

Mažos galios biokuru kūrenamų vandens šildymo katilų veikimo parametrų tyrimas

Tomas Vonžodas,

Nerijus Pedišius,

Mantas Valantinavičius

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

Eksperimentiškai tirti įvairiais principais veikiančių mažos galios vandens šildymo katilų, kūrenamų medienos kuru, efektyvumas ir tarša. Parodyta, kad granuliuoto kuro naudojimas mažos galios įrenginiuose leidžia pasiekti ne mažesnę kaip 90 % naudingumo koeficientą ir į aplinką išmetama mažiausiai teršalų. Malkinės medienos naudojimo periodiškai įkraunamuose katiluose efektyvumas labai priklauso nuo tinkamos degimo kameros konstrukcijos, antrinio oro tiekimo vietos parinkimo, temperatūrinio režimo palaikymo. Labiausiai oro tiekimo reguliavimas reikalingas įdegant naujai įkrautą kurą ir baigiantis įkrovos degimui. Atvirkštinio deginimo principas, kuriame siekiama išnaudoti kuro dujinimo ir gautų dujų deginimo pranašumus, leidžia pasiekti geresnių efektyvumo rodiklių ir mažesnių teršalų emisijų, bet reikalauja tinkamos konstrukcijos degimo kameros ir efektyvaus antrinio oro tiekimo, kad būtų užtikrintas visiškai sudegimas.

Taip pat atliktas skaitinis antrinio oro tiekimo į apatinio degimo katilo kūryklą esant natūraliai traukai modeliavimas, leidžiantis parinkti tinkamiausias oro tiekimo vietas ir kūryklos konstrukciją bei analizuoti srautų maišymosi procesus.

Raktažodžiai: biokuras, medienos kuras, vandens šildymo katilai, efektyvumas, teršalai

ĮVADAS

Didžiąją dalį atsinaujinančių energijos išteklių sudaro kietasis biokuras: įvairių rūšių mediena, šiaudai ir kita augalinė biomasė, kuri gali būti panaudota energijos gamybai. Tačiau pagrindiniu ir plačiausiai naudojamu namų ūkiuose ir katilinėse kuru yra mediena, nes jos ištekliai yra didžiausi, ji lengviausiai prieinama ir, jei nekreiptume dėmesio į jos panaudojimo efektyvumą bei keliamą taršą, nereikalinga sudėtingos įrangos ir paruošimo. Lietuvoje šio kuro potencialas vis dar nėra pakankamai tiksliai įvertintas ir gali siekti 1 000–1 050 ktne arba 4,85–5,93 mln. m³ medienos. Šiuo metu jau panaudojama apie 910 ktne [1]. Pastaruosius 20 metų medienos kuro naudojimas nuolatos augo, didėjo šio kuro paklausa namų ūkyje būstui šildyti ir maistui ruošti, daugiau jo sunaudojama centralizuoto šildymo ka-

tilinėse. 2011 m. duomenimis [1], namų ūkiuose buvo naudojama apie 61,3 % bendrojo medienos kuro kiekio, centralizuoto šildymo katilinėse ir kogeneracinėse elektrinėse atitinkamai 19,5 % ir 6 %. Likę kiekiai šildymui ir technologiniams procesams buvo sunaudoti pramonės, paslaugų ir žemės ūkio sektoriuose.

Biokuro naudojimas sparčiai auga ne tik naujai įrengtose šildymo sistemose, bet ir mažiau efektyviose senose, kurių visi efektyvumo ir taršos parametrai yra daug blogesni. Lietuvoje apie 90 % namų ūkių turi techniškai pasenusias šildymo sistemas, kurias reiktų renovuoti. Šios šildymo sistemos, palyginti su naujosiomis sistemomis, išmeta į aplinką daug teršalų, pvz., anglies monoksido (CO), lakiųjų organinių junginių (LOJ), kietųjų dalelių (KD) bei policiklinių aromatinių angliavandenilių (PAA). Visi šie teršalai didina foninį gyvenamųjų rajonų, apšildomų biokuru, užterštumą,

ypač šildymo sezono metu, o užterštumas kietosiomis dalelėmis KD10 (kietosios dalelės, kurių skersmuo $<10 \mu\text{m}$) labai dažnai viršija leidžiamąsias koncentracijas.

Taigi didėjant biokuro naudojimui namų ūkiuose tampa akivaizdu, kad būtina diegti naujas modernias ir mažiau teršiančias biokuro kūrenamas šildymo sistemas, jomis pakeisti senąsias. Tik taip galima išvengti didėjančios aplinkos taršos.

Sprendžiant šias problemas reikėtų remtis Austrijos, Vokietijos, Švedijos, Suomijos ir Danijos patirtimi. Šiose šalyse jau kelis dešimtmečius skiriamas didelis dėmesys biomasės terminio skaidymo sistemų technologinei pažangai ir yra pasiektą išpūdingų rezultatų, ypač taršos mažinimo srityje. Pagrindinis šiose šalyse atliekamų mokslo tyrimų tikslas – sukurti mažos taršos, taip vadinamosios „nulinės taršos“, biomasės terminio skaidymo sistemas panaudojant įvairius technologinius sprendinius [2]. Vystant šias technologijas pagrindinis dėmesys sutelkiamas į:

- naujų biokuro rūšių ir mišinių tyrimus bei tinkamą jų pritaikymą įrenginiams;
- biomasės deginimo technologijų tyrimus mažos, vidutinės ir didelės galios jėgainėse [3];
- naujų inovatyvių sistemų, veikiančių kombinuotu ciklu, kūrimą ir tobulinimą;
- priemonių degimo produktams valyti kūrimą ir tobulinimą [4];
- biomasės dujinimo ir pirolizės technologijų tyrimus;
- terminio skaidymo procesų ir įrenginių automatinio valdymo sistemų tobulinimą ir diegimą.

Būtina pabrėžti, kad nors sparčiai vystomos naujos biomasės panaudojimo energijai gaminti technologijos, tiesioginis biokuro deginimas dar ilgai išliks pagrindiniu būdu šilumos ir netgi elektros energijai gaminti mažos ir vidutinės galios įrenginiuose. Europos šalyse vystomi moksliniai ir taikomieji darbai bei teisinių priemonių, skatinančių biokuro naudojimą, rengimas bei diegimas patvirtina problemos ilgalaikę svarbą ir gali būti tinkamu orientyru sprendžiant Lietuvoje apsirūpinimo šilumos energija problemas.

Toliau šiame straipsnyje išsamiau nagrinėsime tik du uždavinius:

- biokuro įprastinio deginimo efektyvumo didinimą panaudojant kitų rūšių biokurą ir jų mišinius bei granuliuotą biokurą;
- degimo produktų ir tiekiamo degimui oro maišymosi procesų intensyvinimą tobulinant degimo kameras ir taikant pakopinį oro tiekimą.

REIKALAVIMAI BOKURO DEGINIMO ĮRENGINIAMS

Lietuvoje iki šiol pagrindinis dėmesys buvo sutelktas į vidutinės ir didelės galios katilų, kūrenamų biokuro, įrengimą ir tobulinimą siekiant pakeisti iškastinį kurą vietiniu kuro

ir kuo sparčiau mažinti priklausomybę nuo iškastinio kuro importo. Nuo 1993 m., kai biokuras pradėtas naudoti centralizuoto šildymo katilinėse, įrengtų katilų bendroji instaliuoti gali padidėjo iki ~ 650 MW. Tačiau kietojo biokuro naudojimas energijos gamybai sparčiai augo ne tik centralizuoto šildymo katilinėse, bet ir namų ūkiuose, kaimo vietovėse bei miestų privačių namų rajonuose. Statistiniai duomenys patvirtina, kad biokuras didžiąja dalimi vis dar naudojamas namų ūkiuose.

