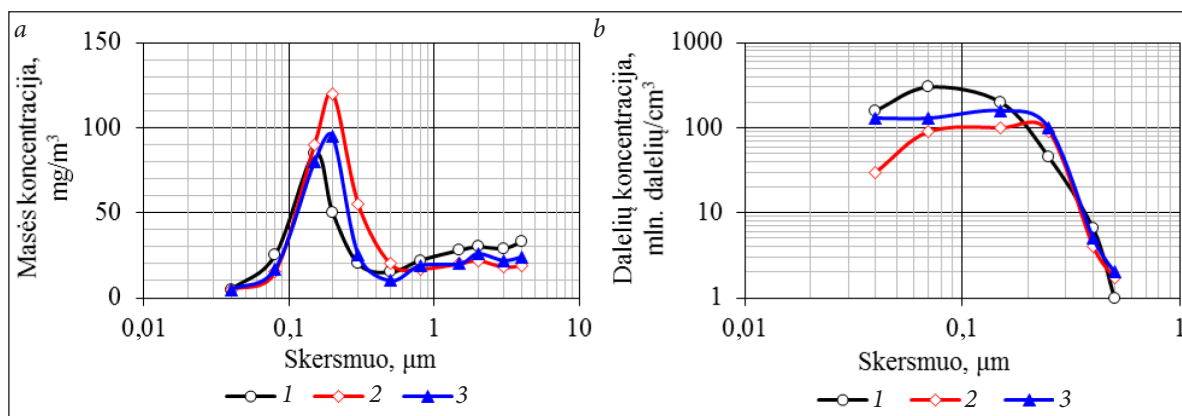
KD charakteristikos

Vienas iš susidarančių teršalų degimo produktuose deginant kietąjį biokurą yra KD, kurios apibūdinamos pagal jų dydį ir koncentraciją. Atsižvelgus į KD dydį, jos skirstomos į stambiausias >10 μm, smulkiąsias 0,1–2,5 μm ir labai smulkias <0,1 μm. KD₁₀ dalelės apima daleles <10 μm. KD dydis ir koncentracija lemia dalelių judėjimo atmosferoje trajektoriją, atstumą ir trukmę. Stambiosios dalelės ant žemės nusėda per kelias valandas, bet smulkiosios gali išlikti atmosferoje kelias savaites. Dažniausiai nurodomos leidžiamosios KD masės koncentracijos neįvertinant stambiųjų ir smulkiųjų dalelių dalies. Tačiau būtent smulkiosios dalelės turi santykinai didelį kontaktinį paviršiaus plotą, jos gali būti potencialūs toksinių medžiagų pernešėjai. Be to, jos gali prasiskverbti į žmogaus vidaus organus ir sukelti rimtų susirgimų.

Apibendrinta informacija, pagrįsta Švedijos mokslininkų tyrimais, nustatant KD masės koncentracijas ir jų dydžius kietuoju biokuru kūrenamų katilų, kurių galia nuo 1 iki 10 MW, dūmuose pateikta [2] darbe, iš kurio paaiškėja, kad mažesnės galios katilai privalomai aprūpinti multiciklonais, skirtais nusodinti stambiausias KD, o didesnės galios katilai papildomai aprūpinti elektrostatiniais nusodintuvais, skirtais smulkiosioms dalelėms nusodinti. Darbe taip pat parodyta, kad KD susidarymas priklauso nuo kuro ir pelenų sudėties, katilo tipo ir jo veikimo režimo. Išskiriami du KD tipai (modos). Smulkiųjų KD koncentracija pagal kiekį yra gausiausia ir jų masės koncentracijos didžiausią reikšmę lemia 0,1–0,5 μm dalelės. Didelis šių dalelių kiekis turi ženklų įtaką bendrajai KD masės koncentracijos reikšmei.

Deginant miško atliekas katile ant ardyno, KD masės koncentracija prieš multicikloną dažniausiai siekia 350 mg/Nm³ (sausos dujos, 13 % CO₂) ir yra didesnė nei deginant sausą medienos kurą. Kaip parodyta 1 pav., deginant sausą medienos kurą ant ardyno, už multiciklono išlieka dar ganėtinai didelė smulkiųjų KD nuo 0,1 iki 0,5 μm koncentracija, kuri, kintant katilo apkrovai, kinta 50–100 mg/Nm³ ribose.

0,1–0,5 μm dydžio KD masės koncentracija, esant mažoms apkrovoms, išauga (1a pav.),



1 pav. Katilo, kūrenamo sausomis medienos atliekomis, degimo produktuose už multiciklono esančių KD masės koncentracijos (a) ir jų kiekio (b) priklausomumas nuo dalelių dydžio ir katilo apkrovos [1]: 1, 2 ir 3 – atitinkamai didžiausia, mažiausia ir vardinė apkrovos

bet pagal kiekį 0,04–0,2 μm dydžio KD daugiausia nustatoma esant didžiausioms apkrovoms (1b pav.).

Kūrenant drėgnesniu kuru, pavyzdžiui, miško atliekomis, stebimas KD masės koncentracijos už multiciklono padidėjimas iki 150–175 mg/Nm^3 . Šiame tyrime daroma išvada, kad suminė KD masės koncentracija už multiciklono gali kisti 50–175 mg/Nm^3 ribose ir smulkiųjų KD iki 1 μm – 45–75 mg/Nm^3 .

Tai, kad KD emisijų koncentracija gali smarkiai kisti nuo daugelio veiksnių, susijusių ne tik su kuro rūšimi, bet ir su deginimo technologijos savitumais (pelenų susidarymo įrenginyje sparta, jų

kiekiu, degimo produktų srauto dydžiu per kuro sluoksnį ir jo sąveika su iš kuro sluoksnio išnešamais pelenais, nesudegusiu kuru ar suodžiais), patvirtina toliau pateikiami duomenys.

Mažos galios įrenginiuose, kūrenamuose biokuru, KD emisijas sudaro nevisiško degimo dalelės (suodžiai, besikondensuojančios organinės dalelės, apanglėjusios dalelės) ir pelenai (neorganiniai kuro elementai). Iš šių įrenginių pagrindinę emisijų dalį taip pat sudaro dalelės, kurių dydis gerokai mažesnis nei 1 μm .

