

Kietojo kuro degimo sluoksnyje eksperimentinis tyrimas

**Andrius Kavaliauskas,
Vladislovas Katinas**

*Lietuvos energetikos institutas,
Atsinaujinančių energijos šaltinių
laboratorija,
Breslaujos g. 3,
LT-44403 Kaunas, Lietuva*

**Anker Jensen,
Peter Arendt Jensen**

*Technical University of Denmark,
Research Centre Combustion and
Harmful Emission Control
Kgs. Lyngby 229,
DK-2800 Denmark*

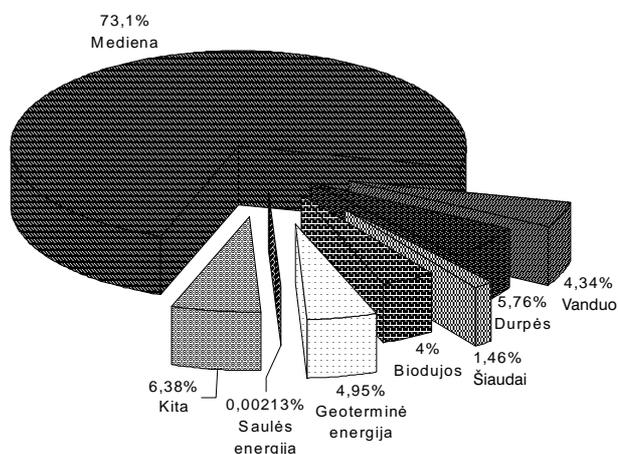
Sluoksninės kūryklos yra dažniausiai naudojama kietojo kuro deginimo technologija. Kietojo kuro degimas tokiose kūryklose susideda iš kelių fizikinių bei cheminių reiškinų, vadinamų termocheminiais procesais. Atlikti degimo nejudančio kuro sluoksnio kūrykloje, naudojant šiaudus, eksperimentiniai tyrimai. Tirta pradinių sąlygų (oro kiekio, temperatūros, kuro drėgmės bei deguonies koncentracijos ore) įtaka degimo kietojo kuro sluoksnio kūrykloje proceso charakteristikoms (liepsnos fronto greičiui, sluoksnio temperatūrai bei išmetalų susidarymui), naudojantis CHEC laboratorine įranga. Gauti eksperimentiniai rezultatai įgalina paaiškinti termocheminių procesų kuro sluoksnyje mechanizmus, rezultatus galima pritaikyti optimizuojant degimo procesą bei išmetalų kiekio mažinimo realiose kūryklose/pakurose klausimams spręsti, taip pat tobulinant matematinius modelius.

Raktažodžiai: biomasė, degimas, kuro sluoksnis, išmetalai

1. ĮVADAS

Iki šiol didžiąją kuro, sunaudojamo energetikoje, šilumai bei elektros energijai gaminti, dalį sudaro importuojamas kuras: branduolinis, dujos, naftos produktai, anglis [1]. Tačiau dėl didėjančio klimato atšilimo reiškinio, kurį sukelia energetikoje, transporto bei kitų pramonės technologinių procesų metu į aplinką išmetami teršalai, pradėta skatinti intensyviau naudoti atsinaujinančius energijos šaltinius (AEŠ), ypač energetikoje [1, 2].

Biomasė (mediena, jos atliekos, šiaudai) – viena potencialiausių AEŠ rūšių Lietuvoje. 2003 m. ji sudarė didžiausią dalį (apie 74%) šių šaltinių energetikoje pagal įrengtą šiluminę galią, per 250 MW_s (1 pav. [3, 4]), 2004 m. numatoma viršyti 300 MW_s galią. Lietuvoje biomasė daugiausia naudojama šilumos gamybai iki 10 MW_s galios katilinėse tiesiogiai deginant kurą sluoksninėse kūryklose. Jose kuro sluoksnis dega ant ardyno, tiekiant pirminį orą iš apačios ir antrinį orą virš kuro sluoksnio nevisiško degimo produktams sudeginti. Kietojo kuro sluoksnio degimo procesas yra gana sudėtingas (2 pav.), susidedantis iš skirtingų fizikinių bei cheminių (vadinamųjų termocheminės konversijos) procesų, to-

