

Biokuro savybių ir juo kūrenamų mažos bei vidutinės galios įrenginių efektyvumo ir taršos parametrų tyrimai

Nerijus Pedišius,

Marius Praspaliauskas,

Mantas Valantinavičius,

Tomas Vonžodas,

Vladas Zaleskas,

Egidijus Lemanas,

Deimantė Čepauskienė

*Lietuvos energetikos institutas,
Šiluminių įrengimų tyrimo
ir bandymų laboratorija,
Breslaujos g. 3, LT-44403 Kaunas
El. paštas Nerijus.Pedisius@lei.lt*

Atlikti mažos galios šildymo katilų, kūrenamų biokuro, efektyvumo ir išmetamų emisijų tyrimai. Tyrimai vykdyti keliais etapais: pirmajame etape buvo eksperimentiškai tiriamos šiuo metu plačiausiai naudojamo biokuro, pagaminto iš biomasės, ir potencialiai perspektyvaus biokuro, pagaminto iš agromasės, savybės siekiant nustatyti, kaip toks kuras turi būti paruošiamas, kad efektyviai sudegtų šildymo įrenginiuose; antrajame etape atlikti oro / degių produktų maišymosi įvairios konstrukcijos šildymo katilų degimo kameroje ir oro / degimo produktų kanaluose skaitiniai, eksperimentiniai tyrimai siekiant užtikrinti tinkamą degimo produktų buvimo laiką karštojoje zonoje ir jų temperatūrą. Šiame darbe taip pat pateikiami kietųjų dalelių (KD) koncentracijos pasiskirstymo degimo produktuose priklausomai nuo jų dydžio tyrimo rezultatai ir KD koncentracijos mažinimo metodų analizė.

Raktažodžiai: biokuro savybės, pelenų sudėtis ir lydumas, vandens šildymo katilai, efektyvumas, emisijos, kietosios dalelės

IVADAS

Šiuo metu kietasis biokuras tapo itin populiarus, plačiai naudojamas mažos ir vidutinės galios šildymo įrenginiuose namų ūkio ir kitos paskirties objektuose. Nors biokuras daugiausia gaminamas iš medienos biomasės, nuo seno naudojamas namų ūkiuose šildymui ir maisto ruošai, tačiau per pastaruosius du dešimtmečius įvyko pokyčių, nulėmusių šio kuro naudojimo spartų augimą šilumai gaminti vidutinės galios energetiniuose įrenginiuose. Tai susiję su globaliais siekiais mažinti iškastinio kuro naudojimą, o kartu anglies dvideginio (CO₂) ir kitų šiltnamio efektą sukeliančių dujų koncentracijas atmosferoje. Pagrindinis būdas, leidžiantis pasiekti šiuos tikslus, – at-

sinaujančių energijos išteklių naudojimo ir energiją tausojančių technologijų diegimo plėtra.

Nuo 1996 iki 2014 m. biokuro naudojimas šilumai ir elektrai gaminti išaugo dvigubai – nuo 505 iki 1 085 k.t.n.e [1]. 2014 m. duomenimis, namų ūkiuose buvo naudojama apie 47 % bendrojo medienos kuro kiekio, o centralizuoto šildymo katilinėse ir kogeneracinėse elektrinėse atitinkamai 41 %. Likę kiekiai šildymui ir technologiniams procesams vykdyti buvo sunaudoti pramonės, paslaugų ir žemės ūkio sektoriuose. Spartus biokuro poreikio augimas yra susijęs su vis intensyvesniu jo naudojimu ne tik naujai įrengtose šildymo sistemose, bet ir mažiau efektyviose senose šildymo sistemose, kurių taršos parametrai gerokai didesni. Lietuvoje apie 90 % namų ūkių turi techniškai

pasenusias šildymo sistemas, kurios, palyginti su naujosiomis sistemomis, daugiau teršia aplinką CO, organiniais junginiais, kietosiomis dalelėmis ir policikliniais aromatiniais angliavandeniliais. Visi šie teršalai sukelia nemažą foninį gyvenamųjų rajonų, apšildomų biokuru, užterštumą, ypač šildymo sezono metu, o užterštumas kietosiomis dalelėmis, kurių skersmuo <10 μm, dažnai viršija leidžiamas koncentracijas.

Šioms problemoms spręsti buvo krepiama nepakankamai dėmesio, nes formuota nuomonė, kad biokuro panaudojimas energijai gaminti teikia tik privalumus – leidžia mažinti CO₂ taršą ir importuojamo iškastinio kuro naudojimą. Visiškai aišku, kad biokuro efektyvus panaudojimas mažos ir vidutinės galios įrenginiuose šilumos energijai gaminti reikalauja daugiau dėmesio skirti išsamiems įvairių rūšių kietojo biokuro ir jo mišinių parametrų, taip pat degimo proceso atskirų stadijų tyrimams, tiekiamam degimui oro maišymosi su degimo produktais procesu ir degimo kamerų konstrukcijoms optimizuoti, degimo produktų efektyviam valymui nuo kenksmingų dujinių degimo produktų ir kietųjų dalelių.

Sprendžiant šiuos uždavinius reikėtų vadovautis Austrijos, Vokietijos, Švedijos, Suomijos ir Danijos gerąja patirtimi. Šiose šalyse jau kelis dešimtmečius skiriama daug dėmesio biomasės terminio skaidymo sistemų technologinei pažangai, pasiekta svarbių rezultatų, ypač taršos mažinimo srityje. Pagrindinis šiose šalyse atliekamų mokslo tyrimų tikslas – sukurti mažos taršos, vadinamosios „nulinės taršos“, biomasės terminio skaidymo sistemas panaudojant įvairius technologinius sprendinius. Tobulinant šias technologijas daugiausia dėmesio sutelkiama į [2–5]:

- naujų biokuro rūšių ir mišinių tyrimus, tinkamą jų pritaikymą įrenginiuose;
 - biomasės deginimo technologijų tyrimus įvairios galios jėgainėse;
 - naujų inovatyvių sistemų, veikiančių kombinuotu ciklu, kūrimą ir tobulinimą;
 - priemonių degimo produktams valdyti kūrimą ir tobulinimą;
 - biomasės dujinimo ir pirolizės technologijų tyrimus;
 - šiluminio skaidymo procesų ir įrenginių automatinio valdymo sistemų tobulinimą ir diegimą.
- Būtina pabrėžti, kad, nors sparčiai plėtojamos naujos biomasės panaudojimo energijai gaminti

technologijos, tiesioginis biokuro deginimas dar ilgai išliks pagrindiniu būdu šilumai ir net elektros energijai gaminti mažos ir vidutinės galios įrenginiuose.

Nagrinėjant esamą tyrimų būklę ir praktinius rezultatus galima daryti išvadą, kad medienos kuro paruošimas ir deginimas jau nebesukelia sunkiai sprendžiamų problemų. Tokio kuro sudėtis ir savybės pasižymi pastovumu, yra gana plačiai išnagrinėtos. Deginant paruoštą medienos kurą (granules ir briketus) vandens šildymo katilų iki 300 kW galios naudingumo koeficientas priartėja prie 90 %, t. y. iki efektyvumo lygmenis reglamentuojamo standartais ir teisiniais aktais [6, 7]. Tačiau dar išlieka tiek įrenginių konstrukcinių elementų ir tinkamo oro tiekimo į degimo zoną tobulinimo darbai siekiant kuo efektyviau visiškai sudeginti kurą ir lakiąsias medžiagas, tiek įdiegimas techninių ir teisinių priemonių kietųjų dalelių emisijoms į aplinką mažinti [8–11].

Sudėtingesnė situacija, kai vietoj medienos vis dažniau pasirenkamas biokuras, pagamintas iš agromasės, kurią sudaro trumpos rotacijos sumedėję ir žoliniai augalai, žemės ūkio derliaus nuėmimo ir perdirbimo atliekos (šiaudai, išvalos ir išspaudos) bei kai kurie nekondicininiai produktai (grūdai, sėklos). Šios agromasės naudojimo šilumai gaminti sudėtingumą lemia daugybė veiksnių:

- agromasė pasižymi didesniu mineralinių medžiagų kiekiu, dėl kurio, kurui sudegus, lieka daug pelenų, jų sudėtis kelia gausybę praktinių problemų [12–14];
- dėl didesnio kiekio šarminių elementų agromasėje pasireiškia ankstyvesnis pelenų lydumas ir padidintas skystosios ir dujinės junginių fazijų formavimasis, jų visuminis efektas – pelenų ant ardyno lydymasis / sukepimas, nuosėdų ant karštų kūryklos ir dūmų dujų trakto šaltesnių paviršių susidarymas [15, 16]. Šiuos reiškinis dažnai apibūdinama vienu terminu – šlakavimasis, bet iš tikrųjų tai skirtingi procesai, kurių priežastis glūdi agromasės cheminių junginių sudėtyje. Šlakavimuisi daugiausia įtakos turi Ca, K, Si, Mg, Na, Al junginiai. Vieni jų, kaip K, Na ir Mg junginiai, mažina pelenų lydymo temperatūras, o Si, Al, Ca – didina. Silicio oksidas kartu su kalio ir natrio oksidais yra pagrindiniai aglomeracijos ir katilo „užsiteršimo“ sukėlėjai.