Tenka pripažinti, kad Lietuvoje gaminamų mažos ir vidutinės galios katilų technologinei pažangai buvo skiriamas mažokas dėmesys. Tik atskiri stambesni gamintojai, siekiantys palaikyti savo gaminių konkurencingumą kitų ES šalių rinkose, skyrė dėmesį moksliniams tyrimams ir bandymams. Taip pat nebuvo skiriamas reikiamas dėmesys teisinėms priemonėms, skatinančioms gamintojus siekti aukščiausių energetinių rodiklių, ir juos nustatyta tvarka patvirtinti. Techniniai reglamentai nenumatė vandens šildymo katilų, skirtų pastatams šildyti ir kūrenamų biokuro, reikalavimų efektyvumui ir periodiniam jo tikrinimui.

Pastaraisiais metais ši padėtis keičiasi, nes Lietuvoje gaminamiems katilams pradėtos taikyti privalomosios atitikties vertinimo standarto LST EN 303-5:2012 [5] reikalavimus procedūros. Tiesa, šios procedūros neapima visų standarto reikalavimų, tačiau vis dėlto verčia gamintojus tobulinti katilus siekiant geresnių efektyvumo ir taršos rodiklių.

Atsižvelgus į tai, būtina neatidėlioti ir tęsti teisinės bazės kūrimą siekiant:

- nustatyti vieningus reikalavimus biokuroi klasifikuoti ir jo kokybės rodikliams vertinti;
- nustatyti vieningus reikalavimus katilų efektyvumui ir jų bandymams;
- taikyti privalomąsias ir skatinamąsias priemones gamintojams, gaminantiems aukštesnio efektyvumo katilus.

Pirmajam uždaviniui išspręsti jau parengti ir įteisinti standartai, kurie sunormina kietojo biokuro klasifikavimą [6], sudaro pagrindą vienodinti reikalavimus jo kokybės rodikliams vertinti ir sąlygas kuro rinkoje.

Antrasis uždavinys sprendžiamas vadovaujantis standartu [5], kuris nustato kietuoju kuro kūrenamiems katilams reikalavimus, nurodytus 1 lentelėje.

Trečiasis uždavinys sprendžiamas taikant reikalavimus, kuriuos reglamentuoja bendrosios nuostatos dėl katilų efektyvumo didinimo ir teršalų emisijų į aplinką mažinimo, ir taip pat nacionalines priemones, pvz., Danijoje skatinamos išmokos individualių namų gyventojams, įsigyjantiems ne žemesnės kaip 3 klasės katilus.

Kai kurios šalys jau senokai pasiekė geresnius naudingumo koeficiento rodiklius, pvz., Austrija (1 pav.). Šie duomenys parodo, kad kietuoju kuro kūrenamų katilų naudingumo koeficiento vidurkis pasiekė 90 % ir labai sumažėjo jo sklaida, kuri dar 1990 m. geriausiu atveju sudarė 80 ± 10 %, o 2000 m. – 90 ± 5 %. Tai patvirtina itin išaugusį kietojo

1 lentelė. Naudingumo koeficiento reikalavimai pagal [5]

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.

kuro panaudojimo efektyvumą. Tačiau taip pat matyti, kad tolesni naudingumo koeficiento didinimo tempai labai sumažėja. Reikia laikyti, kad dabar priartėta prie situacijos, kai efektyvumas gali būti padidintas tik labai tikslingomis ir tyrimais pagrįstomis priemonėmis, įvertinus tokių priemonių ekonominį tikslingumą.

Apžvelgus bendrąją padėtį, galima teigti, kad naudingumo koeficiento gerinimą ir teršalų emisijų mažinimą apsunkina įprastinio (neparuošto) kietojo kuro deginimo mažuose įrenginiuose ypatumai:

- degimo proceso reguliavimas sudėtingas dėl jo inertiškumo ir oro degimui tinkamo tiekimo;
- vandens temperatūros reguliavimas ir periodinės įkrovos, jei tokios daromos, sukelia degimo proceso nestabilumą, kurie pasireiškia emisijų padidėjimu, palyginti su nusistovėjusiu procesu;
- medienos kuro (malkos, granulės, briketai, mišiniai...) rūšių ir jo savybių įvairovė;
- katilų tipų įvairovė.

Labai pagerina degimo procesą ir jo reguliavimą išankstiniis kietojo kuro paruošimas, pvz., granuliu ar briketų gamyba. Tai leidžia automatizuoti taip paruošto kuro tiekimą

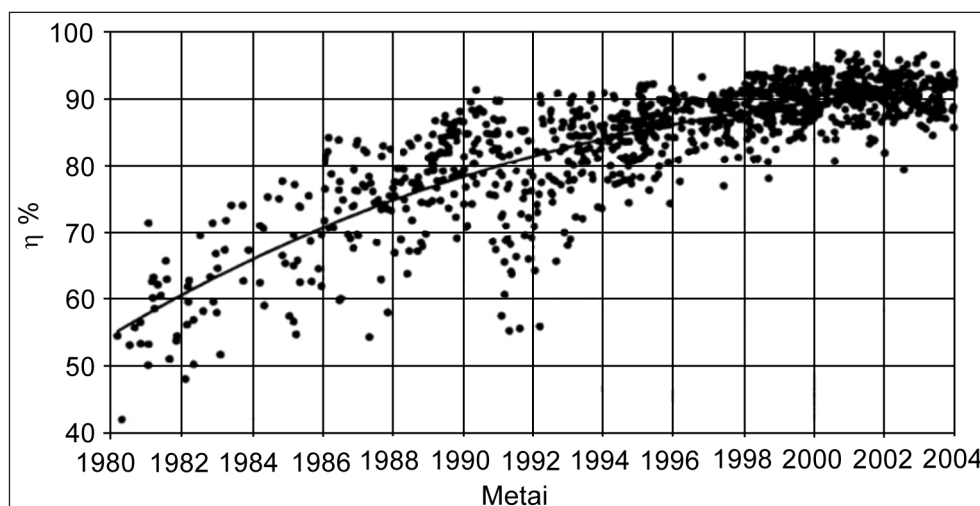
į degimo kamerą ir priartinti jo deginimą prie dujinio ar skystojo kuro deginimo proceso [8].

Reikia atkreipti dėmesį dar į vieną svarbų požymį, kuris pasireiškia kūrenant katilus kietuoju kuru, – tai labai netolygūs emisijų išmetimai į aplinką dėl nuolat kintančio degimo proceso intensyvumo, kurį lemia periodinės kuro įkrovos ir netolygus degimas dėl įkrovos pasikartojančių sukretimų. Kadangi to negalima išvengti, būtina nustatyti emisijų matavimo tvarką vykdant tokių katilų veikimo kontrolę.