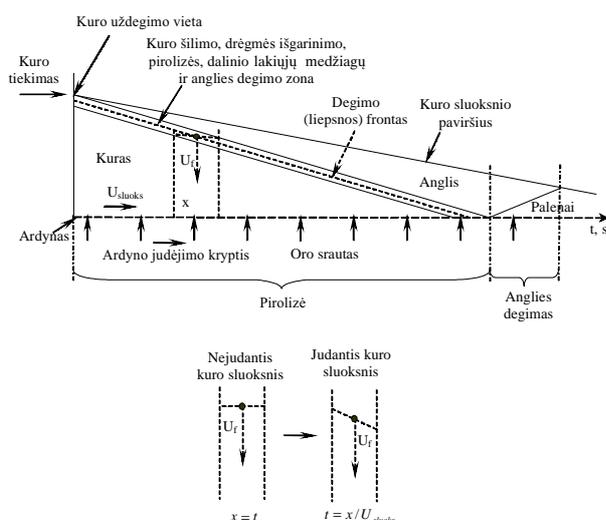


1 pav. Atsinaujinančių energijos šaltinių balansas 2003 m. pagal instaliuotą šiluminę galią [4]

kių kaip kuro drėgmės išgarinimas, pirolizė (lakiųjų medžiagų išsiskyrimas ir anglies susidarymas), lakiųjų medžiagų bei dalinis anglies degimas ir galutinis likusios anglies sudegimas. Neorganiniai junginiai (pelenus formuojantys junginiai) dalinai lieka ant ardyno, pašalinami į pelenų surinkimo konteinerį ar iš kūryklos su dūmais. Termocheminės konversijos

procesai labai priklauso nuo pradinių sąlygų: biomasės kuro rūšies, kai savybės gali ženkliai skirtis (ypač azoto, chloro, kalio ir sieros, drėgmės bei lakiųjų medžiagų kiekiu), tiekiamo oro kiekio, temperatūros ir kt., kurios atitinkamai turi įtakos degimo charakteristikoms (liepsnos fronto greičiui, temperatūrai ir dujinių junginių susidarymui), kartu lemia degimo stabilumą bei kuro konversijos efektyvumą.

Literatūroje skelbiami eksperimentiniai darbai apie kietojo kuro sluoksnių degimą atlikti, naudojant nejudančio ardyno tipo kūryklą, kurioje vykstantys termocheminiai procesai yra analogiški praktikoje dažniausiai naudojamoms judančio sluoksnių tipo kūrykloms/pakuoms (2 pav.). Pirmieji tokio tipo eksperimentai buvo atlikti prieš daugiau nei 85 metus. Tuomet kurui buvo naudojamos daugiausia akmens anglis ir koksas [5–7], vėliau buitinės atliekos ir išpaudos [8–13], o prieš dešimtmetį – biomasė [13–19]. Skelbiama tik keletas darbų, kuriuos atliekant naudoti šiaudai [18, 19]. Darbe [18] buvo atlikti eksperimentai žaidro tipo kūrykloje, naudojant šiaudų ryšulius. Gautus rezultatus pritaikė tobulinant vienmatį matematinį modelį, kuris parodė gana gerą sluoksnių temperatūrų bei dujų koncentracijų sutapimą su eksperimentiniais rezultatais. Pastebėta, kad degiklio darbui daugiausia įtakos turėjo kuro sluoksnių tankio nevienodumas. Darbe [19] tirta oro kiekio ir temperatūros įtaka degimo procesui nejudančio kuro sluoksnių kūrykloje, naudojant susmulkintus šiaudus bei šiaudų granules. Gautus rezultatus pritaikė tobulinant dvimatį matematinį modelį. Rezultatai parodė, kad oro šildymas turi didelę įtaką liepsnos fronto greičiui, o ne sluoksnių temperatūroms. Vienas eksperimentas buvo atliktas naudojant šiaudų granules. Jo metu nustatyta, kad lieps-



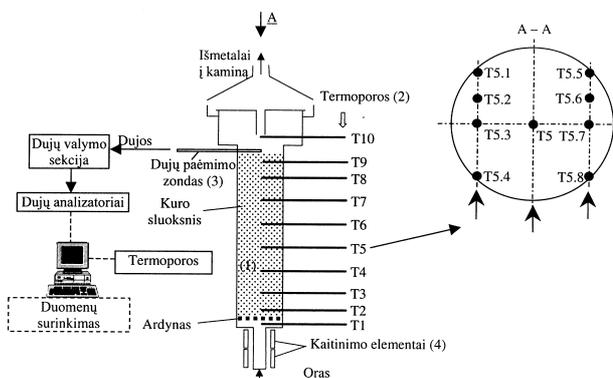
2 pav. Kietojo kuro degimo nejudančio kuro sluoksnių tipo kūrykloje ir judančio kuro sluoksnių tipo kūrykloje analogija

nos fronto greitis kur kas didesnis, palyginti su susmulkintais šiaudais. Visi eksperimentai darbe [19] buvo atlikti naudojant skirtingas pradines sąlygas, todėl nepakanka kiekybiškai paaiškinti jų įtakos termocheminės konversijos procesams kietojo kuro sluoksnyje.