Pelenų formavimosi ir jų šlakavimosi mechaniz-
mams pastaraisiais metais skiriamas padidintas
dėmesys [17–23], nes išsamūs duomenys apie
šiuos procesus gali gerokai palengvinti agromasės
panaudojimą termokonversijos procesuose;

- šlakavimosi reiškinio pasekmė – padidėjęs
pasipriešinimas šilumos pernašai, įrangos paviršių
erozija ir korozija [15].

Pastarosios dvi problemos yra svarbiausios ir la-
biausiai riboja platų agromasės panaudojimą įren-
giniuose, gaminančiuose šilumą. Būtina atkreipti
dėmesį į dar vieną svarbų veiksnį – agromasės su-
dėties priklausomumą nuo jos rūšies, vegetacijos,
dirbtinio tręšimo, derliaus nuėmimo, sandėliavimo
ir apdorojimo sąlygų [24]. Todėl tos pačios rūšies
agromasės sudėtis gali labai skirtis atsižvelgiant į
nurodytus veiksnius, pareikalauti lankstesnio de-
gimo proceso valdymo ir reguliavimo.

Šiame straipsnyje pateikiami tyrimų komplekso
rezultatai, siekiant spręsti šiuos uždavinius:

- ištirti vietinės potencialios agromasės ir jos
pelenų sudėtį, savybes, palyginti jas su medienos
kuru;

- nustatyti mažos galios įrenginių, gaminamų
Lietuvoje ir kūrenamų medienos kuru, efektyvumą
ir emisijas į aplinką;

- išplėtoti KD emisijų iš mažos ir vidutinės ga-
lios įrenginių mažinimo tyrimus, jų atskyrimo me-
todus, įvertinti jų savybes ir priklausomumą nuo
kuro rūšies.

Tyrimų orientavimas į šių uždavinių spren-
dimą Lietuvos energetikos instituto Šiluminių
įrengimų tyrimo ir bandymų laboratorijoje buvo
pradėtas atsižvelgus į bendrąsias biokuro ištek-
lių panaudojimo tendencijas energijai gaminti.
Svarbų impulsą šiems darbams plėtoti suteikė
Lietuvos Respublikos Vyriausybės 2001 m. inici-
juota „Atitikties įvertinimo infrastruktūros (ban-
dymo laboratorijų, sertifikacijos įstaigų) plėtros
programa“ [25], kurią vykdant sukurta ir sukom-
plektuota įranga mažos ir vidutinės galios šilu-
minių įrenginių, gaminamų Lietuvos gamintojų,
tyrimams, bandymams ir atitikties vertinimams
atlikti. Ši laboratorijos veikla toliau akredituota
ir notifikuota, jos rezultatai pelnė tarptautinį pri-
pažinimą ir suteikė gamintojams galimybę tiekti
konkurencingus gaminius į rinką.

Kito etapo, orientuoto daugiau į mokslinius
kietojo kuro, įskaitant įvairių biokurą, panaudo-
jimo tyrimus, pradžia reikia laikyti slėnio SAN-

TAKA įsteigimą / suformavimą (2010–2013 m.).
Iš esmės buvo atnaujinta esama įranga, papil-
dyta šiuolaikiška aparatūra įvairių rūšių kietojo
kuro ir jo degimo produktų – dujinių junginių
ir kietųjų dalelių, pelenų sudėčiai ir savybėms,
degimo proceso efektyvumui ir su biokuru su-
sijusiems kenksmingiems poveikiams deginimo
įrenginiams ir aplinkai tirti.

KIETAJAM BOKURUI GAMINTI NAUDOJAMOS BIOMASĖS SAVYBĖS

Tyrimams pasirinkta įvairių rūšių biomasė buvo
suskirstyta į tris grupes (1 lentelė): pirmoji – že-
mės ūkio derliaus nuėmimo atliekos (rugių, kvie-
čių, kvietrugių ir rapsų šiaudai); antroji – žoliniai
augalai (šunažolė, nendrinis dryžutis, kanapė ir
drambliažolė); trečioji – medienos (eglės, alks-
nio, beržo ir uosio) biomasė.

Biomasės parametrai tirti metodais, pareng-
tais Tarptautinės standartizacijos organizaci-
jos (ISO) ir priimtais Lietuvos standartizacijos
departamento kietojo biokuro bandymų stan-
dartaais: drėgmės kiekis – pagal LST EN ISO
18134-1:2016; pelenų kiekis – pagal LST EN ISO
18122:2016 naudojant mufelinę laboratorinę
krosnį Nabertherm LVT/9/11/P330; šilumin-
gumas – pagal LST EN 14918:2010 kalorimetru
IKA C 5000; pagrindinių cheminių elementų
(CHNS) kiekiai – pagal LST EN ISO 16948:2015
analizatoriumi Flash 2000; chloro koncentraci-
ja – jonų chromatografu Dionex ISC 5000 pagal
LST EN ISO 16994:2015; mėginių elementinė
sudėtis – indukuotos plazmos optinės emisijos
spektrometru (ICP-OES).

Kaip matyti iš 1 lentelėje pateiktų duomenų,
elementinėje tirtosios biomasės ir biokuro sudė-
tyje vyrauja trys pagrindiniai elementai: anglis
(C), vandenilis (H) ir deguonis (O). Kartu šie
elementai sudaro apie 94–99 % sausosios masės.
Atskirų biomasės rūšių šilumingumas gerai ko-
reliuoja su anglies biomasėje kiekiu. Medienos
šilumingumo vidurkis siekia beveik 19 MJ/kg, o
jos peleningumas – ~0,7 %. Šiaudų ir žolių ši-
lumingumas yra kiek mažesnis, atitinkamai 16,5
ir 17,7 MJ/kg, bet jų peleningumas siekia ~5 %.

Nagrinėjant agromasės panaudojimą energi-
jai gaminti ir su tuo kylančius sunkumus, svarbu
atkreipti dėmesį į junginius, kurių sudėtyje yra
azoto (N), chloro (Cl) ir sieros (S). Nors jų nėra

1 lentelė. Žemės ūkio atliekų, žolinių augalų ir medienos elementinė sudėtis, šilumingumas ir peleningumas

Biomasės rūšis	Šilumingumas (s.k.a.)	Pelenų kiekis	C	H	N	S	O	Cl
	MJ/kg							
Žemės ūkio atliekos								
Rugių šiaudai	16,63	4,3	45,48	6,01	0,63	0,05	43,51	0,09
Kviečių šiaudai	16,91	3,9	42,68	5,41	0,99	0,13	46,90	0,09
Kvietrugių šiaudai	16,56	3,9	45,21	6,17	0,63	0,05	44,04	0,11
Rapsų šiaudai	15,78	5,8	43,23	5,97	1,08	0,23	42,51	0,29
Vidurkis	16,47	4,5	44,15	5,89	0,83	0,12	44,24	0,15
Žoliniai augalai								
Šunažolė	17,67	7,65	45,44	5,54	1,39	0,21	39,77	0,04
Nendrinis dryžutis	17,66	5,73	46,09	5,75	1,37	0,15	41,06	0,05
Kanapės	17,78	3,51	47,37	5,47	0,37	0,02	43,25	–
Drambliažolė	17,69	4,85	46,82	5,83	0,84	0,08	42,34	0,05
Vidurkis	17,7	5,44	46,43	5,65	0,99	0,12	41,61	0,05
Mediena								
Eglė	19,1	0,9	50,64	5,78	0,21	0	42,68	0,05
Alksnis	18,92	0,84	49,08	5,94	0,34	0	43,2	0,02
Beržas	18,77	0,65	49,79	6,14	0,23	0	43,19	0,01
Uosis	18,67	0,5	49,95	5,76	0,24	0	43,55	0,02
Vidurkis	18,87	0,72	49,87	5,91	0,26	0	43,16	0,03

daug, bet jie iš esmės keičia pelenų sudėtį ir formavimąsi ant ardyno, nuosėdų susidarymą ant karštų kūryklos paviršių ir šaltesnių dūmų trakto paviršių, sudaro dalį emisijų į aplinką. Azoto (N) kiekio vidurkis medienos biomasėje sudaro 0,26 %, tačiau agromasėje azoto kiekiai siekia 1 %. Degimo metu kure esantis azotas kartu su ore esančiu azotu dalyvauja cheminėse reakcijose, kurių galutinis produktas, atsižvelgiant į konkrečių reakcijų sąlygas, gali būti dujinis N₂ ir azoto oksidai (NO_x, [NO, NO₂, N₂O]), kurių galutinė koncentracija daugiausia priklauso nuo oro pertekliaus, temperatūros degimo zonoje, azoto koncentracijos kure ir pakuros konstrukcijos.