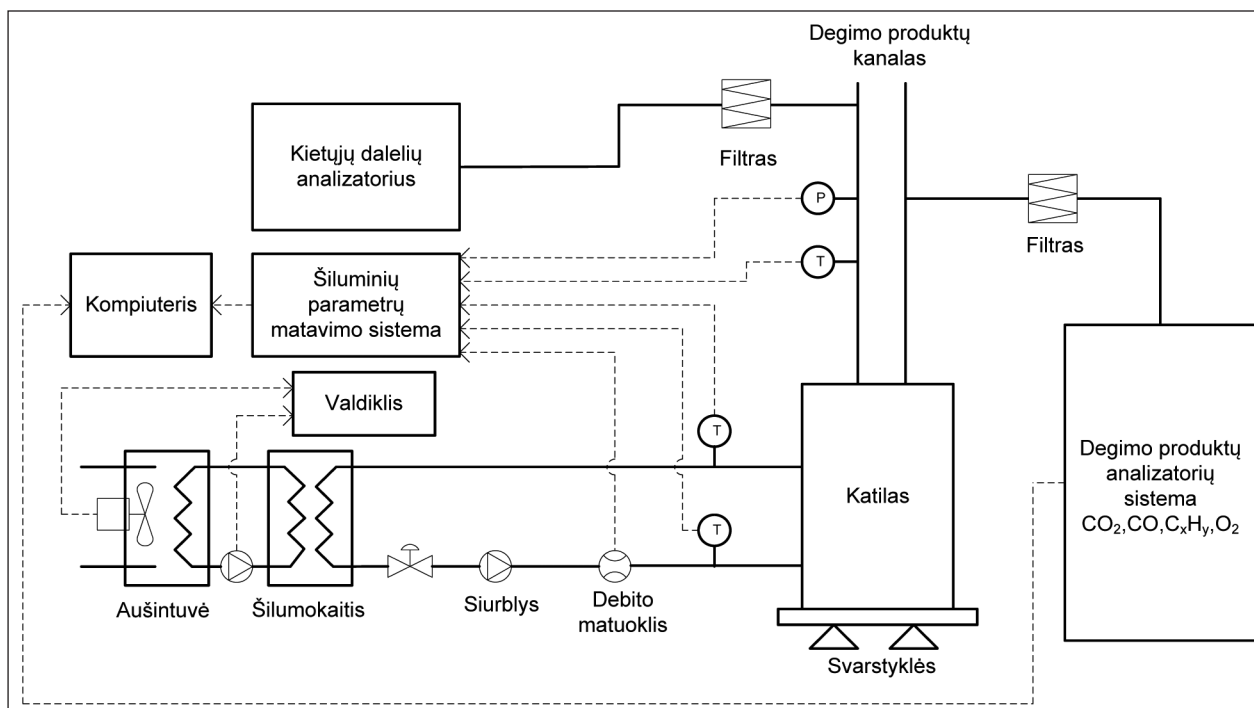
TYRIMO ĮRANGA IR METODAI

Ekspimentiniai tyrimai

Kietojo biokuro deginimo ypatumai įveda savituosius reikalavimus įrenginių tyrimams ir reikalauja sudėtingos šiuolaikiškos įrangos bei aparatūros, kuri leistų vykdyti veikimo parametrų ir pagrindinių CO , NO_x , C_xH_y emisijų nuolatinį matavimą, registravimą ir skaičiavimą. Tyrimo metu tokie matavimo rezultatai turi būti registruojami ganėtinai dideliu dažniu (rekomenduojama kas 20 s) viso tyrimo metu. Tyrimo etapo pabaigoje atliekamas surinktų rezultatų vidutinių verčių nustatymas.



1 pav. Kietojo kuro katilų, naudojamų Austrijoje [7], naudingumo koeficiento gerinimo statistiniai duomenys



2 pav. Vandens šildymo įrenginių ir prietaisų veikimo eksperimentinių tyrimų įrangos bendroji schema

Eksperimentiniai tyrimai buvo atliekami įrenginyje, kurio schema pateikta 2 pav. Tyrimų įrenginį sudaro:

- biokuro įkrovos suvartojimo sekimo ir matavimo sistema, kurioje tiriamasis objektas su biokuro įkrova įrengiamas ant elektroninių svarstyklių, užtikrinančių kuro suvartojimo matavimus su ± 20 g neapibrėžtimi;
- šilumnešio cirkuliacijos valdymo ir jo parametrų matavimo sistema, kuri įgalina įvertinti tiriamojo katilo naudingai perduodamą šilumą su $\pm 1,5$ % neapibrėžtimi;
- degimo dujų komponentų matavimo sistema, leidžianti atlikti atskirų dujų komponentų matavimus su ± 2 % neapibrėžtimi;
- kietųjų dalelių koncentracijos gravimetriniu metodu matavimo įranga, leidžianti įvertinti kietųjų dalelių koncentracijas su ± 2 % neapibrėžtimi;
- pagalbinė įranga šilumos nuostoliams į aplinką nustatyti su $\pm 1,5$ % neapibrėžtimi.

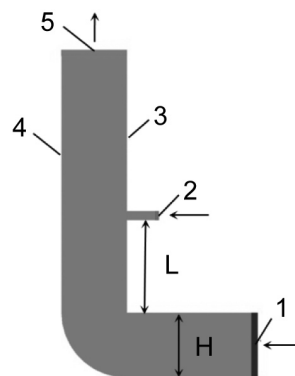
Šio įrenginio naudingumo koeficiento įvertinimo išplėstinė neapibrėžtis sudaro ± 2 % ir visiškai atitinka standarto [5] keliamus reikalavimus. Todėl, reikalui esant, šis įrenginys gali būti naudojamas vertinti Lietuvos gamintojų šildymo įrenginių atitikties reikalavimus. Nors tokie reikalavimai dabar Lietuvoje nėra taikomi, bet kitos Europos šalys saviems gaminamiems ir iš kitų šalių importuojamiems katilams jau taiko šiuos reikalavimus.

Skaitinis modeliavimas

Mažos galios kietojo biokuro katiluose vienu svarbiausių parametrų, lemiančių kuro visišką sudegimą, yra degimo produktų ir oro srautų, tiekiamų degimui, efektyvus maišymasis

visose kuro degimo stadijose. Kadangi galutinis lakiųjų dujų produktų sudeginimas vyksta degimo kameroje, tiekiant antrinį orą buvo siekiama nustatyti antrinio oro įtraukimo į degimo kamerą tinkamiausią vietą ir išsiurbiamo oro kiekį. Modeliavimas atliktas keičiant antrinio oro tiekimo vietas esant natūraliai traukai. Oro srautų temperatūra buvo priimama lygi aplinkos temperatūrai. Kiti 2 svarbūs parametrai – reikiama temperatūra degimo zonoje ir efektyviam sudegimui reikalingas laikas – nebuvo nagrinėjami.