1 lentelėje pateiktos įvairių biokurą deginančių įrenginių išmetamų didžiausios koncentracijos KD dydžių reikšmės pagal [3] rodo, kad didžiausią

1 lentelė. KD dydis esant didžiausiai koncentracijai, deginant biokurą įvairiuose įrenginiuose

Kuras (φ – drėgmė)	Įrenginio tipas	Didžiausios koncentracijos dalelių dydis μm
Malkos $\varphi = 15\text{--}18\%$	Viryklė	Įsidegimas 0,25; degimas 0,16; galutinė degimo fazė $\sim 0,05$
Medienos skiedros $\varphi = 45\text{--}70\%$	Katilas, kūrenamas medienos skiedromis	Vidutinis skersmuo 0,0686 ($\text{O}_2 = 6,2\%$) Vidutinis skersmuo $\sim 0,0957$ ($\text{O}_2 = 11,6\%$)
Malkos (buko)	Katilas, kūrenamas malkomis	0,070
Medienos skiedros $\varphi = 60\%$	Katilas, kūrenamas medienos skiedromis	0,087 (2,7% O_2); 0,08 (6,2% O_2); 0,085 (7,9% O_2); 0,06 (11,6% O_2)
Medienos skiedros	Sūkurinis degiklis	0,1
Malkos $\varphi = 20\%$	Katilas, kūrenamas malkomis	0,07–0,09
Medienos granulės	Katilas, kūrenamas medienos granulėmis	0,08
Malkos	Viryklė	Įsidegimas 0,25; degimas 0,16; galutinė degimo fazė 0,05
Medienos skiedros $\varphi = 40\%$	Automatinis katilas	0,07 (6% O_2); 0,072 (9,3% O_2); 0,065 (14% O_2)

koncentraciją sudaro smulkiosios dalelės, kurių dydis svyruoja nuo 0,06 iki 0,25 μm .

Atlikta nemažai kitų tyrimų [4–7], kurių rezultatai iš esmės patvirtina 1 lentelėje pateiktus rezultatus ir parodo, kad biokuru kūrenamų įrenginių emisijose KD vidutinis dydis yra gerokai mažesnis nei 1 μm . Siekiant susieti KD emisijas su šildymo įrenginio gaminama energija, dažnai KD kiekis išreiškiamas ne KD mase, tenkančia emisijų tūrio vienetui (mg/m^3), bet KD mase, tenkančia pagamintam šilumos energijos vienetui (mg/MJ). Toks KD emisijų pateikimas patogus siekiant palyginti skirtingais ar panašiais principais veikiančių šildymo įrenginių taršos rodiklius.

2 pav. ir 2 lentelėje pateikti medienos kuru kūrenamų krosnių KD emisijų statistiniai duomenys, surinkti įvairiose Europos šalyse [8].

Matyti, kad tarp didžiausių ir mažiausių KD emisijų verčių yra didelis skirtumas. Didžiausios KD_{10} emisijos $\sim 200\text{--}300 \text{ mg}/\text{MJ}$ stebimos šildymo įrenginiuose, kurie naudoja prastos kokybės kurą – medienos skiedras su dideliu kiekiu žemių priemaišų, ir kuriuose degimo procesas valdomas

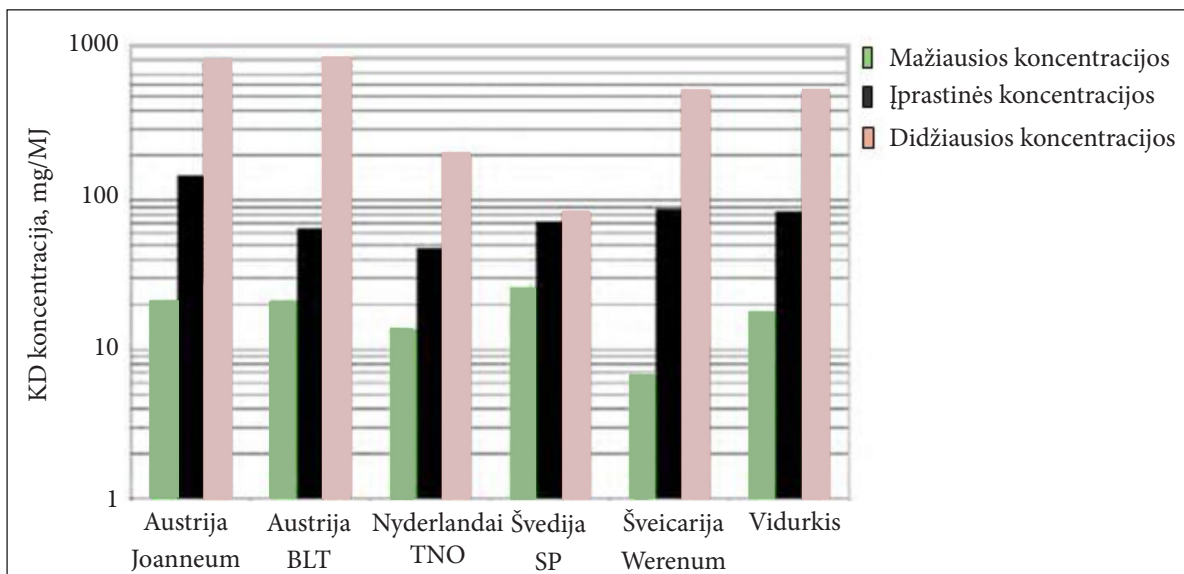
netobulai. Mažiausių KD_{10} emisijų vertė – $7 \text{ mg}/\text{MJ}$ stebima deginant aukštos kokybės kurą (be žievės ir be žemių priemaišų) šildymo įrenginiuose su tinkamu degimo proceso valdymu.

KD emisijos, mažesnės nei $70 \text{ mg}/\text{m}^3$, būdingos malkomis kūrenamiems katilams, veikiančioms dujų generavimo principu. Tačiau tiesioginio deginimo katilų KD emisijos gali siekti iki $300\text{--}540 \text{ mg}/\text{m}^3$ [7].

KD emisijų normos

KD emisijų koncentracijas riboja aplinkosauginiai reikalavimai. KD emisijų leidžiamosios koncentracijos biokuru kūrenamuose mažos ir vidutinės galios įrenginiuose Europos šalyse ir Kanadoje pateiktos 3 lentelėje pagal [9] duomenis.

Matyti, kad atskirose šalyse KD emisijų normos skiriasi net iki 15–20 kartų. Griežčiausios normos nustatytos Vokietijoje. Tobulėjant biokuru kūrenamiems įrenginiams bei dūmų dujų valymo įrangai, Europos šalyse numatomas šių normų griežtinimas.