Šio darbo tikslas – kietojo kuro sluoksnių degimo eksperimentinis tyrimas, kurio metu nustatyti oro srauto greičio, temperatūros, deguonies koncentracijos į kūryklą tiekiamame ore bei kuro drėgnumo įtaką liepsnos fronto greičiui, kuro sluoksnių temperatūrai bei išmetamųjų (CO, CO₂ ir NO) susidarymui. Tokia kietojo kuro sluoksnių degimo analizė yra naudinga optimizuojant degimo procesus, nustatant išmetamųjų susidarymo mechanizmus bei išmetamųjų kiekių mažinimo būdus.

2. EKSPERIMENTINIS STENDAS IR PROCEDŪRA

Eksperimentiniai tyrimai buvo atliekami naudojant cilindrinę 15,4 cm skersmens ir 120 cm aukščio laboratorinę nejudančio kuro sluoksnių kūryklą (3 pav.) CHEC mokslinių tyrimų centre. Kūryklą susideda iš vertikalaus cilindro – degimo kameros (1) su akryta plokšte – ardynu kūryklos apačioje tiekiamam orui tolygiai paskirstyti į kuro sluoksnių. Degimo kamera iš išorės izoliuota 10 cm storio stiklo vata. Termoporos (2) išdėstytos išilgai kuro sluoksnių kas 10–15 cm. Viena termopora (T1) yra žemiau ardyno įeinančio oro temperatūrai ir kita (T10) išeinančių dujų temperatūrai matuoti. T5 pozicijoje yra galimybė išdėstyti daugiau termoporų detalesniam temperatūrų laukui matuoti šiame kuro sluoksnių skerspjūvyje. Kuras kraunamas iš viršaus suformuojant apie 1 m aukščio sluoksnių. Žemiau ardyno įrengti elektriniai šildymo elementai įgalina pašildyti į kūryklą tiekiamą orą iki 300°C temperatūros (4). Keletą centimetrų virš kuro sluoksnių yra įmontuotas dujų paėmimo zondas (3), kuriuo degimo produktai tiekiami į analizės stendą deguonies (O₂), anglies monoksido (CO) ir



3 pav. Eksperimentinio stendo schema

dioksido (CO₂) bei azoto oksidų (NO) koncentracijoms matuoti. Oras į kūryklą tiekiamas iš apačios, o kuras uždegamas iš viršaus, todėl liepsnos frontas juda žemyn – kryptimi, priešinga oro srauto kryptčiai. Eksperimentų metu matuojami parametrai (temperatūrų pasiskirstymas kuro sluoksnyje bei dujų O₂, CO, CO₂ ir NO koncentracijos degimo produktuose) fiksuojami naudojant kompiuterinę programą LabVIEW 7.

Degimo eksperimentams buvo naudojami susmulkinti šiaudai. Šiaudų savybės pateiktos 1 lentelėje. Specialia pjaustymo mašina šiaudai buvo susmulkinti iki 4 mm dydžio dalelių ir po to išsijoti per 2 mm sietą. Šiaudų kuro dalelės (ilgis 2–4 mm, storis 0,10–0,50 mm) buvo stačiakampio formos. Kūrykloje buvo nuo 1,6 iki 2,5 kg kuro vienam eksperimentui. Pradinės eksperimentų sąlygos buvo keičiamos (žr. 2 lentelę). Oras buvo šildomas iki reikiamos temperatūros prieš tiekiant jį į kūryklą. Kuro drėgmė buvo keičiama paliekant kurą patalpoje džiūti natūraliomis sąlygomis, arba kuras buvo papildomai sudrėkinamas. Deguonies koncentracija tiekiamame į kūryklą ore buvo keičiama papildomai pridėdant deguonies arba molekulinio azoto (N₂).

Prieš pradėdant kiekvieną naują eksperimentą, visi dujų analizatoriai buvo kalibruojami, keičiami filtrai, atliekama dujų paėmimo bei analizės sistemų san-

darumo patikra. Atliktas eksperimentų kartotinumų testas parodė, kad kuro sluoksniu temperatūrų ir dujų koncentracijų degimo produktuose matavimų vidutinė kvadratinė paklaida sudaro atitinkamai 2 ir 13%.