Modeliavimui pasirinktas kietuoju biokuru kūrenamo katilo natūralios traukos degimo kameros supaprastintas dvimatis (2D) modelis (3 pav.). Skaičiavimui buvo panau-



3 pav. Kietuoju biokuru kūrenamo katilo natūralios traukos degimo kameros supaprastintas dvimatis (2D) modelis: 1 – pirminio oro ir degimo produktų įtekėjimas; 2 – antrinio oro įtekėjimas; 3 – priekinė vertikalaus kanalo dalies sienelė; 4 – užpakalinė vertikalaus kanalo dalies sienelė; L – antrinio oro įtekėjimo atstumas nuo vertikalaus kanalo pradžios, H – pirminio oro ir degimo produktų įtekėjimo kanalo aukštis

2 lentelė. Tyrimams naudoto kuro parametrai

Parametras	Medienos granulės		Uosio malkos	
	Vertė	Išplėstinė neapibrėžtis ± %	Vertė	Išplėstinė neapibrėžtis ± %
Sauso kuro viršutinis šilumingumas kJ/kg	19 863	0,33	19 433	1,31
Drėgno kuro apatinis šilumingumas kJ/kg	17 084	0,605	16 478	1,48
Peleningumas %	0,79	0,05	1,35	0,38
Visuminės drėgmės kiekis %	7,48	0,08	10,16	0,08
C (anglies) kiekis %	50,26	1,15	49,00	0,58
O (deguonies) kiekis %	42,75	0,34	42,81	0,31
H (vandenilio) kiekis %	5,88	0,43	5,84	0,33
N (azoto) kiekis %	0,18	0,32	0,27	0,28
S (sieros) kiekis %	<0,01	–	<0,01	–

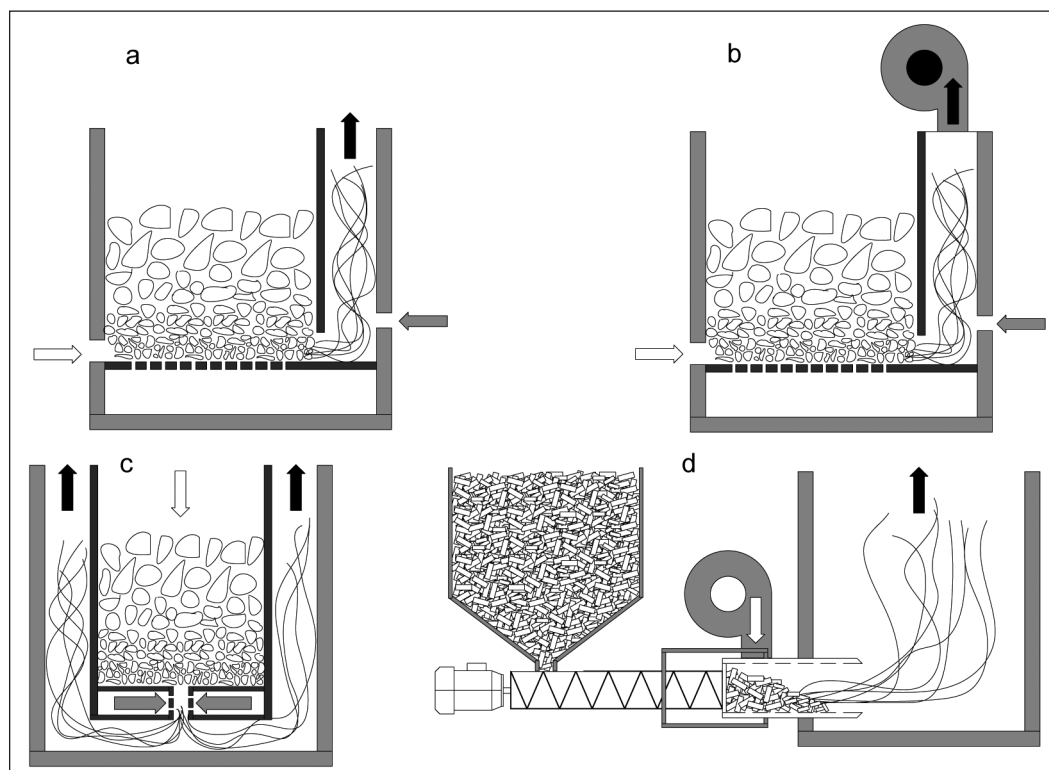
dota ANSYS FLUENT v.14.0 kompiuterinės skysčių dinamikos programa ir standartinis $k - \epsilon$ turbulentiškumo modelis.

Kanalo matmenys pasirinkti artimi realios degimo kameros matmenims: pirminio oro ir degimo produktų įtekėjimo kanalo aukštis – 0,15 m, ilgis – 0,6 m; antrinio oro įtekėjimo plyšio aukštis – 0,02 m; vertikaliuos kanalo dalies plotis – 0,15 m ir ilgis – 0,6 m. Priimta, kad slėgis įtekėjime lygus atmosferos slėgiui, slėgis ištekėjime iš degimo kameros esant natūraliai traukai pagal eksperimentinius duomenis sudaro apie 30 Pa. Antrinio oro tiekimo angos buvo išdėstomos skirtingame aukštyje nuo įtekėjimo ir skirtingose kanalo sienelėse – priekinėje ir galinėje, atsižvelgus į pagrindinio srauto kryptį.

TYRIMO REZULTATAI

Ekspimentiniai rezultatai

Ekspimentiniai efektyvumo ir emisijų į aplinką tyrimai buvo atliekami skirtingais principais veikiančiuose ~25 kW galios vandens šildymo katiluose, kūrenamuose medienos granulėmis ir malkomis, esant nuolatinei vardinei šiluminei apkrovai. Tyrimui buvo pasirinkti 4 šiuo metu ganėtinai plačiai eksploatuojami periodiškai medienos kuru įkraunami katilai. Pagal deginimo principą du iš šių katilų buvo apatinio degimo katilai (4a, b pav.), kurių vienas su natūralia, kitas su priverstine trauka, ir vienas atvirkštinio degimo katilas (4c pav.). Palyginimui pasirinktas katilas su nuolatiniu granuliuoto kuro tiekimu į atskirą degiklį, prijungtą



4 pav. Tirtų katilų schemas: a – apatinio degimo su natūralia trauka; b – apatinio degimo su priverstine trauka; c – atvirkštinio degimo; d – su granuliuojamą kuro tiekimu; \square – pirminis oras, \blacksquare – antrinis oras, \blacktriangleright – dūmų ištekėjimas

prie kietajam kurui skirtos degimo kameros (4d pav.). Pastaroji deginimo technologija turi aiškių pranašumų, tačiau reikalauja specialiai paruošto kuro.

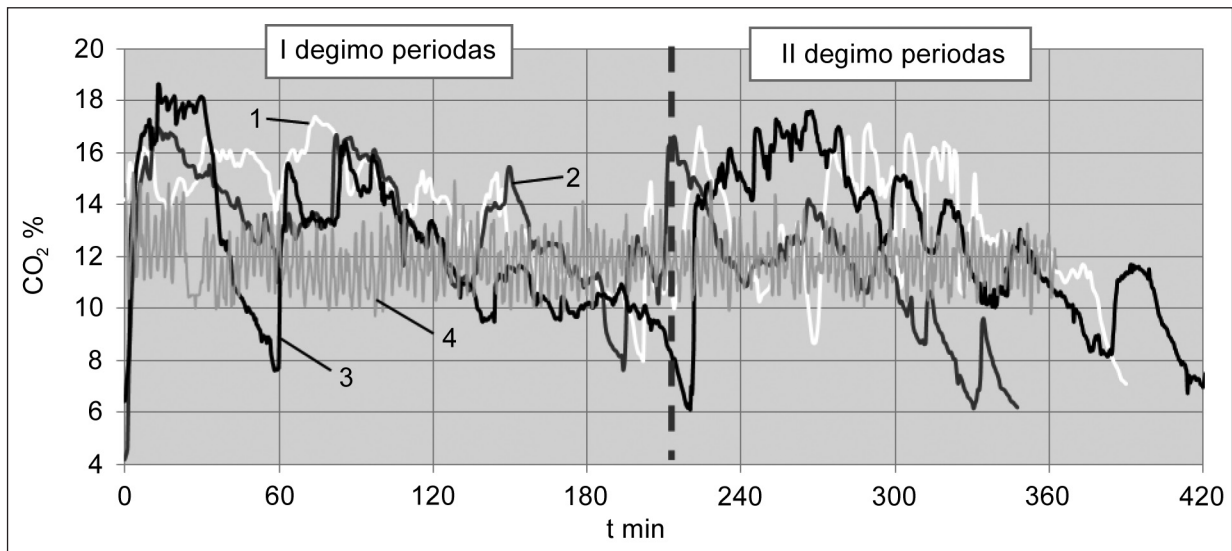
Tyrimų metu buvo naudotas kuras, kurio sudėties, šilumingumo, peleningumo ir drėgnumo tyrimo rezultatai pateikti 2 lentelėje.