S ir Cl kiekiai didžiausi javų šiauduose (iki 0,12–0,15 %), mažiau (iki 0,12–0,05 %) žoliniuose augaluose ir jų beveik nėra medienoje. Šarminiai chloridai dalyvauja cheminėse reakcijose, kurių metu susidarę junginiai esant aukštai temperatūrai gali lydėtis arba virsti garais ir formuoti žalingas nuosėdas ant paviršių.

Degimo proceso emisijoms ir įrangos medžiagoms didelį poveikį daro S, esanti kure. Sieros

junginiai degimo produktuose gali būti aerozolių ar dujų pavidalu, pavyzdžiui, SO₂ (nedideliais kiekiais, kaip SO₃), ir sukelti žemos temperatūros koroziją šilumokaičiuose ir dūmtakiuose.

Kita svarbi biomasės sudedamoji dalis – metalų junginiai, kurių vieni patenka į augalų sudėtį vegetacijos metu iš dirvožemio arba trąšų ir dalyvauja biologinėje medžiagų apykaitos sistemoje, kiti patenka į agromasę kaip pašalinis produktas nuimant derlių, jį apdorojant, transportuojant ar sandėliuojant.

2 lentelėje pateikti svarbiausių metalų, lemiančių pelenų kiekį ir jų savybes, koncentracijos atskirose biomasės rūšyse. Iš karto matyti, kad visais atvejais daugiausia yra Ca, Si, K, Mg, Na ir Fe, bet jų vieta sekoje, kaip ir kitų mažiau esančių elementų, kinta. Šis kitimas gali būti daugelio veiksnių pasekmė ir reikalauja išsamesnių tyrimų. Tačiau svarbiausių elementų padėtis sekose yra tokia:

– medienoje – Ca, K, Si ir Mg, o Na, Zn ir Fe kiekiai beveik vienodi ir gerokai mažesni. Kitų elementų koncentracijos yra mažesnės nei 10 mg/kg;

– javų šiauduose – Si, K, Ca ir Mg, toliau eina Na, Fe, Pb ir kiti elementai;

2 lentelė. Metalų kiekiai žemės ūkio atliekose, žoliniuose augaluose ir medienoje

Elementų kiekiai (mg/kg)	Ca	Si	Fe	K	Mg	Na	Ti	Ba	Cd	Cr	Mn	Ni	Pb	Zn
Rugių šiaudai	2 239	15 397	156	690	823	55	120	–	–	13,1	20,5	1,5	120	7,0
Kviečių šiaudai	1 689	11 466	94	6 427	687	81	185	31	0,4	8,2	27,1	0,3	56	7,5
Kvietrugių šiaudai	2 468	7 235	141	8 077	587	160	17	–	–	7,6	25,4	2,5	74,7	4,9
Rapsų šiaudai	11 173	7 183	143	12 385	1 538	372	23	–	–	17,7	21,8	0,3	128,7	7,4
Vidurkis	4 392	10 320	133	6 894	908	167	86	31	0,4	11,7	23,7	1,2	94,8	6,7
Nendrinis dryžutis	3 511	1 850	245	2 700	851	200	15	7,5	0,06	3,5	–	–	2,1	18,2
Kanapės	6 715	2 845	340	1 324	420	64	25	4,7	0,07	3,9	27	2,3	3,8	21
Dramblia-žolė	2 897	10 800	47,6	4 990	752	111	2,4	12,5	0,5	2,6	73,6	2,9	4,5	14,4
Vidurkis	4 374	5 165	211	3 005	674	125	14,1	8,2	0,2	3,3	50,3	2,6	3,5	17,9
Eglė	924	256	44	352	124	21	3,0	–	–	0	5,4	0,9	1,8	7
Alksnis	2 018	546	17,9	490	145	6,4	0,8	5,2	0,22	0	10,6	0,7	3,1	6,9
Beržas	1 739	607	6,8	985	182	5,4	0,9	4,7	0,3	0	7,1	0,9	1,9	74,5
Uosis	3 697	475	22,4	1 647	246	75	1,2	11,2	0,5	0	6,4	2,4	7,4	5,3
Vidurkis	2 094	471	22,8	868	174	26,9	1,5	7,1	0,3	0	7,4	1,2	4,1	23,4

– žoliniuose augaluose – (panašiai kaip šiauduose) Si, Ca, K, Mg ir Fe, Na, Mn ir kiti elementai.

Taigi tirtųjų rūšių biomasėje daugiausia tų pačių elementų Ca, K, Si ir Mg bei kiek mažiau Na ir Fe. Jei medienoje daugiausia yra Ca, tai agromasėje – Si. Suminės vidutinės metalų koncentracijos šiauduose ir žoliniuose augaluose yra apytikriai 6 ir 4 kartus didesnės nei medienoje. Kaip parodyta 3 lentelėje, tai koreliuoja su pelenų kiekių santykiais ir pelenų sudėtimi.

KURO, GAMINAMO IŠ MEDIENOS IR AGROMASĖS, PELENŲ SAVYBĖS

Pelenų lydumas tirtas pagal LST CEN/TS 15370-1 naudojant aukštatemperatūrinę krosnį su videokamera. Pagal mėginio formos pokyčius didėjant temperatūrai buvo nustatomos šios būdingos lydumo temperatūros: SST – susitraukimo; DT – deformacijos; HT – pusrutulio formos ir FT – išsiliejimo.

3 lentelė. Tirtųjų medienos ir agromasės rūšių bei jų pelenų elementinių sudėčių palyginimas

Medienoje ir agromasėje / pelenuose, %	Ca	K	Si	P	Mg	Al	Na
Beržas	0,14/ 31,2	0,05/ 12,7	0,03/ 0,9	0,25/ 1,6	0,02/ 3,4	-0,2	0,22/ 0,5
Eglė	0,14/ 29,4	0,04/ 12,8	0,03/ 1,6	0,24/ 1,4	0,01/ 2,4	-0,3	0,21/ 0,6
Nendrinis dryžutis	0,24/ 4,8	1,89/ 45,7	0,25/ 7,9	0,43/ 2,8	0,10/ 1,9	0,01/ 0,2	0,25/ 0,5
Kanapė	0,70/ 22,2	0,17/ 18,3	0,31/ 0,2	0,31/ 0,3	0,08/ 2,6	0,05/ 0,01	0,24/ 0,2
Grikių šiaudai	0,99/ 19,2	1,93/ 41,9	n/d/ n/d	0,41/ 2,7	0,08/ 1,4	0,01/ 0,2	0,24/ 0,6
Kviečių šiaudai	0,26/ 6,0	1,27/ 35,9	0,85/ 18,1	0,35/ 2,2	0,09/ 1,9	0,02/ 0,4	0,24/ 0,5
Rapsų šiaudai	1,15/ 19,8	2,08/ 37,4	0,27/ 4,6	0,36/ 1,6	0,14/ 2,1	0,03/ 0,5	0,30/ 0,8
Rugių šiaudai	0,34/ 6,5	0,98/ 24,2	0,90/ 20,8	0,36/ 1,7	0,10/ 2,0	0,04/ 0,8	0,27/ 0,5

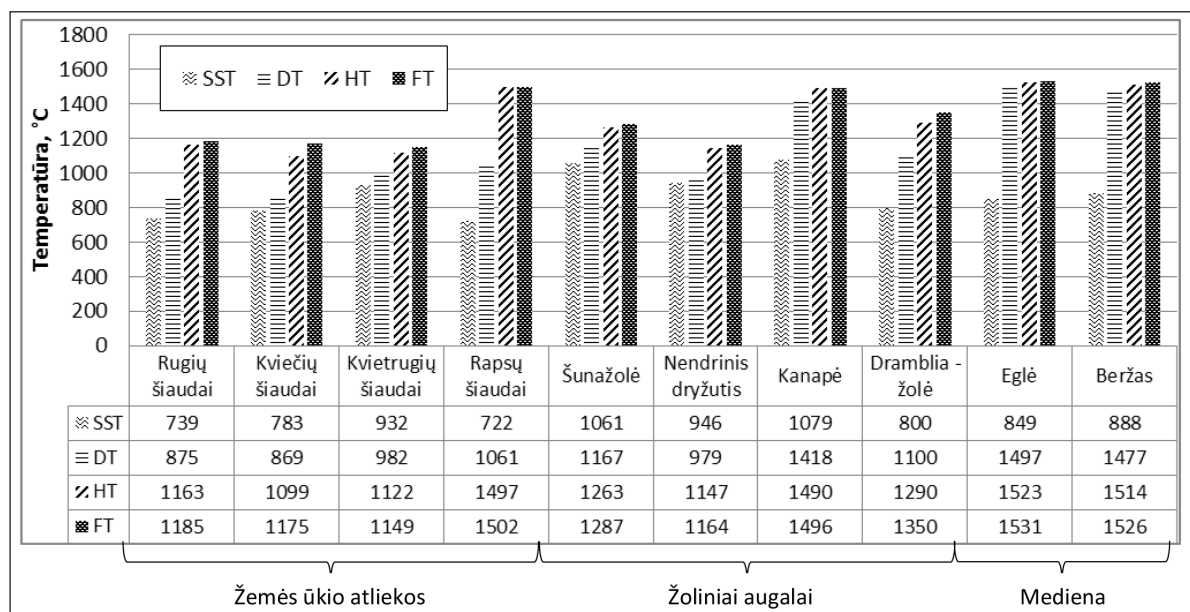
Iš 1 pav. pateiktų kiekvienos tirtosios biomasės rūšies būdingųjų temperatūrų matyti, kad SST reikšmė, rodanti mėginio tūrio pokyčių pradžią, daugeliui rūšių kinta nuo 700 iki 850 °C. Šiuo požiūriu netgi medienos SST tik vidutiniškai ≤ 100 °C yra didesnė nei šiaudų SST ir tik žolinių augalų, kanapių ir šunažolių, SST artėja iki 1 100 °C. Labai aiškiai matoma, kad medienos DT, HT ir FT reikšmės yra beveik vienodos ir artimos 1 500 °C. Pagal šiuos parametrus tik kanapė artima medienai, o kitų rūšių DT reikšmė išlieka 850–950 °C. Tai reiškia, kad deginant tokią agromasę prasideda procesai, sukeltys ankstyvą pelenų lydymąsi ir junginių fazinius virsmus.