2 pav. Atskirų Europos šalių medienos kuru kūrenamų krosnių KD emisijų duomenys [8]

2 lentelė. KD emisijų reikšmių vidurkiai [8]

Kategorija	KD_{10} emisijos, mg/Nm^3 (mg/MJ)	$\text{KD}_{2,5}$ emisijos, mg/Nm^3 (mg/MJ)
Įprastinės koncentracijos	122 (81)	75 (50)
Didžiausios koncentracijos	344 (229)	182 (121)
Mažiausios koncentracijos	11 (7)	9 (6)

3 lentelė. Įvairiose šalyse galiojančios KD emisijų leidžiamosios koncentracijos [9]

Šalis	Biokuru kūrenami įrenginiai	Leidžiamosios koncentracijos vertė	
		iki 2015	nuo 2015
Vokietija	Kambariniai šildytuvai ir krosnys 4–500 kW galios, negranuluota mediena	75 mg/Nm ³ (50 mg/MJ)	40 mg/Nm ³ (27 mg/MJ)
	Kambariniai šildytuvai ir krosnys 4–500 kW galios, granuluota mediena	30–50 mg/Nm ³ 20–33 mg/MJ	20–30 mg/Nm ³ 13–20 mg/MJ
Danija	Vietinis šildymas	75 mg/Nm ³ (50 mg/MJ)	
	Centrinis šildymas	110 mg/Nm ³ (73 mg/MJ)	
Kanada	Vietinis šildymas	206 mg/Nm ³ (137 mg/MJ)	
	Centrinis šildymas	600 mg/Nm ³ (400 mg/MJ)	
Austrija	Visi tipai (<300 kW)	90 mg/Nm ³ (60 mg/MJ)	
Airija	Visi tipai (<300 kW)	150 mg/Nm ³ (100 mg/MJ)	
Nyderlandai		Nenormuojama	
Švedija	Krosnys 3–5 kW galios, granuluota mediena	100 mg/Nm ³ (67 mg/MJ)	

Dūmų valymo įrangos efektyvumas

Praktikoje KD emisijoms mažinti naudojama įvairiais principais veikianti įranga: ciklonai, multiciklonai, elektrostatiniai nusodintuvai ir įvairūs filtrai. Vienas ar kitas dūmų valymo būdas parenkamas atsižvelgus į naudojamo biokuro kokybę, reglamentuojamą dūmų išvalymo kokybę, kaštus ir šildymo įrenginio veikimo ypatumus. Dūmų valymas nuo KD yra sudėtingas procesas, priklausantis nuo daugelio veiksnių, vis dėlto įvairių autorių tyrimo duomenys leidžia aiškiai suskirstyti taikomus metodus ir įrangą pagal efektyvumą į apibrėžtus lygmenis. Pavyzdžiui, iš 4 lentelėje pateiktų [10] apibendrintų duomenų matyti, kad tik elektrostatiniai nusodintuvai ir medžiaginiai filtrai leidžia pasiekti aukščiausių dūmų išvalymo laipsnį.

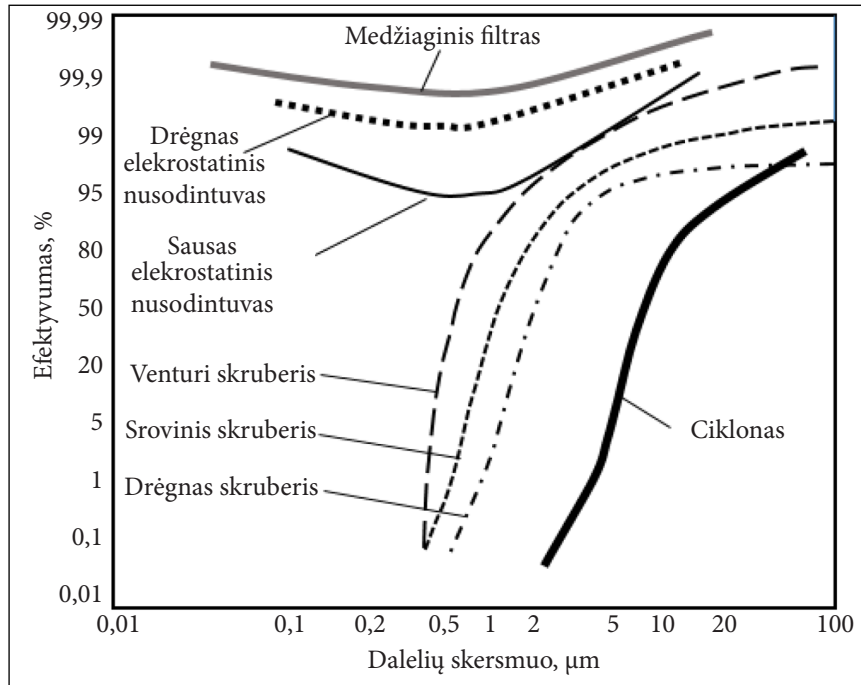
Analogiški, bet išsamesni rezultatai pateikiami [11] (3 pav.). Taip pat iš čia matyti, kad medžiaginis filtras užtikrina aukštesnį atskyrimo efektyvumą nei elektrostatinis nusodintuvas.

Elektrostatiniai nusodintuvai užtikrina KD₁₀ bei KD_{2,5} atskyrimą iki 99 % ir kiek daugiau. Apskritai pastarųjų dviejų tipų dūmų valymo įrangos efektyvumas mažiausiai priklauso nuo KD dydžio. Tai didelis jų privalumas ir pranašumas, palyginti su kitais valymo metodais. Tačiau bendrieji elektrostatinių nusodintuvų ir medžiaginių filtrų įrengimo ir eksploatacijos kaštai yra dideli, bet jų naudojimas, griežtėjant taršos ribojimams, vis labiau plečiasi, netgi į mažos galios šiluminių įrenginių veikimo sritį. Šiuo požiūriu labai svarbūs tyrimai atliekami Austrijoje, Vokietijoje ir kitose šalyse, dalis kurių vykdoma pagal jungtinius šalių projektus [9]. Šių darbų tikslas – sukurti dūmų iš biokuro kūrenamų mažos galios, įskaitant buitinius įrenginius, valymo įrangą, taikant tiek elektrostatinį, tiek ir kitus metodus.