Kaip matyti iš 2 lentelėje pateiktų duomenų, medienos granuliu ir malkų medienos sudėtis bei kiti parametrai buvo beveik analogiški.

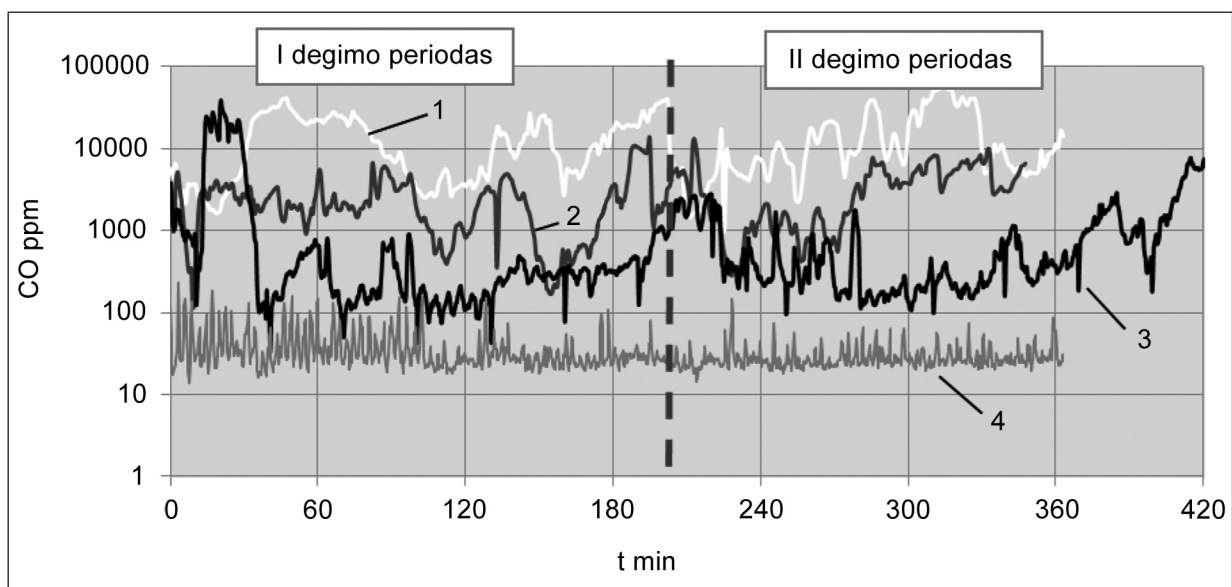
(5–7) pav. pateikti visų keturių katilų CO_2 , CO , C_xH_y koncentracijų palyginimai katilams veikiant vardine galia. Periodiškai pakraunamų katilų teršalų emisijų kiekiai buvo vertinami pagal dviejų įkrovų degimo periodus.

Pagal CO_2 reikšmes galima spręsti apie įrenginio degimo sureguliuavimo ir veikimo tinkamumą. Todėl šis parametras buvo naudojamas vietoj oro pertekliaus koeficiento ar deguonies koncentracijos matavimų. $\text{CO}_{2\text{max}}$ medienos kurui deginant be oro pertekliaus turėtų būti apie 19,2 % [9].

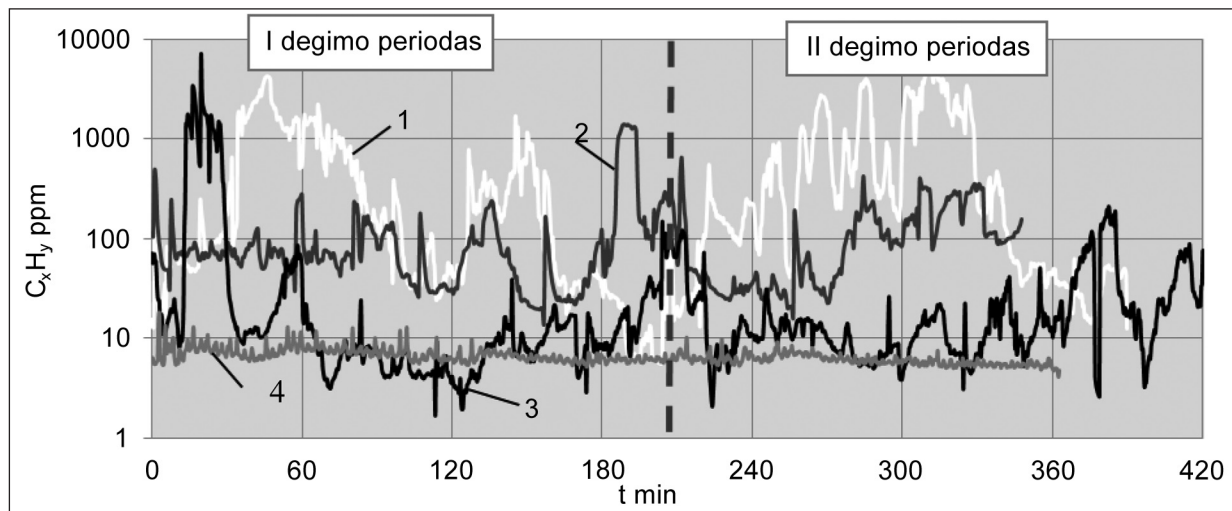
Kaip matyti 5 pav., granuliuotą kurą deginančio katilo CO_2 koncentracija viso degimo metu išsilaiko apytikriai 12 ± 1 %. Tai lemia granuliuoto kuro kokybę bei valdomas jo ir oro diegimo tiekimas į degiklį. Granules deginančio katilo CO_2 koncentracijos svyravimai atsiranda tik dėl to, kad kuras į degiklį yra tiekiamas tam tikrais intervalais. Pateikus naują kuro dozę, CO_2 koncentracija staigiai padidėja.



5 pav. Skirtingo veikimo katilų CO_2 koncentracijų kitimo palyginimas: 1 – atvirkštinio degimo; 2 – apatinio degimo su natūralia trauka; 3 – apatinio degimo su priverstine trauka; 4 – granules deginančio katilo



6 pav. Skirtingo veikimo katilų CO koncentracijų kitimo palyginimas: 1 – atvirkštinio degimo; 2 – apatinio degimo su natūralia trauka; 3 – apatinio degimo su priverstine trauka; 4 – granules deginančio katilo



7 pav. Skirtingo veikimo katilų C_xH_y koncentracijų kitimo palyginimas: 1 – atvirkštinio degimo; 2 – apatinio degimo su natūralia trauka; 3 – apatinio degimo su priverstine trauka; 4 – granules deginančio katilo

Periodiškai įkraunamuose katiluose stebimas didelis CO_2 koncentracijos kitimas rodo, kad įkrovos degimas nėra tolygus. Labiausiai CO_2 padidėja, įkrovos naują kuro įkrovą ir gerai įsidegus kurui. Tuo metu CO_2 koncentracija pakyla beveik iki maksimalios vertės ir viso degimo metu mažėja, labai netolygiai kisdama. Priklausomai nuo katilo konstrukcijos kurui išdegus, CO_2 koncentracija nukrenta iki 6–8 %. Staigius CO_2 koncentracijos padidėjimus ir sumažėjimus sukelia netolygus įkrovos degimas, kintant jos struktūrai ir pasipriešinimui įkrovai sukrentant bei netolygiai pritekant orui.