Siekiant nustatyti, kokie elementai daugiausia veikia pelenų lydymą, buvo atliekama rūšių me-

dienos biomasės, agromasės ir jų pelenų elementinė analizė, rezultatai pateikti 3 lentelėje.

Kaip matyti iš 3 lentelėje pateiktų rezultatų, visų agromasės mėginių pelenuose nustatytos didesnės K, Si elementų koncentracijos nei medienos mėginių pelenuose. Iš agromasės grupės pagal Ca, K ir kitų elementų kiekį išsiskiria kanapės, kurių elementinė sudėtis labai artima medienos pelenų sudėčiai. Medienos pelenuose vyrauja Ca, K ir Mg, Si ir P kiekiai mažesni nei 1,5 %. Šiaudų pelenuose daugiausia yra K, Ca ir Si, kitų elementų 0,5–2,5 %.

Siekiant įvertinti, ar elementinė sudėtis lemia pelenų lydymosi temperatūrą, atlikta determinacijos koeficiento R^2 , tiesinio priklausomumo tarp kiekvieno elemento kiekio ir atskiros lydymo stadijos būdingosios temperatūros atveju, analizė, rezultatai pateikti 4 lentelėje.



1 pav. Būdingosios pelenų lydymo temperatūrų reikšmės

4 lentelė. Pelenų lydymosi temperatūros ir atskirų elementų koncentracijos koreliacija

	SST	DT	HT	FT
Si	-0,41 ($R^2 = 0,17$)	-0,86 (0,74)	-0,79 (0,62)	-0,78 (0,60)
P	-0,37 (0,14)	-0,02 (0,00)	-0,25 (0,06)	-0,24 (0,06)
Ca	-0,24 (0,06)	0,36 (0,13)	0,65 (0,43)	0,66 (0,44)
Na	-0,68 (0,46)	-0,06 (0,00)	-0,01 (0,00)	-0,01 (0,00)
Mg	-0,45 (0,20)	0,21 (0,04)	-0,06 (0,00)	-0,05 (0,00)
K	-0,63 (0,39)	-0,67 (0,45)	-0,44 (0,19)	-0,44 (0,20)
Al	-0,50 (0,25)	-0,42 (0,18)	-0,35 (0,12)	-0,36 (0,13)

Iš gautų rezultatų matyti, kad tik keliais atvejais pasireiškia pakankamo lygio koreliacija, leidžianti daryti išvadas apie būdingosios lydumo temperatūros priklausomumą nuo atskiro elemento kiekio. Didžiausią poveikį DT, HT ir FT temperatūroms daro Si, kurio kiekiui didėjant temperatūros mažėja. Ca kiekio didėjimas sukelia HT ir FT didėjimą, t. y. jo poveikis stipriau pasireiškia galutinėse lydumo stadijose. Na ir K poveikis, atvirkščiai, stipriau pasireiškia pradinėse lydumo stadijose, ir jų kiekio didėjimas mažina ST reikšmes. Analogiškas K poveikis taip pat stebimas ir DT reikšmėms. Apie Al ir kitų elementų poveikį daryti išvadų negalima, nes determinacijos koeficiento reikšmės $\leq 0,25$. Galima daryti prielaidą, kad pavienis elementas tiesiogiai nepaveikia lydumo fazių temperatūrų, reikalinga išsamesnė vienu metu pasireiškiančio kelių elementų poveikio analizė.

Apibendrinus analizės duomenis galima daryti prielaidą, kad didėjant Si, K ir Na kiekiui pelenų lydumo temperatūros mažėja, o esant didesniai Ca kiekiui jos didėja. Šie rezultatai koreliuoja su kitų autorių darbais [15, 24, 26]. Laikoma, kad vienas pagrindinių elementų, darančių daugiausia įtakos pelenų lydymuisi, yra K, kuris kartu su Si suformuoja silikatus, besilydančius esant žemai (apie 750 °C) temperatūrai [24]. Degimo metu, esant dideliui K kiekiui, gali susidaryti ne tik K silikatai, bet ir kiti K junginiai (chloridai, sulfatai, karbonatai). Šių K junginių lydymosi temperatūra taip pat žema ir siekia 770 °C [26]. Na, kaip ir K, mažina pelenų lydymosi temperatūrą. Pelenuose K ir Na transformacijos mechanizmai yra panašūs. Kadangi K sukeliama poveikiai yra ge-

rokai didesni, o Na kiekiai labai maži, dažnai Na nėra atskirai išskiriamas, o tapatinamas su K [15].

MAŽOS GALIOS ĮRENGINIŲ, KŪRENAMŲ BLOKŲ, EFEKTYVUMO TYRIMAI

Mažos galios (nuo 8 iki 50 kW) naujai pagamintų Lietuvoje blokų kūrenamų šildymo įrenginių efektyvumas ir emisijos, ypač kietųjų dalelių, buvo tiriamos eksperimentiniame laboratoriniame įrenginyje. Įrenginių naudingumo koeficientui nustatyti taikytas tiesioginio balanso metodas. Iš-tirti vandens šildymo katilų, kūrenamų medienos granulėmis (21 vnt.), malkine mediena (16 vnt.), iš kurių devyni dujų generacinio tipo katilai ir septyni įprastiniai katilai, septynių malkomis kūrenamų krosnelių efektyvumas [27] ir KD emisijos [28]. KD masės koncentracijos matuotos automatinio izokinetiniu KD rinktuvu Isostac Basic HV, įrenginiams veikiant vardine galia šiluminių įrenginių tyrimo įrenginyje. KD pasiskirstymas pagal dydį buvo matuojamas spektrometru Promo 2000/3000, dūmų dujų sudėtis – dujų analizatoriais. Taip pat tirti KD mėginiai, paimti iš eksploatuojamų didesnės galios katilų.

Šildymo įrenginių efektyvumas

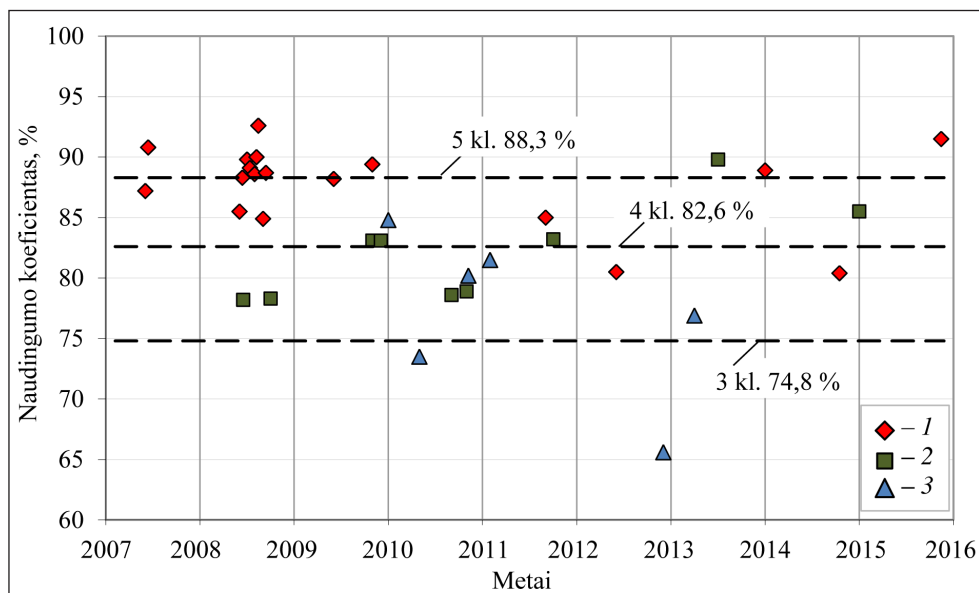
Įvertinant efektyvumo tyrimo rezultatus buvo atsižvelgiama į standartų ir teisės aktų reikalavimus. Reikalavimai kietuoju kuru kūrenamų katilų efektyvumui, kuriuos pateikia standartas [6], nurodyti 5 lentelėje.