3. EKSPERIMENTŲ REZULTATAI IR ANALIZĖ

Eksperimentų rezultatai susideda iš temperatūrų matavimo kuro sluoksnyje bei dujų koncentracijų matavimo išeinančiuose dūmuose, virš kuro sluoksniu. Taria, kad liepsnos fronto greitis lygus atstumui tarp termoporų, padalytam iš laiko, kurį liepsnos frontas praeina nuo vienos termoporos iki kitos, pasiekus 400°C temperatūrą.

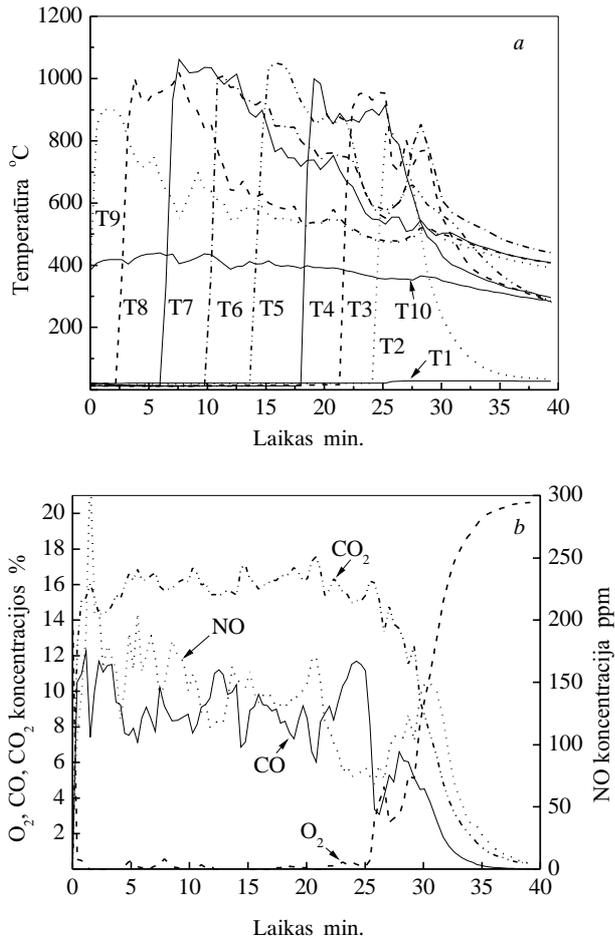
3.1. Sluoksniu temperatūra ir dujų koncentracijos

4 pav. pateikti temperatūrų bei dujų koncentracijų matavimo, degant susmulkintiems šiaudams nejudančiame kuro sluoksnyje, tiekiant orą 0,18 kg/(m²s) greičiu, grafikai. Po kuro uždegimo sluoksniu viršuje susidarius liepsnos frontui, per 1,8 min. sluoksniu temperatūra pakilo nuo kambario temperatūros (20°C) iki 910°C (4 pav., a, T9). Kai liepsnos frontas praėjo termoporą T9, temperatūra kūrykloje virš kuro sluoksniu sumažėjo iki 300–400°C dėl šilumos nuostolių į kūryklos sienes. Tačiau temperatūra išlieka gana aukšta dėl susidariusių karštų dujų, kylančių iš žemyn judančio reakcijos fronto. Toks pat temperatūros pokytis pastebimas ir kituose, žemesniuose, kuro sluoksniuose. Liepsnos frontas pasiekia ardyną per 25 min. Po vienos minutės T3 pozicijoje temperatūra vėl pradeda kilti. Čia pirolizės procesas jau baigėsi, visos kure esančios lakiosios medžiagos išsiskyrė ir sudegė liepsnos fronte (reakcijos zonoje), todėl pradeda degti kure likusi anglis. Anglies degimo zonoje liepsnos frontas juda iš apačios į viršų, į kūryklą tiekiamo oro kryptimi.

Pirolizės pradžia priimta laikyti, kai liepsnos frontas praėjo pirmą ter-

1 lentelė. Kuro savybės		
Kuras		Susmulkinti šiaudai
Bendroji kuro analizė %	Drėgmė	9,6
	Lakiosios medžiagos	68,3
	Pelenai	4,27
	Anglis	17,83
Kuro šiluminė vertė MJ/kg		15,87
Elementinė analizė % (sausos masės)		
	C	47,11
	H	6,29
	O (pagal skirtumą)	44,2
	N	0,788
	S	0,129
	K	1,30
	Cl	0,188

2 lentelė. Pradinės sąlygos						
Kuras	Kuro dalelės dydis mm	Kuro sluoksniu tankis kg/m ³	Oro srauto greitis kg/(m ² s)	Į kūryklą tiekiamo oro temperatūra °C	Į kūryklą tiekiamo oro deguonies koncentracija %	Kuro drėgnumas %
Susmulkinti šiaudai	2–4	80–135	0,065–0,63	20–230	15–40	7,5–13,5