Tačiau visų tipų katilų išskiriamų CO_2 koncentracijų vidurkiai skiriasi ne itin daug – apie 1,5 %. Vis dėlto atvirkštinio degimo katilo ir apatinio degimo katilo su priverstine trauka degimo periodai yra ilgiausi. Pastarajam katilui būdingas akivaizdus CO_2 padidėjimas pradiniam degimo periodo trečdalyje susietas su intensyviu degimu, dėl kurio CO_2 beveik pasiekia maksimalias vertes.

Kaip ir buvo galima numanyti, mažiausios CO koncentracijos (6 pav.) nustatytos katilė, deginančiame granuliuotą kurą. Tai lemia kokybiškas kuras ir tinkamai sureguliuotas kuro ir oro degimui tiekimas.

Apatinio degimo katilo su priverstine trauka CO koncentracijos labai padidėja pradinio įkrovos įsidegimo metu,

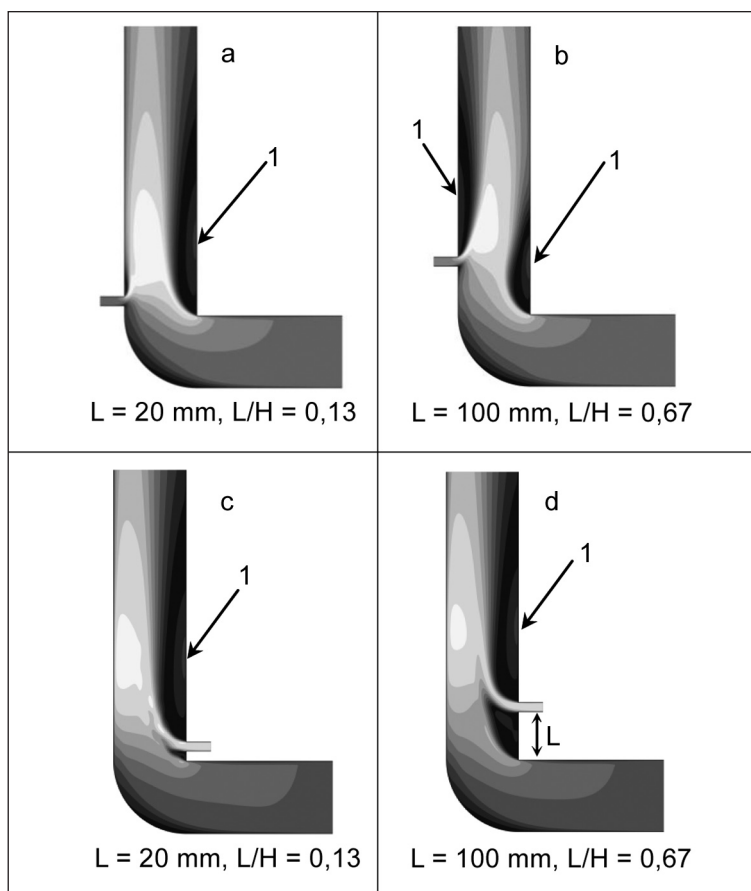
tai lemia žemoka degimo kameros temperatūra. Tačiau degimo kameroje padidėjus temperatūrai iki darbinio lygio, CO koncentracijos labai sumažėja ir tolimesnius koncentracijų pokyčius lemia ardymo būklė. Bet koks kuro sukritimas ar oro trūkumas dėl išaugusio pasipriešinimo pritekėjimams didina CO koncentracijas, nes blogina degimui tiekiamo oro sąveiką su kuru ir jo degimo produktais. Be to, pasipriešinimo padidėjimas kuro degimo zonoje esant natūraliai traukai padidina antrinio oro pritekėjimą į zoną (bus toliau parodyta).

Apatinio degimo katilas su natūralia trauka išskiria daugiau CO nei analogiškas katilas su priverstine trauka. Tačiau pradinio momentu (dėl mažesnio tiekiamo degimui oro kiekio) temperatūra degimo kameroje pasiekama aukštesnė ir CO nedidėja taip intensyviai, kaip katilė su priverstine trauka. Atvirkštinio degimo katilo CO išmetimai yra didžiausi, nors toks deginimo principas turėtų leisti pasiekti geresnių efektyvumo rodiklių ir mažesnių teršalų emisijų. Iš dalies sudegę produktai dūmuose atsiranda dėl šių pagrindinių priežasčių – netinkamo oro tiekimo degimui arba jo trūkumo ir žemos temperatūros kūrykloje.

7 pav. pateiktos angliavandenilių (C_xH_y) koncentracijų kitimo kreivės. Kaip matyti iš šių duomenų, C_xH_y kon-

3 lentelė. Skirtingo veikimo tipo katilų vidutinės taršos ir efektyvumo vertės

Katilo tipas	CO_2 %	CO ppm	C_xH_y ppm	Kietosios dalelės esant 10 % O_2 mg/m^3	Naudingumo koeficientas %
Granules deginantis katilas	11,81	36	6,6	21,5	89,8
Apatinio degimo katilas su priverstine trauka	12,39	1 508	77	75,4	84,8
Apatinio degimo katilas su natūralia trauka	12,41	2 887	125,7	82,8	82,1
Atvirkštinio degimo katilas	13,41	14 463	635	68,4	83,0



8 pav. Greičio pasiskirstymas, atsižvelgus į antrinio oro įtekėjimo atstumą (L) nuo posūkio kam-
po: *a* ir *b* – užpakalinė sienelė; *c* ir *d* – priekinė sienelė, *1* – recirkuliacinė mažo greičio zona

centracijų kitimo tendencijos išlieka tokios pat kaip ir CO koncentracijų. Dėl anksčiau minėtų priežasčių vėl matomas analogiškas koncentracijų išsiskyrimas. Atvirkštinio degimo katilo yra blogiausi rodikliai, o granuliuotą kurą deginančio katilo – geriausi.