Naudingumo koeficiento tyrimo rezultatai apibendrinti 2 ir 3 pav. Kaip matyti iš 2 pav., daugumos

5 lentelė. Naudingumo koeficiento reikalavimai pagal [6]

Katilo klasė	Taikomas standartas	Katilo galia kW	Naudingumo koeficientas, %	Naudingumo koeficiento formulė
5	LST EN 303-5: 2012	10	88	$\eta = 87 + \log Q_n$
		300	89	
4	LST EN 303-5: 2012	10	82	$\eta = 80 + 2 \log Q_n$
		300	84	
3	LST EN 303-5: 2012	10	73	$\eta = 67 + 6 \log Q_n$
		300	82	
2	LST EN 303-5: 2000	10	63	$\eta = 57 + 6 \log Q_n$
		300	72	
1	LST EN 303-5: 2000	10	53	$\eta = 47 + 6 \log Q_n$
		300	62	

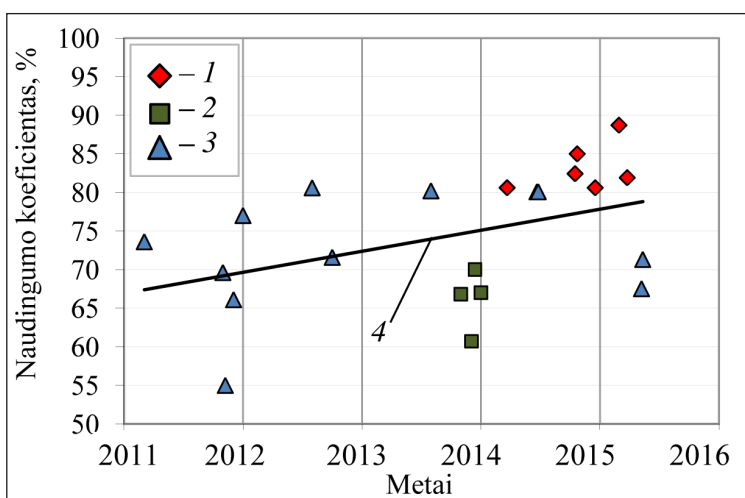
Pastaba. Q_n – katilo vardinė galia kW.



2 pav. Kietojo kuro katilų naudingumo koeficientų palyginimas su nustatytais reikalavimais 20 kW galios katilui (5 lentelė): 1 – medienos granulėmis kūrenamas katilas; 2 – malkomis kūrenamas dujų generacinis katilas; 3 – malkomis kūrenamas apatinio degimo katilas

granulėmis kūrenamų katilų naudingumo koeficiento reikšmių vidurkis visiškai priartėjo prie 90 % ir tenkina 5 klasės reikalavimus. Šio tipo katilai yra gerokai pranašesni už kito tipo katilus, naudojančius mažiau paruoštą kurą, kurie periodiškai užkraunami ir neturi įtaisų degimo procesui valdyti. Todėl pastarųjų katilų naudingumo koeficientas siekia 4 klasės, o dažniausiai – tik 3 klasės reikalavimus.

Toks skirtumas atsiranda, nes specialiai paruoštas medienos granulių kuras pasižymi geresnėmis savybėmis, o dėl vienodais intervalais automatiškai tiekiamo kuro degimo procesas tampa lengvai ir efektyviai valdomas. Tai patvirtina židinių ir krosnelių tyrimo rezultatai, kurių efektyvumas pastebimai didėja gerinant paruoštą kurą ir oro degimui tiekimą (3 pav.). Ypač svarbią reikšmę turi tinkamas oro tiekimo valdymas kuro



3 pav. Gaminamų židinių ir krosnelių naudingumo koeficiento kitimo tendencija: 1 – medienos granulėmis kūrenama krosnelė; 2 – malkomis kūrenamas židinių įdėklas; 3 – malkomis kūrenama krosnelė; 4 – tiesiškas priklausomumas taikant mažiausių kvadratų metodą

įdiegimo metu, kai nevisiško degimo emisijos pasiekia didžiausias reikšmes.

Apskritai mažos galios kietojo biokuro katiluose vienu svarbiausių parametru, lemiančių kuro visišką sudegimą, yra degimo produktų ir oro srautų, tiekiamų degimui, efektyvus maišymasis visose kuro degimo stadijose. Kadangi galutinis lakiųjų dujinių produktų sudeginimas vyksta tiekiant antrinį orą, įsisavintas ir pradėtas praktiškai taikyti skaitinis maišymosi proceso modeliavimas įvairios formos kamerosse nustatomas pasitelkus ANSYS FLUENT v.14.0 kompiuterinės skysčių dinamikos programą ir įvairius turbulentiškumo modelius.

4 pav. pateiktas vienos iš skaitiniam modeliavimui pasirinktos degimo kameros su natūralia trauka supaprastintas dvimatis (2D) pavyzdys, siekiant nustatyti antrinio oro įtraukimo į degimo kamerą tinkamiausią vietą ir įsiurbiamo oro kiekį. Modeliavimas atliktas keičiant antrinio oro tiekimo vietas.

Antrinio oro srovės, įtraukiamos per plyšį užpakalinėje sienelėje, ir pagrindinio srauto sąveikos dinamiką atspindi 4a, b pav. pateikti skaičiavimo rezultatai. Matyti, kad tokiu atveju antrinio oro srovę galima tiekti taip, kad ji būtų tarp dviejų ganėtinai stabilių sūkurių, kurių apatinį formuoja srauto atitrūkimas aptekant kanalo posūkio kampą ir ištekanti antrinio oro srovė, kaip kliūtis pagrindiniam srautui (4b pav.). Tokiu būdu antrinis oras patenka į pagrindinio srauto vidurį, užtikrina efektyvesnį susimaišymą ir tolydų greičio pasiskirstymą kameros skerspjuvyje.

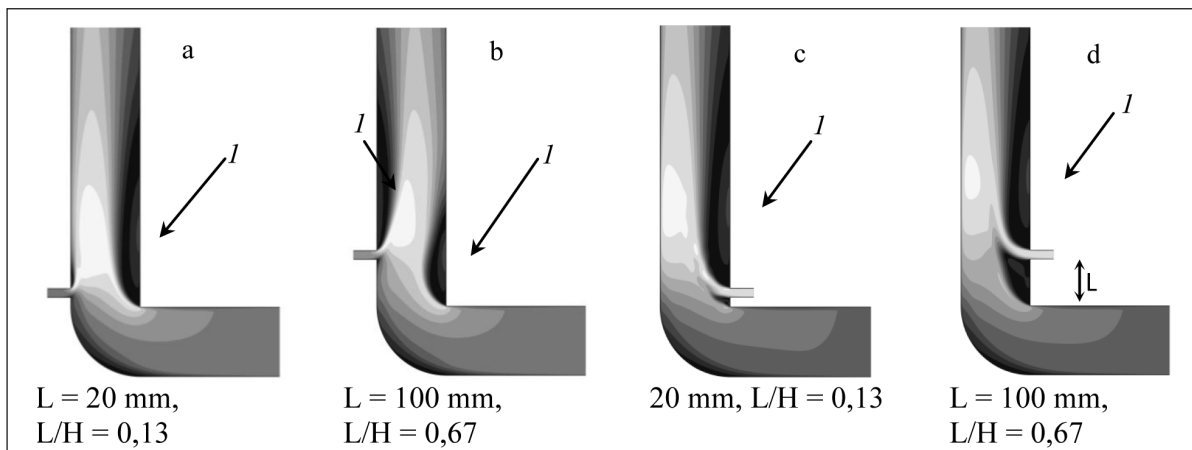
Per plyšį priekinėje sienelėje (4c, d pav.) antrinio tiekimas smarkiai padidina greičio pasiskirstymo netolygumą kameros skerspjuvyje nepriklausomai nuo įtekėjimo vietos. Nors šiuo atveju antriniam orui įtekėti sąlygos yra palankesnės, bet itin padidėja greičio pasiskirstymo kameroje netolygumas ir srautų maišymasis.

Šie skaičiavimai buvo išplėtoti į cilindrinės formos kameras taikant maišymosi efektyvumui vertinti matematinį metodą, pagrįstą išsiuoksniavimo intensyvumo skaičiavimu [29]. Šių metodų taikymas leis išspręsti daug svarbių uždavinių, susietų su degimo kamerų konstrukcijų parinkimu, antrinio oro tiekimu ir efektyviu srautų susimaišymu.