Nagrinėjant aplinkos taršos mažinimą ir kartu įvertinant įrangos įrengimo ir eksploatacijos kaštus bei taršos šaltinių tipų ir galios įvairovę, būtina

4 lentelė. KD emisijų koncentracijos priklausomumas nuo biokuro rūšies ir dūmų valymo įrangos tipo [10]

Kuras	Naudojama įranga	KD ₁₀ emisija, mg/m ³	KD _{2,5} emisija, mg/m ³
Žievės ar / ir drėgna mediena	Nėra	341	293
Žievės ar / ir drėgna mediena	Ciklonas	218	129
Drėgna mediena	Nėra	197	170
Drėgna mediena	Ciklonas	137	81
Kietasis biokuras	Medžiaginis filtras	51	44
Kietasis biokuras	Elektrostatinis nusodintuvas	27	24

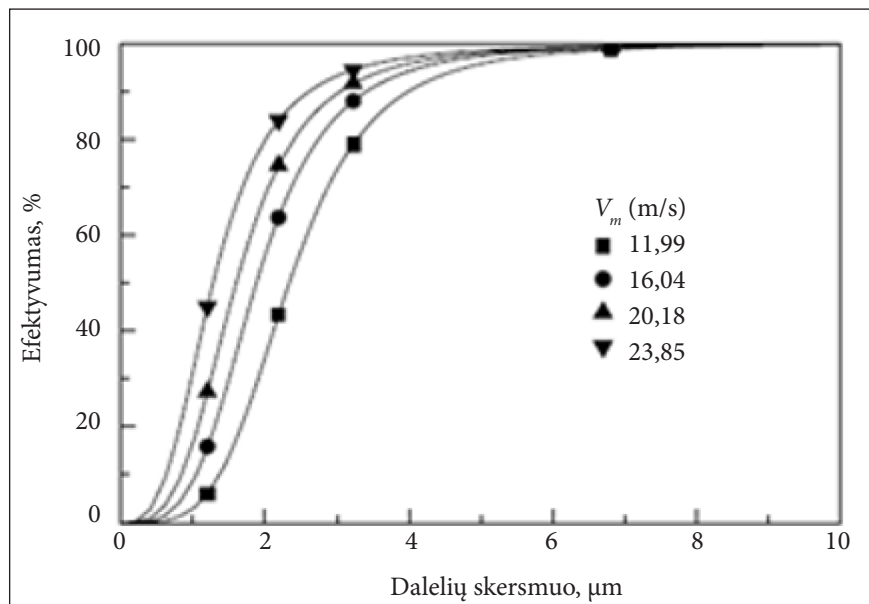


3 pav. Dūmų valymo įrangos efektyvumo priklausomumas nuo KD dydžio pagal [11]

taip pat tęsti mechaninių priemonių (ciklonų ir skruberių) konstrukcijų tobulinimo darbus, jų panaudojimą sąrankose su anksčiau nurodytais metodais. Kaip matyti iš 3 pav. pateiktų duomenų ir kitų tyrimų [11–14] rezultatų (4 pav.), ciklono efektyvumas gali siekti iki 95 % esant KD dydžiui $\geq 5 \mu\text{m}$, bet kai KD dydis $\leq 5\text{--}10 \mu\text{m}$, efektyvumas

smarkiai mažėja ir, palyginti su kitų tipų įrenginiais, yra mažiausias.

Ciklonai pašalina didelį kiekį (apie 90 %) KD_{10} ir didesnių, taip pat mažą kiekį (apie 10 %) $KD_{2.5}$ dalelių [10]. Viskas, kas pasakyta apie cikloną, iš esmės tinka ir multiciklonui, nors multiciklono efektyvumas yra kiek didesnis.



4 pav. Ciklono efektyvumo priklausomumas nuo KD dydžio pagal [12]

Pateikta trumpa darbų apžvalga vieningai patvirtina, kad deginant biokurą, KD emisijų pagrindinę dalį sudaro smulkiosios dalelės, kurių dydis gali būti gerokai mažesnis nei 1 μm . Didelį poveikį KD koncentracijai ir jų dydžiui daro kuro rūšis ir jo kokybė bei deginimo įrenginio tipas, jo galia ir veiksniai, susieti su degimo proceso vyksmu. Aki vaizdu, kad smulkiosioms KD atskirti iš dūmų nepakanka įprastinių ciklonų ir multiciklonų, būtina taikyti kitas priemones, pavyzdžiui, elektrostatinius nusodintuvus, įvairių tipų filtrus (medžiaginius ir keraminius) arba kitus metodus.

Dūmų iš buitinių mažos galios įrenginių, kūrenamų biokuru, valymas ypač keblus, nes šie įrenginiai ganėtinai skirtingos konstrukcijos, naudoja įvairios rūšies kurą, degimo procesas dažniausiai nėra tinkamai reguliuojamas, dūmai pašalinami į aplinką netoli įrenginio, dėl silpnos sklaidos smarkiai didina vietinį oro užterštumą smulkiosiomis kenksmingomis dalelėmis. Kaip rodo ES šalyse vykdomi darbai [8, 9], efektyvių ir mažų kaštų reikalaujančių šios problemos sprendinių siekiama taikant įvairius metodus, kuriuos būtina pradėti tirti ir jų taikymą plėtoti Lietuvoje.

TYRIMO REZULTATAI

Toliau pateikiami pradinių tyrimų rezultatai, siekiant įvertinti gaminamų ir tiekiamų rinkai Lie-

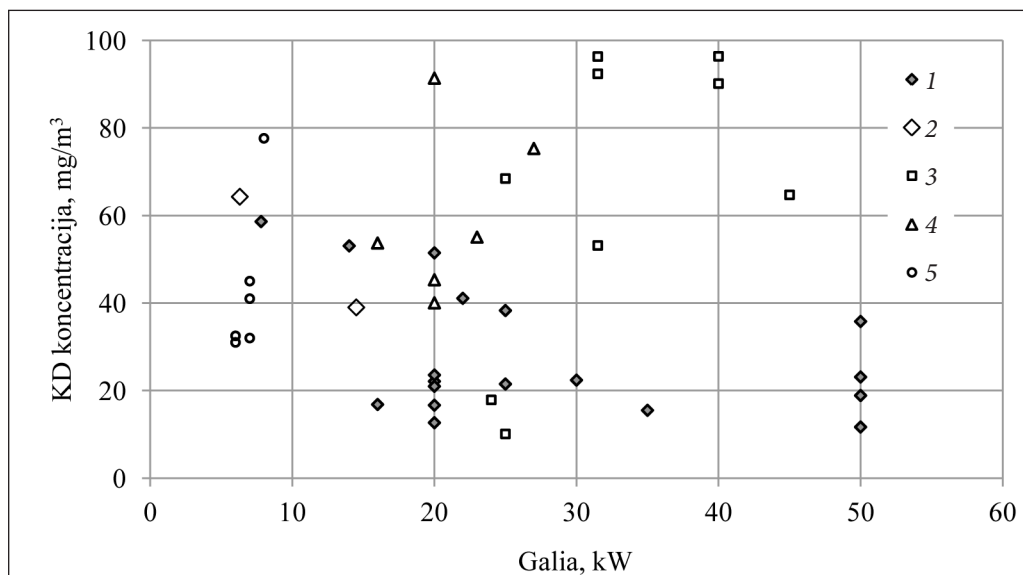
tuvoje mažos galios įrenginių, kūrenamų kietuoju biokuru, KD emisijų lygius ir juos palyginti su esamomis normomis bei įvertinti multiciklono taikymo vidutinės galios vandens šildymo katilui efektyvumą.