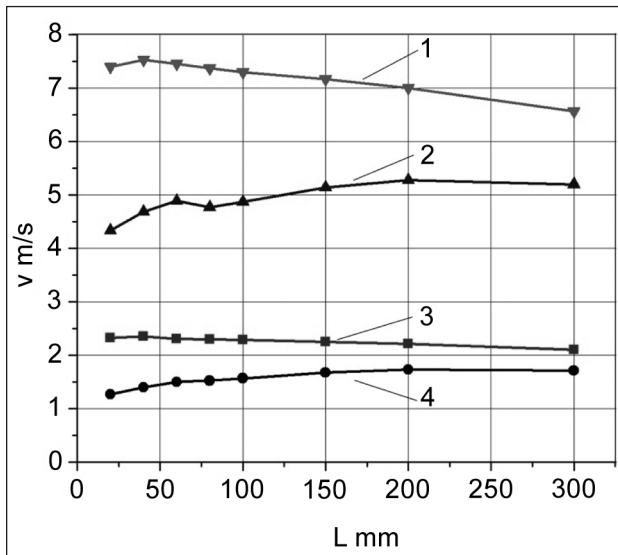
Tyrimų rezultatų apibendrinimas, pateiktas 3 lentelėje, rodo, kad granulėmis kūrenamo katilo naudingumo koeficientas labai artimas 90 % ir visų teršalų emisijos yra daug mažesnės nei katilų, periodiškai įkraunamų medienos kuru. Toks skirtumas atsiranda ne tik todėl, kad specialiai paruoštas medienos granuliuotą kurą turi geresnes savybes, bet ir tai, kad degimo procesas tinkamiausiai sureguliuotas ir efektyviai valdomas. Palyginus su 1 pav. pateiktais rezultatais, galima teigti, kad naudojant tinkamai paruoštą kurą ir deginimo technologiją jau pasiekiamas naudingumo koeficiento lygmuo, ganėtinai artimas prognozuojamai viršutinei ribai.

Kitų katilų, kūrenamų įprastiniu medienos kuru, naudingumo koeficientai kinta 82–85 %, tačiau teršalų išmetimai daug didesni nei granulėmis kūrenamo katilo. Apatinio degimo katilas su priverstine trauka pasižymi geresnėmis charakteristikomis nei katilas su natūralia trauka. Atvirkštinio degimo katilas reikalauja tobulinimo, pirmiausia, susieto su tinkamu antrinio oro tiekimu ir reikiamos tempe-

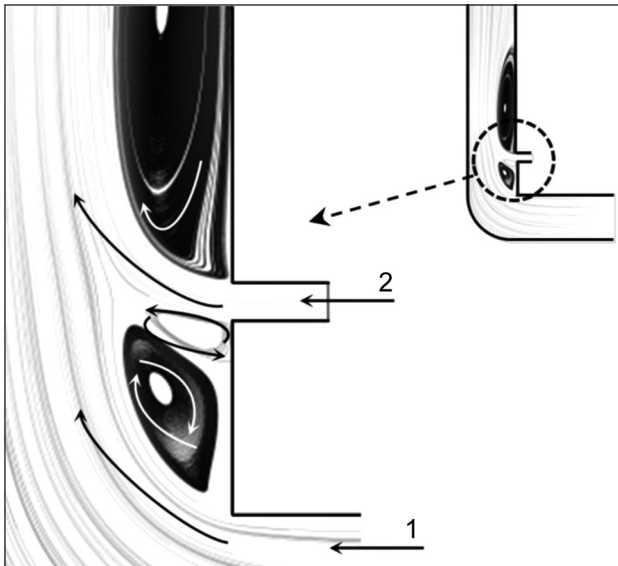
ratūros palaikymu dujinimo proceso metu pagamintoms dujoms sudeginti. Pastaroji deginimo technologija yra pažangesnė, nes, tinkamai ją suderinus, leidžia dujinti įvairios rūšies kurą ir efektyviai sudeginti pagamintas dujas atskirame degiklyje arba tiesiogiai tiekiant dujas į katilo degimo kamerą.

Skaitinio modeliavimo rezultatai

Skaitinio modeliavimo rezultatai (8 pav.) rodo, kad antrinio oro įtraukimo intensyvumas ir greičio pasiskirstymas vertikaloje kanalo dalyje labai priklauso nuo to, kurioje sienelėje (priekinėje ar užpakalinėje) ir kurioje jų vietoje yra antrinio oro tiekimo angos. Visais atvejais pagrindinis atitektantis srautas, pertekėdamas į vertikalų kanalą, dėl išcentrinų jėgų poveikio yra „prispaudžiamas“ prie užpakalinės kanalo sienelės ir jo greitis ties ja yra didžiausias. Šį poveikį sustiprina srauto atitrūkimas ties priekinės sienelės kampu. Dėl šių priežasčių antrinio oro įtraukimas slopinamas, kai ties priekine sienele įtraukimas akivaizdžiai didėja (8 ir 9 pav.). Įtraukiama į pagrindinį srautą oro srovė formuoja hidrodinaminę kliūtį, kuri sukelia pagrindinio srauto krypties ir greičio pasiskirstymo skerspjūvyje pokyčius. Už šios kliūties pradeda formotis recirkuliacinio tekėjimo zona, kuri laipsniškai besiplėsdama



9 pav. Vidutinis antrinio oro įtekėjimo greitis (v), atsižvelgus į jo įtekėjimo atstumą (L) nuo kanalo posūkio: 1 ir 3 – įtekėjimas iš priekinės sienelės; 2 ir 4 – įtekėjimas iš užpakalinės sienelės; 1 ir 2 – esant 30 Pa, 3 ir 4 – esant 3 Pa slėgiui ištekėjime



10 pav. Antrinio oro srovės, ištekancios iš angos priekinėje sienelėje, aplinkoje susiformuojanti sūkurių struktūra esant $L/H = 0,67$: 1 – pirminio oro ir degimo produktų įtekėjimas; 2 – antrinio oro įtekėjimas

perstumia pagrindinį srautą link priekinės sienelės. Kaip matyti 8a ir 8b pav., esant santykiui $L/H = 0,67$ greičio pasiskirstymas įgauna pavidalą, parodytą 8b pav., kuris išsilaiko tolinant antrinio oro įtekėjimą nuo posūkio kampo. Pagrindinio srauto poslinkis link priekinės sienelės lemia prie jos atitrūkusio srauto recirkuliacinę zoną. Nuo $L/H = 0,67$ šios zonos aukštis labai gerai koreliuoja su antrinio oro įtekėjimo aukščiu. Taigi antrinio oro įtraukimo greitis nuo užpakalinės sienelės pusės visuomet yra iš esmės mažesnis nei nuo priekinės sienelės (9 pav.), bet greičio pasiskirstymas vertikaliame kanale pasiekiamas

tolygesnis. Tai rodo geresnį pagrindinio srauto ir įtraukiamos oro srovės susimaišymą.

Antrinio oro srovės, įtraukiamos nuo priekinės sienelės, ir pagrindinio srauto sąveikos dinamiką atspindi 8–10 pav. pateikti skaičiavimo rezultatai. Matyti, kad tokiu atveju antrinio oro srovė yra tarp dviejų ganėtinai stabilių sūkurių, kurių apatinį formuoja srauto atitrūkimas aptekant kanalo posūkio kampą ir ištekanti oro srovė, kaip kliūtis pagrindiniam srautui (10 pav.).

Antrinio oro įtekėjimo angas įrengus priekinėje sienelėje (8c ir 8d pav.), susidaro daug palankesnės sąlygos antriniam orui įtekėti. Be to, srovė mažiau besimaišydama su pagrindiniu srautu nuteka link užpakalinės sienelės, o recirkuliacinė zona prie priekinės sienelės akivaizdžiai padidėja. Šiuo atveju srauto asimetriją vertikaliame kanale labai padidėja ir išsilaiko stabili nepriklausomai nuo antrinio oro angos atstumo nuo kanalo pradžios. Taip pat srovei ištekant iš priekinės sienelės, vertikalaus kanalo pasipriešinimas padidėja ir esant nuolatinei traukai bendras debitas sumažėja iki 10 %.