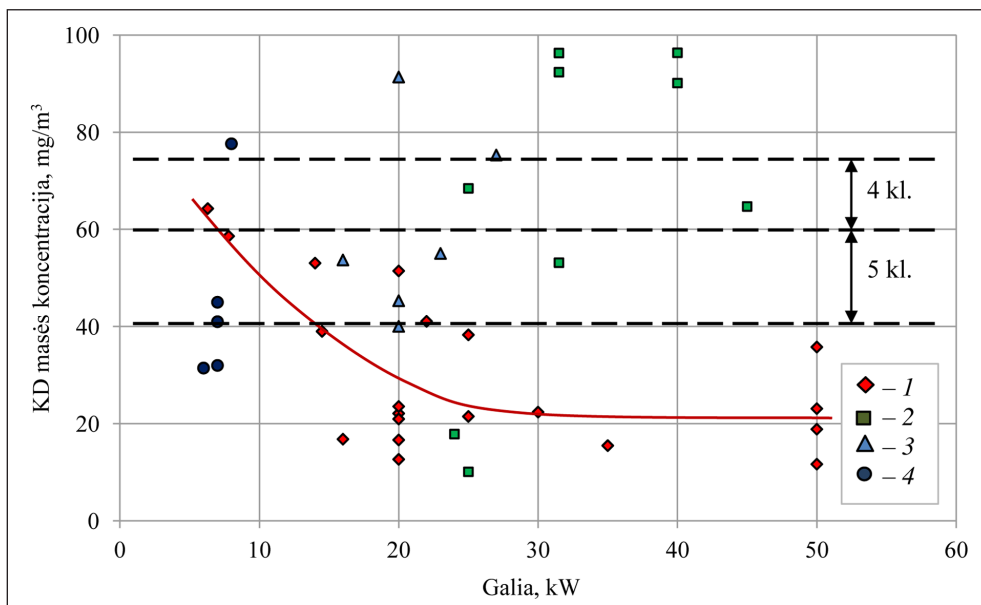
Šildymo įrenginių KD emisijų koncentracijos ir pasiskirstymas pagal dydį

5 pav. pateikti anksčiau nurodytų įrenginių KD emisijų tyrimo rezultatai, jų palyginimas su reglamentuojamais reikalavimais [6], kurie pažymėti punktyrinėmis linijomis, nurodančiomis KD ribas 75–60 ir 60–40 mg/m³, atitinkamai 4 ir 5 klasės katilams su rankiniu ir automatinio kuro pakrovimu.

Šie duomenys rodo, kad mažiausias KD emisijas išskiria šildymo įrenginiai, naudojantys specialiai paruoštą granuliuotą kurą bei turintys valdiklius, gebančius lanksčiai valdyti tinkamą kuro / oro tiekimą atsižvelgiant į besikeičiančią apkrovą. Apie 60 % tokių vandens šildymo katilų KD emisijos sudaro apie 20 mg/m³ ir yra mažiausios. Tačiau mažėjant katilo galiai KD masės



4 pav. Greičio pasiskirstymas pagal į antrinio oro įtekėjimo atstumo nuo posūkio kampo (L) santykį su kameros aukščiu (H): a ir b – oro tiekimas per plyšį užpakalinėje sienelėje; c ir d – per plyšį priekinėje sienelėje; I – recirkuliacinio tekėjimo zonos



5 pav. Lietuvoje gaminamų mažos galios biokuro kūrenamų šildymo įrenginių KD masės koncentracijos dūmų dujose esant 10 % O₂: 1 – medienos granulėmis kūrenamas katilas; 2 – malkomis kūrenamas dujų generacinis katilas; 3 – malkomis kūrenamas katilas; 4 – malkomis kūrenama krosnelė

koncentracija didėja. Šią tendenciją 5 pav. apibendrina ištisinė kreivė.

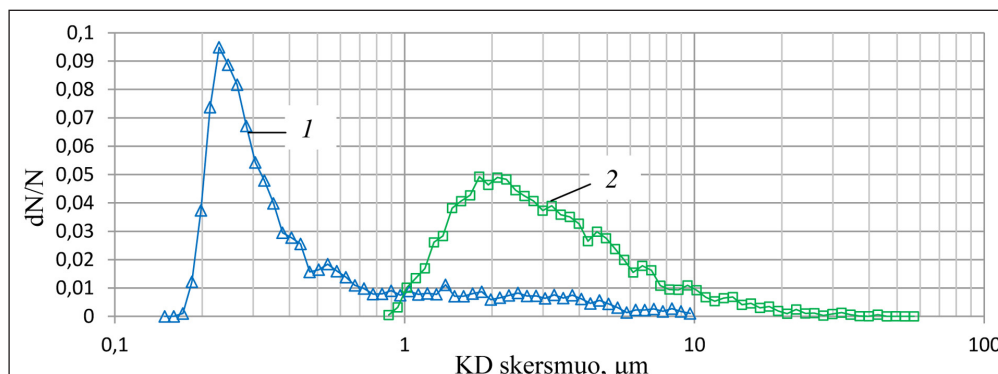
Malkomis kūrenamų vandens šildymo katilų, neatsižvelgiant į jų tipą, KD emisijos kinta nuo 20 iki 90 mg/m³ ir labai priklauso nuo konstrukcijos, oro degimui tiekimo ir reguliavimo ypatumų. Malkomis kūrenamoms krosnelėms, tinkamai reguliuojant pirminio ir antrinio oro degimui tiekimą, galima pasiekti KD emisijų lygį 30–45 mg/m³.

KD dūmų dujose iš 25 kW galios katilo, kūrenamo medienos granulėmis, pasiskirstymas parodytas 6 pav., kaip dN/N (tam tikro dydžio dalelių kiekio dN ir suminio jų kiekio N santy-

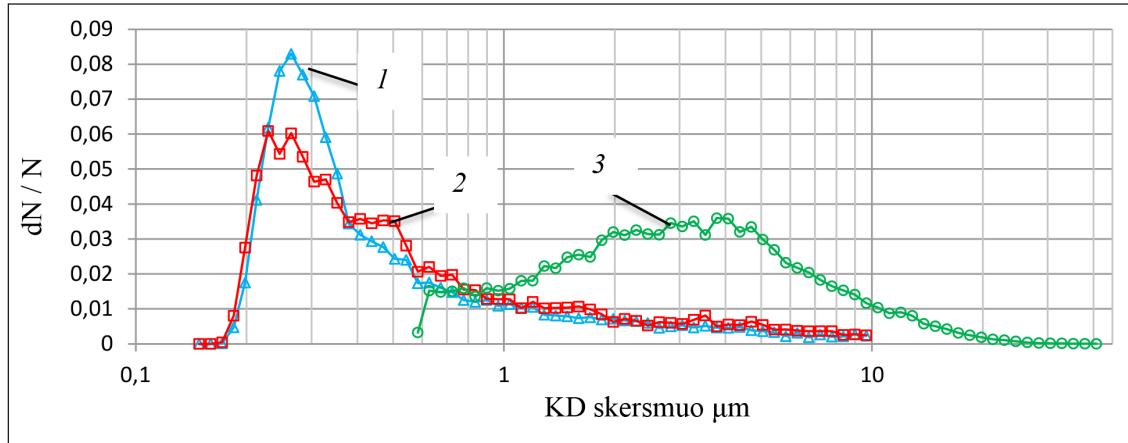
kiu) priklausomumas nuo KD skersmens. Dalelių mėginiai buvo imami iš dalelių rinktuvo Isostac filtrų ir analizuojami spektrometru naudojant 2 matavimo celes. Matyti, kad emisijose daugiausia smulkių 0,1–0,2 μm dydžio dalelių, daug mažiau 1–10 μm ir nėra didesnių nei 20 μm.

Kūrenant kitos rūšies kietuoju kuru buvo taip pat analizuojami mėginiai, paimti iš eksploatuojamų vidutinės galios vandens šildymo katilų, aprūpintų multiciklonais ir elektrostatiniais nusodintuvais.

7 pav. pateikti 500 kW galios kietojo kuro katilo, aprūpinto 6 baterijų multiciklonu išmetamų į



6 pav. 25 kW galios katilo, kūrenamo medienos granulėmis, KD emisijų pasiskirstymas pagal dydį: 1 – celė 0,2–10 μm; 2 – celė 2–105 μm



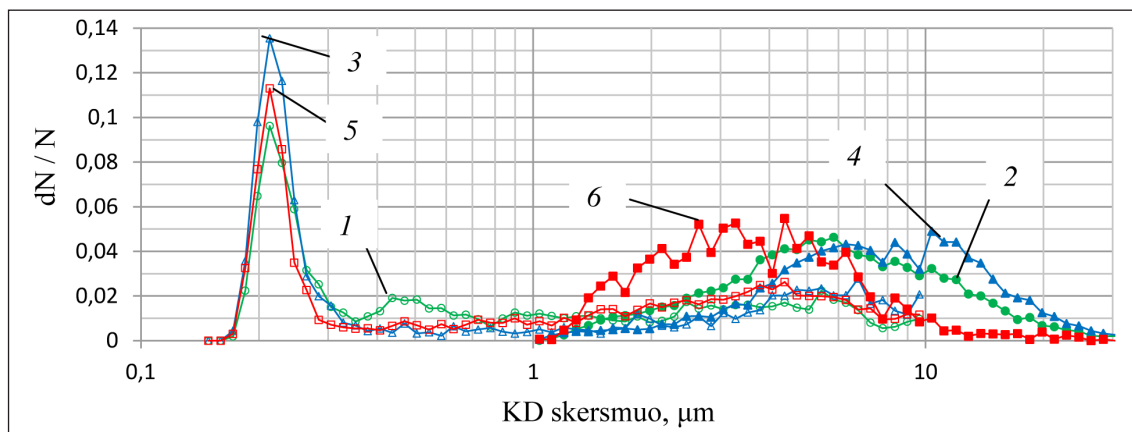
7 pav. 500 kW vandens šildymo katilo, kūrenamo medienos skiedromis, dūmų dujose ir multiciklone atskirtų KD pasiskirstymas pagal dydį: 1, 2 – atitinkamai prieš multicikloną ir po jo, celė 0,1–10 μm; 3 – multiciklone, celė 1–110 μm

aplinką KD kiekiui mažinti, dalelių dydžio analizės rezultatai. Katilui veikiant nominaliu režimu ir deginant medienos skiedras ant ardyno KD masės koncentracijos matuotos dūmtakyje už katilo prieš multicikloną ir ~2 m atstumu už jo. KD masės koncentracijos matuotos automatinio izokinetiniu KD rinktuvu, o jų pasiskirstymas pagal dydį – analogiškai anksčiau pateiktam atvejui.