Lietuvoje gaminamų mažos galios įrenginių KD emisijos

Ištirtos Lietuvoje gaminamų mažos, nuo 6 iki 50 kW, galios biokuru kūrenamų šildymo įrenginių, neturinčių dūmų valymo įrangos, KD emisijų masės koncentracijos. Šiuos įrenginius sudarė vandens šildymo katilai, kūrenami medienos granulėmis (19 vnt.), malkine mediena (16 vnt.), iš kurių devyni dujų generacinio tipo katilai ir septyni įprastiniai katilai bei septynios malkomis kūrenamos krosnelės.

Visų tiriamųjų įrenginių KD emisijų masės koncentracijos matuotos automatinio izokinetiniu KD rinktuvu Isostac Basic HV, taikant standartizuotą metodą [15], įrenginiams veikiant vardine galia šiluminių įrenginių tyrimo įrenginyje, kurio išsamus aprašymas pateiktas [16]. Du granulėmis kūrenami 30 ir 50 kW galios katilai buvo taip pat tiriami esant jų daliai, atitinkamai 6,3 ir 14,5 kW, galiai. KD masės koncentracijos matavimo izokinetiniu rinktuvu išplėstinė neapibrėžtis siekė 4,2 %.

5 pav. pateikti šių įrenginių KD emisijų tyrimo rezultatai, esant 10 % O_2 kiekiui dūmuose.



5 pav. Lietuvoje gaminamų mažos galios biokuru kūrenamų šildymo įrenginių vidutinės KD emisijų masės koncentracijos: 1 – medienos granulėmis kūrenami katilai; 2 – kaip ir (1), tik sumažinus katilų apkrovą; 3 – malkomis kūrenami (dujų generaciniai) katilai; 4 – malkomis kūrenami katilai; 5 – malkomis kūrenamos krosnelės

Šie duomenys rodo, kad mažiausias KD emisijas išskiria šildymo įrenginiai, naudojančys specialiai paruoštą granuliuotą kurą bei turintys valdiklius, gebančius lanksčiai valdyti kuro ir oro tiekimą (5 pav., 1 taškas). Iš devyniolikos tirtų tokių katilų, esant vardinei galiai tik vieno jų, KD emisijos siekė 175 mg/m^3 , keturiolikos jų (~74 %) KD emisijos buvo $<40 \text{ mg/m}^3$ ir atitiko reikalavimus, keliamus 5 klasės katilams [17]; keturių jų (~21 %) emisijos buvo $<60 \text{ mg/m}^3$ ir tenkino 4 klasės reikalavimus. Tačiau nustatytas KD emisijų didėjimas mažėjant katilų apkrovoms. Taip iš 5 pav. (2 taškai) matyti, kad esant 30 ir 50 kW vardinei katilų galiai, emisijos atitinkamai nuo 22,4 ir 23,1 mg/m^3 padidėjo iki 64,3 ir 39,0 mg/m^3 , jų galią sumažinus iki 6,3 ir 14,5 kW.

Malkomis kūrenamų vandens šildymo katilų, neatsižvelgiant į jų tipą, KD emisijų masės koncentracijos kito nuo 20 iki 90 mg/m^3 ir dauguma jų tenkino 4–5 klasės reikalavimus. Malkomis kūrenamoms krosnelėms dėl mažiau intensyvaus degimo, tinkamai suregulius įsidegimą ir pirminio bei antrinio oro degimui tiekimą, pasiekiamas KD emisijų lygis 30–45 mg/m^3 . Reikia atkreipti dėmesį į tai, kad vienos krosnelės ir po vieną malkomis ir granulėmis kūrenamų katilų KD emisijos siekė 140–175 mg/m^3 , ir šie rezultatai 5 pav. nepateikti.

Apibendrinus gautus tyrimo rezultatus galima teigti, kad daugumos gaminamų mažos galios šildymo įrenginių KD emisijų masės koncentracijos tenkina dabar galiojančias normas. Tačiau kūrenant malkomis stebima gerokai didesnė KD emisijų masės koncentracijų sklaida, nei kūrenant paruoštu granuliuotu kuru ir taikant automatinio valdymo priemones kurui ir orui į degimo kamerą tiekti. Kadangi reikalavimai aplinkos taršai mažinti nuolat griežtėja, nenutrūkstamas dėmesys turi būti toliau skiriamas šildymo įrenginių konstrukcijoms tobulinti ir kurui iš anksto tinkamai paruošti, siekiant kuo efektyviau sudeginti įrenginyje kurą ir sumažinti aplinką teršiančias emisijas. Jau dabar aiškėja, kad negalima išsiversti be priemonių dūmams valyti, skirtų mažos galios įrenginiams, kūrenamiems kietuoju kuru, o pastaruojų metu ypač intensyviai populiarėjančiu kietuoju biokuru.

Tai susiję ir su vidutinės galios vandens šildymo katilais, kuriuose įprastiniai ciklonai ar multiciklonai vis dažniau įrengiami kartu su elektrosstatiniais KD nusodintuvais arba medžiagininiais filtrais. Platus KD dydžių spektras, apimantis

mažesnių kaip 0,5–1,0 μm dalelių intervalą, verčia, kaip matyti iš tyrimų apžvalgos ir toliau pateikiamų vidutinės galios vandens šildymo katilo KD emisijų tyrimo rezultatų, plėtoti įvairių priemonių arba jų sandaros taikymą, atsižvelgus į biokuro panaudojimo sąlygas ir KD emisijų ypatumus.