Pateikti duomenys rodo, kad skaitinio modeliavimo taikymas leidžia numatyti arba iš dalies išspręsti daugelį svarbių uždavinių, susietų su degimo kameros konstrukcija, antrinio oro tiekimu ir efektyviu srautų susimaišymu. Siekiant tikslinti skaitinį modeliavimą būtina prijungti cheminių reakcijų ir šilumos sklidimo (radiacija ir konvekcija) lygčių sistemas.

IŠVADOS

1. Mažos ir vidutinės galios vandens šildymo katilai su granuliuoto medienos kuro degikliais gali užtikrinti ne mažesnę kaip 90 % naudingumo koeficientą ir mažus CO , C_xH_y bei kietųjų dalelių emisijas į aplinką. Tokia biokuro deginimo technologija gali būti orientyras pertvarkant šildymo sistemas su įvairios galios katilais.

2. Malkų medienos panaudojimas periodiškai įkraunamuose katiluose (nepriklausomai nuo jų tipo: apatinio, viršutinio, ar atvirkštinio degimo) efektyvumo didinimas ir teršalų emisijų į aplinką mažinimas turi būti grindžiamas eksperimentiniais ir skaitiniais tyrimais pagrįstu pirminio ir antrinio oro tiekimo į degimo zonas nustatymu, tinkamo temperatūros režimo išlaikymu ir reikiamos kuro buvimo degimo zonoje trukmės užtikrinimu. Labiausiai oro tiekimo reguliavimas reikalingas įsidedant naujai įkrautam kurui ir baigiantis įkrovos degimui. Antrinio oro priverstinis tiekimas leidžia pasiekti geresnių veiksmingumo rodiklių.

3. Atvirkštinio deginimo principas, kuriuo siekiama išnaudoti kuro dujinimo ir gautų dujų deginimo pranašumų, leidžia pasiekti geresnių efektyvumo rodiklių ir mažesnių teršalų emisijų, bet reikalauja tinkamos konstrukcijos degimo kameros ir efektyvaus antrinio oro tiekimo užtikrinant

visišką sudegimą. Apskritai kuro dujinimas yra perspektyvus metodas, nes galima panaudoti įvairios rūšies biokurą dujinant jį atskiruose įrenginiuose ir deginant įprastinių įrenginių degimo kameroje.

4. Siekiant teikti vartotojams objektyvią informaciją apie gaminamų katilų, kūrenamų biokuru, charakteristikas, būtina nustatyti efektyvumo ir išmetamų teršalų reikalavimus pagal Europoje galiojančius standartus [5, 6]. Atitiktis šiems reikalavimams turi būti patvirtinama trečiosios šalies atitinkamu ženklinimu. Biokurą būtina sertifikuoti, nes jo sudėtis ir kokybiniai rodikliai turi esminį poveikį degimo proceso efektyvumui.

PADĖKA

Tyrimą finansuoja Lietuvos mokslo taryba (sutarties Nr. ATE-02/2012).

Gauta 2013 03 20
Priimta 2013 05 08

Literatūra

1. *Kuro ir energijos balansas 2011*. Lietuvos statistikos departamentas. Vilnius, 2012.
2. Obernberger I. The present state and future development of industrial biomass combustion for heat and power generation. *Proceedings of ASME-ATI-UIT 2010 Conference on Thermal and Environmental Issues in Energy Systems, Sorrento, Italy, 16–19 May 2010*.
3. Obernberger I., Thek G. Combustion and gasification of solid biomass for heat and power production in Europe – state-of-the-art and relevant future developments. *Proceedings of the 8th European Conference on the Industrial Furnaces and Boilers, Vilamoura, Portugal, April 2008*.
4. 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 in IEA Bioenergy Task32 Member Countries*. Graz, Austria, December 2011.
5. LST EN 303-5: 2012. Šildymo katilai. 5 dalis. Rankomis ir automatiškai pakraunami kieto kuro šildymo katilai, kurių atiduodamoji šiluminė galia iki 500 kW. Terminijos reikalavimai, bandymai ir ženklinimas.
6. LST EN 15359: 2012. Kietasis atgautasis kuras. Techniniai reikalavimai ir klasės.
7. *European Wood-Heating Technology Survey: An Overview of Combustion Principles and the Energy and Emissions Performance Characteristics of Commercially Available Systems in Austria, Germany, Denmark, Norway, and Sweden. Final Report 10–01*. Albany, New York: New York State Energy Research and Development Authority, April 2010.
8. Tissari J., Lyyraanen J., Hytoonen K. Fine particle and gaseous emissions from normal and smouldering wood combustion in a conventional masonry heater. *Atmospheric Environment*. 2008. Vol. 42. Issue 34. P. 7862–7873.
9. Murari M. R., Kenny W. C. An experimental study of combustion and emissions of biomass briquettes in a domestic wood stove. *Applied Energy*. 2012. Vol. 99. P. 206–212.

Tomas Vonžodas, Nerijus Pedišius, Mantas Valantinavičius

INVESTIGATION OF PERFORMANCE PARAMETERS OF LOW CAPACITY WATER BOILERS BURNING BIOFUEL

Summary

Efficiency and emissions of small-scale water boilers operating on various principles and fired with wood fuel were experimentally investigated. It is shown that usage of wood pellets in small-scale appliances allows to achieve at least 90% efficiency and minimum emissions into the environment. Use of wood logs in manually stoking boilers highly depends on proper combustion chamber design, selection location of the secondary air supply and support of suitable temperature regime.

The air supply adjustment is mostly needed at the ignition stage of newly charged fuel and at the end of charge combustion. The under-burning (inverse) combustion principle, which allows to use benefits of the fuel gasification and combustion of formed gas, leads to better efficiency and lower emissions, but requires proper design of combustion chambers and efficient supply of secondary air to ensure complete combustion.

The numerical modeling of secondary air supply to the combustion chamber of under-burning type at natural draft conditions was performed. This modeling allows to select the most suitable air supply locations, furnace design and to analyze flow mixing processes.

Key words: solid biofuel, wood fuel, water heating boilers, efficiency, pollution

Томас Вонжодас, Нериус Пядишюс,
Мантас Валантинавичюс

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЬНЫХ КОТЛОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ, СЖИГАЮЩИХ БИОТОПЛИВО

Резюме

Экспериментально исследована эффективность и выбросы загрязнений в окружающую среду различного типа водонагревательных котлов малой мощности, сжигающих древесное топливо. Показано, что использование гранулированного топлива в котлах малой мощности позволяет достичь эффективности не менее 90 % и минимального уровня выбросов. Эффективность использования дров в периодически загружаемых котлах во многом зависит от конструктивного исполнения камеры сжигания, выбора места подачи вторичного воздуха и поддержания температурного режима. Регулировка подачи воздуха наиболее важна на начальной стадии возгорания загруженного топлива стадии его выгорания. Принцип придонного сжигания, в котором используются достоинства газификации топлива и дальнейшего его сжигания, позволяет достичь лучших показателей эффективности и выбросов. Однако, этот метод требует повышенного внимания исполнению конструкции камеры дожигания газифицированного топлива и эффективной подачи вторичного воздуха для обеспечения полного сгорания.

В работе также представлены результаты численного моделирования вовлечения вторичного воздуха в основной поток при наличии натуральной тяги в котлах с придонным сжиганием. Моделирование позволяет подобрать наиболее подходящее расположение мест подачи вторичного воздуха, конструкцию камеры сжигания, а также детально анализировать процессы смешивания потоков.

Ключевые слова: биотопливо, древесное топливо, водонагревательные котлы, эффективность выбросов