Dūmų dujose didžiausias KD tankis pagal dalelių dydį nustatytas nuo 0,2 iki 0,4 μm. Didžiausias tankis yra šių dydžių intervalo viduryje. Taip pat aiškiai matoma, kad dūmų dujose yra daug KD, kurių dydis nuo 0,5 iki 10–12 μm. Šiame diapazone didėjant KD dydžiui, jų tankis asimptotiškai mažėja. Kadangi multiciklonas efektyviai atskiria KD, kurių dydis didesnis nei 1 μm, po multiciklono KD

didžiausias tankis stebimas tame pačiame diapazone nuo 0,2 iki 0,5 μm, bet jo reikšmė gerokai mažesnė. Iš gautų rezultatų galima daryti išvadą, kad multiciklono efektyvumas smarkiai didėja didėjant dalelių dydžiams. Jau dalis net 1 μm ir mažesnių dalelių gali būti atskirta multiciklonu, bet tik KD pasiekus 2–3 μm dydį atskyrimo efektyvumo didėjimo sparta įgauna didžiausias reikšmes. Iš 6 ir 7 pav. palyginimo nematyti didelio skirtumo, ar 25 kW galios katilas kūrenamas medienos granulėmis, ar 500 kW – medienos skiedromis, išskyrus tai, kad pastaruoju atveju didėja stambesnių dalelių kiekis nuo 1 iki 10 μm.

Pastarasis reiškinys dar labiau išryškėja analizuojant KD, atskirtas iš dūmų dujų multiciklonais ir elektrostatiniais nusodintuvais (8 pav.). Mėginiai



8 pav. 7 MW vandens šildymo katilo, kūrenamo medienos skiedromis, multiciklone ir elektrostatiniame nusodintuve atskirtų KD pasiskirstymas pagal dydį: 1, 2 – 1-asis multiciklonas, atitinkamai celės 0,1–10 μm ir 1–110 μm; 3, 4 – 2-asis multiciklonas, atitinkamai celės 0,1–10 μm ir 1–110 μm; 5, 6 – elektrostatinis nusodintuvas, atitinkamai celės 0,1–10 μm ir 1–110 μm

buvo imami tiesiogiai iš dviejų 7 MW galios vandens šildymo katilų, kūrenamų medienos skiedromis, multiciklonų ir nuosekliai jiems prijungto elektrostatinio nusodintuvo kamerų. Palyginus KD dalelių pasiskirstymus, pateiktus 7 ir 8 pav., matyti, kad didėjant katilo galiai multiciklonuose atsiranda vis daugiau stambesnių (4–10 μm dydžio) dalelių. Tai susieta su intensyvesniu degimo procesu ir didesniais degimo produktų srautais. Nuosekliai įrengtas elektrostatinis nusodintuvas sulaiko dar ganėtinai didelį kiekį mažesnių dalelių (dydis nuo 2 iki 7 μm) ir kurių nesulaiko multiciklonas. Smulkias daleles sulaiko ne tik elektrostatinis nusodintuvas, bet ir multiciklonas.

Apibendrinant gautus rezultatus galima teigti, kad iš biomase kūrenamų įrenginių išmetamų KD koncentracija ir jų dydis kinta pagal įrenginio tipą, jo galią ir apkrovą bei degimo režimą. Labai didelę KD dalį pagal kiekį sudaro dalelės, kurių matmenys yra gerokai mažesni nei 1 μm , todėl įprastinės mechaninės priemonės (ciklonai, multiciklonai) dūmų dujomis nuo KD valyti nėra efektyvios. Multiciklonas pradeda atskirti KD nuo 1 μm dydžio ir pasiekia atskyrimo efektyvumą $\geq 90\%$ esant 3–4 μm dydžio KD. Po multiciklono nuo 0,2 iki 0,5 μm dydžio KD tankis dūmų dujose išlieka didžiausias, nes jų negalima atskirti taikant tokias dūmų dujų priemones. Siekiant užtikrinti mažas KD emisijas iš vidutinės ir didelės galios įrenginių, kūrenamų biokuru, privalu nuosekliai su ciklonu arba multiciklonu naudoti papildomas smulkių KD atskyrimo priemones – elektrostatinius nusodintuvus ir įvairaus tipo medžiaginius bei keraminius filtrus.

Mažos galios (≤ 50 kW) vandens šildymo katilams ir patalpų šildymo prietaisams (krosnelėms, židiniams, viryklėms ir kt.) būdingi mažiau intensyvūs biokuro degimo ir oro degimui tiekimo procesai. Tai sumažina didesnių matmenų KD emisijas, bet išlieka smulkių dalelių, kurių dydis gerokai mažesnis nei 0,2–0,5 μm . Šios dalelės ypač kenksmingos aplinkai ir žmonių sveikatai, nes ilgai išsilaiko atmosferoje, išmetamos į nedidelius aukščius ir į artimą taršos šaltiniui aplinką, pasižymi didele skvarba.

Elektrostatinis KD atskyrimo metodas ir tiesioginis dūmų dujų filtravimas per filtrus yra perspektyviausi metodai KD emisijoms iš mažos galios buitinių ir komunalinių įrenginių mažinti dėl jų aukšto efektyvumo ir eksploatacinių savybių.

IŠVADOS

1. Biomasės sudėtyje svarbiausių elementų padėtis pagal jų masės koncentraciją sekose yra tokia:

- medienoje – Ca, K, Si ir Mg, o Na, Zn ir Fe kiekiai beveik vienodi ar gerokai mažesni;
- javų šiauduose – Si, K, Ca ir Mg, toliau eina Na, Fe, Pb ir kiti elementai;
- žoliniuose augaluose – (panašiai kaip šiauduose) Si, Ca, K, Mg ir Fe, Na, Mn bei kiti elementai.

Suminės vidutinės šių elementų koncentracijos šiauduose ir žoliniuose augaluose yra atitinkamai 6 ir 4 kartus didesnės nei medienoje. Jos koreliuoja su pelenu, susidaranciu deginant biomasę, kiekiais.

2. Medienos pelenuose vyrauja Ca, K ir Mg, o Si ir P kiekiai mažesni nei 1,5 %. Šiaudų pelenuose daugiausia yra K, Ca ir Si, kitų elementų 0,5–2,5 %. Visų agromasės rūšių pelenuose K, Si koncentracijos didesnės nei medienos pelenuose. Šiaudų pelenai pradeda minkštėti esant ~ 700 °C temperatūrai ir lemia ankstyvą šlakavimosi proceso pradžią. Iš agromasės grupės pagal Ca ir K bei kitų elementų kiekį išsiskiria kanapės, kurių elementinė sudėtis labai artima medienos pelenu sudėčiai, o SST ≥ 1000 °C. Būdingosios pelenu lydumo temperatūros (DT, HT ir FT) stipriausiai koreliuoja su Si – jo kiekiui didėjant, temperatūros mažėja. Ca kiekio didėjimas sukelia HT ir FT didėjimą, t. y. jo poveikis stipriau pasireiškia galutinėse lydumo stadijose. Na ir K poveikis – atvirkščiai – stipriau pasireiškia pradinėse lydumo stadijose, ir jų kiekio didėjimas mažina ST reikšmes. Analogiškas K poveikis taip pat stebimas ir DT reikšmėms. Apie Al ir kitų elementų poveikį daryti išvadų negalima, nes determinacijos koeficiento reikšmės $\leq 0,25$.

3. Mažos ir vidutinės galios vandens šildymo katilai su granuliuoto medienos kuro degikliais gali užtikrinti ne mažesnę kaip 90 % naudingumo koeficientą ir mažas ~ 20 mg/m³ KD koncentracijas emisijose į aplinką.