Multiciklono efektyvumo tyrimas

Plėtojant mažos galios šiluminių įrenginių, kūrenamų biokuru, KD taršos mažinimo tyrimus, eksploatacijos sąlygomis buvo tirtas vidutinės (500 kW) galios vandens šildymo katilo KD emisijų spektras ir įvertintas 6 elementų multiciklono, skirto KD emisijoms mažinti, efektyvumas. Tokia priemonė dūmų dujoms valyti taikoma labai dažnai dėl jos paprastumo, turimos praktinės patirties, žinių apie jos efektyvumą didelės ir vidutinės galios įrenginiuose, pritaikytuose iškastiniam kurui. Įrenginiams, kūrenamiems biokuru, išskyla išsamesnių tyrimų poreikis, atsižvelgus į esminius KD emisijų spektrinės sudėties pokyčius ir jų didesnę jautrį įrenginių tipui, galiai, veikimo režimams ir kuro sudėties nepastovumui.

Tyrimai atlikti katilui veikiant vardine galia ir deginant medžio skiedras ant ardyno. KD masės koncentracijos matuotos dūmtakio tiesiuose ruožuose ~2 m atstumu prieš multicikloną ir po jo. KD masės koncentracijos matuotos automatinio izokinetiniu KD rinktuvu Isostac Basic HV, kaip ir tiriant mažos galios įrenginių KD emisijas, vadovautasi reikalavimais, pateiktais [15] (žr. skyrių *Lietuvoje gaminamų mažos galios įrenginių KD emisijos*). KD pasiskirstymas pagal dydį buvo matuojamas KD spektrometru Promo 3000 H su dalelių jutikliais Welas 2100 ir 2500 HP, kurių matavimo ribos 0,2–40 ir 0,7–105 μm bei didžiausia dalelių koncentracija atitinkamai $5 \cdot 10^5$ ir $4 \cdot 10^3 \text{ N/cm}^3$ (čia N – dalelių kiekis vnt.). Spektrometro veikimo principas pagrįstas dalelės, judančios optiškai apibrėžtame ir apšviestame baltąja šviesa matavimo tūryje, išbarstytos šviesos analize. Dalelių kiekis nustatomas pagal išbarstytos šviesos impulsų dažnį, dalelių dydis – pagal impulsų amplitudę. Mėginiai buvo paimami KD rinktuvu iš dūmtakio prieš multicikloną ir po jo tuose pat taškuose, kuriuose buvo matuojama dalelių masės koncentracija. Multiciklone sulaikytų dalelių mėginiai buvo imami tiesiogiai iš multiciklono kameros. Laboratorijoje mėginiai patalpinti į specialų indą, kurį kratant arba filtrą su

dalelėmis apipučiant oro srove buvo sudaromas dalelių rūkas, kuris siurbiamas nustatytu debitu per jutiklio kamerą.

Multiciklono efektyvumas įvertinamas pagal KD rinktuvu surinktų dalelių prieš multicikloną ir po jo svorių skirtumą. Matavimo ir skaičiavimo rezultatai pateikti 5 lentelėje. Apskaičiuojant KD masės koncentracijas buvo įvertinti dūmų temperatūros ir slėgio skirtumai prieš multicikloną ir po jo.

Kaip matyti iš šios lentelės, multiciklono efektyvumo rezultatų vidurkis sudarė 38,2 %. Palyginus su duomenimis, pateiktais 3 pav., ši efektyvumo reikšmė neblogai koreliuoja su ciklonų efektyvumu, atsižvelgus į dūmuose esančių ir multiciklone sulaikytų KD spektrus. 6 pav. pateikti rezultatai rodo, kad multiciklone sulaikytų dalelių dydis kinta nuo 1 iki 10 μm , bet daugiausia sulaikyta dalelių, kurių dydis nuo 2 iki 5 μm .

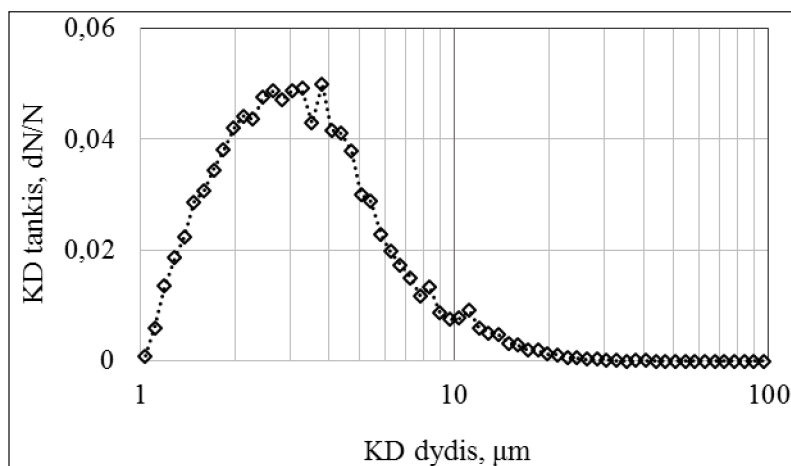
Šis rezultatas gerai koreliuoja su mėginių, paimtų prieš multicikloną ir po jo, analizės rezultatais, pateiktais 7 pav. Matyti, kad katilo, kūrenamo me-

dienos skiedromis, dūmuose didžiausias KD tankis pagal dalelių dydį yra intervalo 0,2–0,5 μm viduryje. Taip pat aiškiai matoma, kad dūmuose yra KD, kurių dydis didesnis nei 1 μm , ir intervale nuo 2 iki 6 μm yra antras lėkštas pikas, bet gerokai mažesnis nei 0,2–0,5 μm intervale. Toliau didėjant KD dydžiui, jų tankis smarkiai mažėja. Po multiciklono KD didžiausias tankis stebimas tame pačiame intervale kaip prieš multicikloną, bet jo pikas yra sumažėjęs ir nebėra antrojo aiškaus piko spektre, kai dalelių dydis didesnis nei 1 μm .

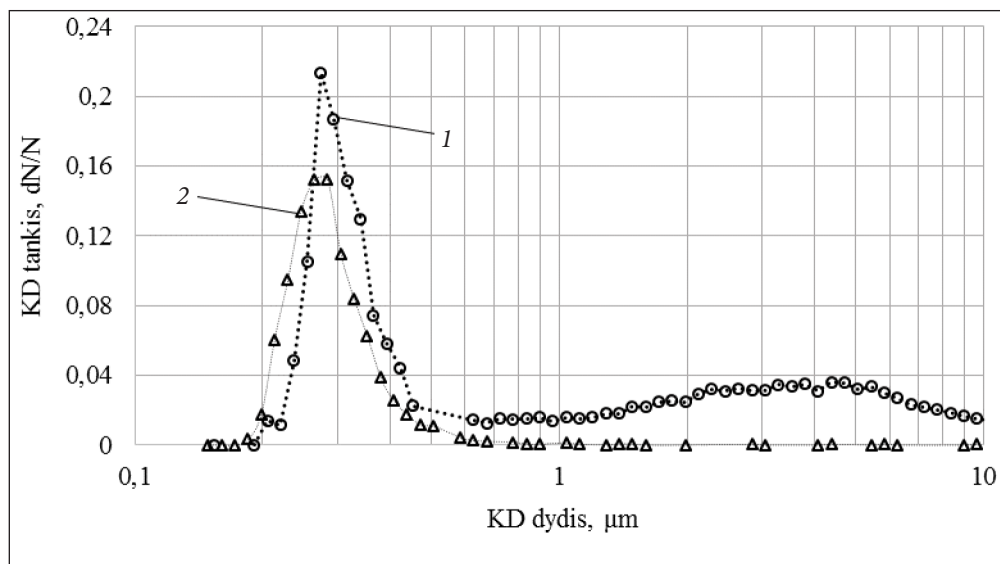
Iš šių rezultatų darytina išvada, kad katilo, kūrenamo medienos skiedromis, KD emisijose daugiausia yra smulkiųjų 0,2–0,5 μm dydžio dalelių. Multiciklone sulaikoma daugiausia dalelių, kurių dydis yra 1–10 μm intervale. Kartu su stambiosiomis dalelėmis sulaikoma nedidelė dalis smulkiųjų dalelių (7 pav.). Toks KD spektras leidžia daryti prielaidą, kad smulkiosios dalelės turi didelę įtaką masės koncentracijos reikšmėms, pagal kurias nustatomas multiciklono efektyvumas.

5 lentelė. Multiciklono efektyvumo tyrimo rezultatai

Matavimo vieta	Bandinių svoriai bruto, g		Svorių skirtumas, g	Dujų mėginio tūris, m ³	Dujų debitas, m ³ /h	KD masės koncentracija, mg/Nm ³	Ciklono efektyvumas, %
	Prieš bandymą	Po bandymo					
Prieš multicikloną	16,39669	16,45614	0,05945	0,3148	1608	158,78	38,2
	15,55603	15,61274	0,05671	0,2865	1451	166,43	
	14,71991	14,76703	0,04712	0,2852	1467	138,91	
Po multiciklono	16,12115	16,15699	0,03584	0,2858	1502	105,44	
	14,67184	14,70461	0,03277	0,2990	1534	92,15	
	14,77444	14,80545	0,03101	0,2927	1512	89,08	



6 pav. Multiciklone sulaikytų KD kiekio (tankio) pasiskirstymas pagal dalelių dydį



7 pav. KD kiekio (tankio) pasiskirstymas pagal jų dydį: 1 – prieš multicykloną; 2 – po multicyklono

Jei multicyklonas nesulaiko smulkiųjų dalelių, jo efektyvumas negali būti labai aukštas.

Palyginus su apžvalgoje pateiktais darbų [10–13] rezultatais ir 3, 4 pav. duomenimis, nustatytas multicyklono efektyvumas patenkinamai koreliuoja su ciklonams ir multicyklonams būdingomis efektyvumo reikšmėmis. Galima netgi išvelgti multicyklono gebėjimą efektyviau nei ciklonas sulaikyti smulkesnes daleles, bet tam patvirtinti reikia išsamesnių tyrimų. Vis dėlto yra pakankamai duomenų, leidžiančių tvirtinti, kad praktinės ciklono ir multicyklono taikymo galimybės KD emisijoms mažinti iš įrenginių, kūrenamų biokuru, yra ribotos dėl labai didelio kiekio smulkiųjų dalelių, ir negalima apsieiti be papildomų ar kito tipo priemonių, kurios gebėtų dūmus nuo šių dalelių valyti. Būtent todėl didesnės galios įrenginiams taikomas dviejų pakopų valymas, kai antroje pakopoje įrengiami elektrostatiniai KD nusodintuvai arba įvairios rūšies filtrai. Kadangi biokuro naudojimas mažos galios buitiniuose įrenginiuose plečiasi, analogiškus uždavinius būtina spręsti ir šioje srityje, įvertinus visus jos savitumus.

IŠVADOS

1. Eksperimentiškai ištyrus Lietuvoje gaminamų mažos nuo 6 iki 50 kW galios biokuro kūrenamų šildymo įrenginių, neturinčių dūmų valymo įrangos, KD emisijų masės koncentracijas, nustatyta, kad granuliuotu kuru kūrenamų vandens šildymo

katilų KD emisijos yra mažiausios. Iš devyniolikos tirtų tokių katilų, esant vardinei galiai, 74 % jų KD emisijos buvo $<40 \text{ mg/m}^3$ ir atitiko reikalavimus, keliamus 5 klasės katilams; 21 % jų KD emisijos buvo $<60 \text{ mg/m}^3$ ir tenkino 4 klasės reikalavimus. Mažinant katilų apkrovas, KD emisijos gerokai didėja.

Malkomis kūrenamų katilų, neatsižvelgiant į jų tipą, KD emisijų masės koncentracijos kito nuo 20 iki 90 mg/m^3 ir dauguma jų tenkino 4–5 klasės reikalavimus. Malkomis kūrenamoms krosnelėms dėl mažiau intensyvaus degimo, tinkamai suregulavus įsidegimą ir pirminio bei antrinio oro degimui tiekimą, pasiekiamas KD emisijų lygis $30\text{--}45 \text{ mg/m}^3$.

2. Medienos skiedromis kūrenamo vidutinės (500 kW) galios vandens šildymo katilo dūmuose esančių KD dydžio ir tankio bei už katilo įrengto 6 elementų multicyklono veikimo efektyvumo tyrimais nustatyta, kad KD emisijose yra daugiausia $0,2\text{--}0,3 \mu\text{m}$ dydžio dalelių, kurios lemia ir KD masės koncentracijos reikšmes. Multicyklone sulaikomos dalelių kiekis didžiausias $2\text{--}5 \mu\text{m}$ intervale. Nors multicyklone iš dalies taip pat sulaikomos smulkiosios dalelės, bet siekiant užtikrinti mažas KD emisijas iš įrenginių, kūrenamų biokuru, svarbu naudoti papildomą įrangą, kuri leidžia sumažinti smulkiųjų KD kiekį.

3. Eksperimentiniai rezultatai gerai koreliuoja su atliktos trumpos, kietuoju biokuru kūrenamų įrenginių KD emisijų charakteristikų ir jų mažinimo metodų, apžvalgos rezultatais. Patvirtinamas

būtinumas naudojant tokį kurą taikyti metodus ir įrangą, užtikrinančius KD smulkesnių nei 1 µm sulaikymą. Elektrostatiniai KD nusodintuvai ir medžiaginiai arba keraminiai filtrai leidžia pasiekti geriausių rezultatų ir jų taikymo tyrimai sparčiai plėtojami.