4. Iš mediena kūrenamų įrenginių išmetamų KD koncentracija ir jų dydis kinta pagal įrenginio tipą, jo galią ir apkrovą, degimo režimą. Labai didelę KD dalį pagal kiekį sudaro dalelės, kurių matmenys yra gerokai mažesni nei 1 μm . Įprastinės mechaninės priemonės (ciklonai, multiciklonai) dūmų dujomis nuo KD valyti nėra efektyvios. Siekiant užtikrinti mažas KD emisijas iš vidutinės

ir didelės galios įrenginių, kūrenamų biokuru, privalu nuosekliai su ciklonu arba multiciklonu naudoti papildomas smulkių KD atskyrimo priemonės – elektrostatinis nusodintuvus ir įvairaus tipo medžiaginius bei keraminius filtrus.

Mažos galios (≤ 50 kW) vandens šildymo katilams ir patalpų šildymo prietaisams (krosnelėms, židiniams, viryklėms ir kt.) būdingi mažiau intensyvūs biokuro degimo ir oro degimui tiekimo procesai. Tai sumažina didesnių matmenų KD emisijas, bet išlieka smulkių dalelių, kurių dydis gerokai mažesnis nei $0,2\text{--}0,5$ μm . Elektrostatinis KD atskyrimo metodas ir tiesioginis dūmų dujų filtravimas per filtrus yra perspektyviausi metodai KD emisijoms iš mažos galios buitinių ir komunalinių įrenginių mažinti.

Gauta 2016 06 30

Priimta 2016 10 20

Literatūra

- Lietuvos statistikos departamentas. <http://osp.stat.gov.lt> (žiūrėta 2016 05 18).
- Obernberger I. The present state and future development of industrial biomass combustion for heat and power generation. *ASME-ATI-UIT 2010 Conference on Thermal and Environmental Issues in Energy Systems, May 16–19, 2010, Sorrento, Italy*.
- Gregg P. E., Bolwig J. S., Solér S., Vejlggaard O., Gundersen L., Grohnheit S. H. *Experiences with Biomass in Denmark*. 2014.
- Olsson M. *Residential Biomass Combustion – Emissions of Organic Compounds to Air from Wood Pellets and Other New Alternatives*. 2006.
- Obernberger I., Christoph M. Survey on the present state of particle precipitation devices for residential biomass combustion with a nominal boiler capacity up to 50 kW. *IEA Bioenergy project Task 32 report, December 2011, Graz, Austria*.
- LST EN 303-5:2012. Šildymo katilai. 5 dalis. Rankomis ir automatiškai pakraunami kietojo kuro šildymo katilai, kurių atiduodamoji šiluminė galia iki 500 kW. Terminijos reikalavimai, bandymai ir ženklavimas.
- LST EN 14961-1:2010. Kietasis biokuras. Kuro specifikacijos ir klasės. 1 dalis. Bendrieji reikalavimai.
- Fournel S., Palacios J. H., Morissette R., Ville-neuve J., Godbout S., Heitz M., Savoie P. Influence of biomass properties on technical and environmental performance of a multi-fuel boiler during on-farm combustion of energy crops. *Applied Energy*. 2015. Vol. 141. P. 247–259.
- Mitchell E. J. S., Lea-Langton A. R., Jones J. M., Williams A., Layden P., Johnson R. The impact of fuel properties on the emissions from the combustion of biomass and other solid fuels in a fixed bed domestic stove. *Fuel Processing Technology*. 2016. Vol. 142. P. 115–123.
- Hrdlicka J., Skopec P., Dlouhy T., Hrdlicka F. Emission factors of gaseous pollutants from small scale combustion of biofuels. *Fuel*. 2015. Vol. 165. P. 68–74.
- Roy M. M., Corscadden K. W. An experimental study of combustion and emissions of biomass briquettes in a domestic wood stove. *Applied Energy*. 2012. Vol. 99. P. 206–212.
- Cardozo E., Erlich C., Alejo L., Fransson T. H. Combustion of agricultural residues: An experimental study for small-scale applications. *Fuel*. 2014. Vol. 115. P. 778–787.
- Abreu P., Casaca C., Costa M. Ash deposition during the co-firing of bituminous coal with pine sawdust and olive stones in a laboratory furnace. *Fuel*. 2010. Vol. 89. P. 4040–4048.
- Vassilev S. V., Baxter D., Andersen L. K., Vassileva C. G. An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase-mineral and chemical composition and classification. *Fuel*. 2013. Vol. 105. P. 40–76.
- Niu Y., Tan H., Hui S. Ash-related issues during biomass combustion: Alkali-induced slagging, silicate melt-induced slagging (ash fusion), agglomeration, corrosion, ash utilization, and related countermeasures. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2016. Vol. 52. P. 1–61.
- Teixeira P., Lopes H., Gulyurtlu I., Lapa N., Abelho P. Evaluation of slagging and fouling tendency during biomass co-firing with coal in a fluidized bed. *Biomass and Bioenergy*. 2012. Vol. 39. P. 192–203.
- Lindberg D., Backman R., Chartrand P., Hupa M. Towards a comprehensive thermodynamic database for ash-forming elements in biomass and waste combustion – Current situation and future

- developments. *Fuel Processing Technology*. 2013. Vol. 105. P. 129–141.
18. Xiao R., Chen X., Wang F., Yu G. The physico-chemical properties of different biomass ashes at different ashing temperature, *Renewable Energy*. 2011. Vol. 36. No. 1. P. 244–249.
 19. Pettersson A., Åmand L. E., Steenari B. M. Chemical fractionation for the characterisation of fly ashes from co-combustion of biofuels using different methods for alkali reduction. *Fuel*. 2009. Vol. 88. No. 9. P. 1758–1772.
 20. Blomberg T. A thermodynamic study of the gaseous potassium chemistry in the convection sections of biomass fired boilers. *Material Corrosion*. 2011. Vol. 62. No. 7. P. 635–641.
 21. Niu Y., Zhu Y., Tan H., Wang X., Hui S., Du W. Experimental study on the coexistent dual slagging in biomass-fired furnaces: Alkali- and silicate melt-induced slagging, *Proc. Combust. Inst.* 2015. Vol. 35. No. 2. P. 2405–2413.
 22. Grimm A., Skoglund N., Boström D., Öhman M. Bed agglomeration characteristics in fluidized quartz bed combustion of phosphorus-rich biomass fuels. *Energy and Fuels*. 2011. Vol. 25. No. 3. P. 937–947.
 23. Garba M. U., Ingham D. B., Ma L., Porter R. T. J., Pourkashnian M., Tan H. Z., Williams A. Prediction of potassium chloride sulfation and its effect on deposition in biomass-fired boilers. *Energy and Fuels*. 2012. Vol. 26. No. 11. P. 6501–6508.
 24. Paulrud S. *Upgraded Biofuels – Effects of Quality on Processing, Handling Characteristics, Combustion and Ash Melting*. Doctoral thesis (Unit of Biomass Technology and Chemistry). Umeå: Swedish University of Agricultural Sciences, 2004. 53 p.
 25. LRV 2001 m. vasario 21 d. patvirtinta atitikties įvertinimo infrastruktūros (bandymų laboratorijų, sertifikacijos įstaigų) plėtros programa.
 26. Wang L., Hustad J. E., Skreiberg Ø., Skjevraak G., Grønli M. A critical review on additives to reduce ash related operation problems in biomass combustion applications. *Energy Procedia*. 2012. Vol. 20. P. 20–29.
 27. Vonžodas T., Pedišius N., Valantinavičius M. Mažos galios biokuro kūrenamų vandens šildymo katilų veikimo parametrų tyrimas. *Energetika*. 2013. T. 59. P. 93–103.
 28. Tonkonogij J., Pedišius N., Stankevičius A., Tonkonogovas A. Mažos ir vidutinės galios kietuoju kuru kūrenamų įrenginių kietųjų dalelių emisijų tyrimas. *Energetika*. 2015. T. 61. Nr. 3–4. P. 119–130.
- Nerijus Pedišius, Marius Praspaliauskas,
Mantas Valantinavičius, Tomas Vonžodas,
Vladas Zaleckas, Egidijus Lemanas,
Deimantė Čepauskienė**
- STUDY OF BIOFUEL PROPERTIES,
EFFICIENCY AND POLLUTION PARAMETERS
OF SMALL AND MEDIUM CAPACITY BOILERS
FIRED WITH THIS FUEL**
- Summary*
- Complex effectiveness and emission studies were carried out for heating boilers of low heat output, fired with wood fuel. The studies were completed in a series of stages. The first step was directed at the investigation of properties of currently used biofuel made of biomass and potentially perspective biofuel made of agromass in order to determine specific properties and how fuel should be prepared so that it could be efficiently burned in heating boilers. The second stage included numerical and experimental studies of various combustion chambers of heating boilers and air/flue gas canals in order to improve air/combustion product mixing and assuring proper combustion products' presence time in the hot zone and their temperature. During the last stage, the distribution of the particulate matter concentration in combustion products depending on their size and reduction methods of the concentration were analyzed.
- Keywords:** biofuel properties, ash composition and fusibility, water heating boilers, efficiency, emissions, particulate matter