Gauta 2015 10 01

Priimta 2015 11 25

Literatūra

1. *Kuro ir energijos balansas 2014*. Lietuvos statistikos departamentas, 2015. P. 1–54.
2. Lillieblad L., Strand M., Porle K. Conditions for electrostatic precipitators after biomass fired boilers. *Papers of IX International Conference on Electrostatic Precipitation (ICESP IX), May 17–21, 2004, Mpumalanga, South Africa*.
3. Johansson L. *Characterisation of Particle Emissions from Small-scale Biomass Combustion*. Thesis for the Degree of Licentiate of Engineering. Chalmers University of Technology, Goteborg Sweden, 2002.
4. Jenkins B. M., Baxter L. L., Miles Jr. T. R., Miles T. R. Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology*. 1998. Vol. 54. P. 17–46.
5. Szpila A., Pagels J., Strand M., Lillieblad L., Gudmundsson A., Risler J., Swietlicki E., Bohgard M., Sanati M. Experimental studies on particle emissions from grate fired biomass combustion Boilers. *Proceedings from the 12th European Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy Industry and Climate Protection*, June 17–21, 2002, Amsterdam, the Netherlands.
6. Lind T. *Ash Formation in Circulating Fluidised Bed Combustion of Coal and Solid Biomass*. PhD Thesis, Espoo, Finland, VTT Publication No. 378. 1999.
7. Bauchemin P. A., Tampier M. *Emissions from Wood-Fired Combustion Equipment*. Report for British Columbia Ministry of Environment. Envirochem Services Inc., North Vancouver B. C., June 30, 2008.
8. Nussbaumer T., Klippel N., Johansson L. Survey on measurements and emission factors on particulate matter from biomass combustion in IEA countries. *16th European Biomass Conference and Exhibition, 2–6 June 2008, Valencia, Spain – Oral Presentation OA 9.2*.
9. Obernberger I., Mandl C. *Survey on the Present State of Particle Precipitation Devices for Residential Biomass Combustion with a Nominal Capacity up to 50 kW in IEA Bioenergy Task32 Member Countries*. IEA Bioenergy TASK32 report, Final version. Institute for Process and Particle Engineering, Graz University of Technology, Austria 2011.
10. Hinckley J., Doshi K. *Emission Controls for Small Wood Fired Boilers*. Report for United States Forest Service, Western Forestry Leadership Coalition. Resource Systems Group, Inc. 55 Railroad Row, White River Junction; Biomass Energy Resource Center, 43 State Street, Montpelier, USA, May 2010.
11. Hamilton S., Fleming S., Stewart R. *The Assessment of Flue Gas Particulate Abatement in Wood Burning Boilers*. Report for Forestry Commission Scotland Restricted Commercial ED56285 Issue Number 3. December 2010.
12. Zhao Bing-Tao. Effects of flow parameters and inlet geometry on cyclone efficiency. *The Chinese Journal of Process Engineering*. 2006. Vol. 6. No. 2. P. 178–180.
13. Peng W., Alex C. Hoffmann, Dries H. Separation characteristics of swirl-tube dust separators *AIChE Journal*. 2004. Vol. 50. No. 1. P. 87–96.
14. Faulkner W. B., Buser M. D., Whitelock D. P., Shaw B. W. Effects of cyclone diameter on performance of 1D3D cyclones: collection efficiency. *Journal of American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE)*. 2007. Vol. 50. No. 3. P. 1053–1059.
14. Stacionariųjų šaltinių išmetamieji teršalai. Mažos masės dulkių koncentracijos nustatymas. 1 dalis. Rankinis gravimetrinis metodas. Standartas LST EN 13284-1:2006.
15. Vonžodas T., Pedišius N., Valantinavičius M. Mažos galios biokuru kūrenamų vandens šildymo katilų veikimo parametrų tyrimas. *Energetika*. 2013. T. 59. Nr. 2. P. 93–103.
16. Šildymo katilai. 5 dalis. Rankomis ir automatiškai pakraunami kietojo kuro šildymo katilai, kurių šiluminė galia iki 500 kW. Terminija, reikalavimai, bandymai ir ženklavimas. Standartas LST EN 303-5:2012.

Jurij Tonkonogij, Nerijus Pedišius,
Arūnas Stankevičius, Andrius Tonkonogovas

**INVESTIGATION OF PARTICULATE
MATTER EMISSION FROM LOW- AND
MIDDLE-CAPACITY BOILERS FIRED WITH
SOLID BIOFUEL**

Summary

Mass concentration of particulate matter (PM) emission from heating appliances of low capacity from 6 to 50 kW fired by solid biofuel that are manufactured in Lithuania and do not have fume gas cleaning systems was experimentally investigated. It was assessed that PM emissions of hot water boilers fired with pelletized fuel were the lowest. PM emissions from 74% of nineteen investigated boilers at rated output were $<40 \text{ mg/m}^3$ and met the requirements for Class 5 boilers; PM emissions from 21% of them were $<60 \text{ mg/m}^3$ and satisfied the requirements of Class 4. Mass concentrations of PM emissions from boilers fired with logs, regardless of their type, ranged from 20 to 90 mg/m^3 and most satisfied Class (4–5). PM emissions level from logs-fired ovens due to less intensive combustion and at the proper adjustments of ignition phase and the primary and secondary combustion air supply ranged within $(30\text{--}45) \text{ mg/m}^3$.

Investigation of PM size and density in flue gases of 500 kW water heating boiler fired with wood chips was carried out. Operation efficiency of a 6-battery multicyclone mounted downstream boiler and density distribution of PM up to the multicyclone and down it by size were investigated. It was found that the particle emissions were mainly (from 0.2 to 0.3) μm . The largest quantity of particles seized in the multicyclone was in $(2\text{--}5) \mu\text{m}$ range. Although the multicyclone also partly seized small particles, but in order to ensure low PM emissions from installations fired with biofuels, it is important to use additional measures that allow reducing the amount of fine PM. Experimental results correlate well with results of a brief survey of PM emission characteristics and their cleaning methods from installations fired with solid biofuel. Using such fuel, the necessity is confirmed to apply such methods, installations that ensure detention of PM smaller than $1 \mu\text{m}$. Electrostatic precipitators and fabric or ceramic filters provide the best results, and investigations of their application in practice are fast-developing.

Key words: particulate matter emission, biomass, boiler, cyclone efficiency