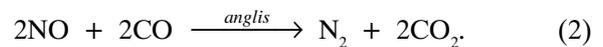
4 pav. Temperatūrų pasiskirstymas kuro sluoksnyje (a) ir degimo produktų koncentracijos (b) degimo metu. Oro srauto greitis 0,18 kg/(m²s)

moporą T9, ir pabaiga, kai pasiekama paskutinė termopora T2 atitinkamai 400°C temperatūroje (3 pav.). Degimo proceso pabaiga yra, kai deguonies koncentracija pasiekia 20,5%. Tuomet anglies degimo zona lygi degimo pabaigos ir pirolizės laiko skirtumui.

Dujų koncentracijų grafike matyti (4 pav., b), kad po kuro uždegimo praėjus 1 min. deguonies koncentracija sumažėja nuo 21 iki 0%. Deguonis sunaudojamas lakiųjų medžiagų oksidacijos procese reakcijos zonoje. Tuo pat metu susidariusių CO, CO₂ ir NO koncentracijos pakyla atitinkamai nuo 0 iki 9,7%, 15% ir 193 ppm bei lieka pastovios pirolizės zonoje.

Kai liepsnos frontas pasiekia ardyną, CO koncentracija 25 minutę pirolizės zonoje akimirksniu sumažėja iki 3%. Prasidėjus anglies degimo zonai, sumažėja oro su kuru santykis, todėl padidėjus oro pertekliui, daugiau deguonies tenka oksidacijos reakcijai su CO. Kadangi CO oksidacija su deguonimi yra gerai žinoma kaip sąlyginai lėtas procesas (išskyrus atvejį, kai reakcijos zonoje yra vandenilio ato-

mų turinčių junginių) bei tam reikalinga ne mažesnė nei 800°C temperatūra [20], po kelių minučių CO koncentracija padidėjo iki 6%. Tai lėmė ne tik temperatūros sumažėjimas iki 700°C (4 pav., a) dėl šilumos nuostolių į kūryklos sienes, bet ir dujų atskiedimas virš reakcijos zonos dėl didesnio oro pertekliaus. CO₂ koncentracija anglies degimo zonoje lėtai mažėja dėl didėjančio oro pertekliaus. NO koncentracija sumažėja nuo 160 iki 80 ppm dar pirolizės zonoje (22-ąją min.). Tai būtų galima paaiškinti keliomis priežastimis: redukcijos reakcija su anglimi (1) [21, 22], katalizinė redukcijos reakcija su CO ant anglies paviršiaus (2), taip pat dėl galimų redukcijos reakcijų su angliavandeniliais (C_xH_y) bei pelenuose esančių neorganinių junginių (metalų) katalizinių savybių [22].



Apie 80% kure esančio azoto išsiskiria pirolizės metu kaip tarpiniai junginiai NH₃, HCN bei HNCO [22] ir toliau oksiduojasi į NO arba N₂, priklausomai nuo degimo sąlygų kuro sluoksnyje. Tačiau 4b pav. matyti, kad NO koncentracija padidėja iki 140 ppm anglies degimo zonoje. Pasibaigus pirolizės procesui, anglyje likęs azotas gali taip pat oksiduotis į NO (3) bei redukuotis pagal minėtas reakcijas anglies degimo zonoje. Tačiau temperatūra kūrykloje yra gana žema ir jos nepakanka redukcijos reakcijoms:



Anglis sudegė po 13 min., kai deguonies koncentracija pasiekė aplinkos oro koncentraciją 21%, o CO, CO₂ ir NO dujų koncentracijos sumažėjo iki 0%.

3.2. Pradinių sąlygų įtaka degimo charakteristikoms

Liepsnos fronto temperatūra yra išmatuotų temperatūrų sluoksnyje vidutinė reikšmė bei dujų koncentracijos yra išmatuotos vidutinės koncentracijos pirolizės zonoje.

3.2.1. Oro kiekio įtaka

Oro su kuru santykis (arba oro pertekliaus koeficientas λ) yra svarbus parametras degimo procesui reguliuoti. Akivaizdu, kad tiekiant nepakankamai oro, susidarę nevisiško degimo produktai (CO, C_xH_y ir kt.) bus pašalinti į atmosferą, arba dalis nesudegusio kuro liks pelenuose. Šitaip teršiama aplinka, mažėja katilo ilgaamžiškumas bei naudingumo koeficientas.

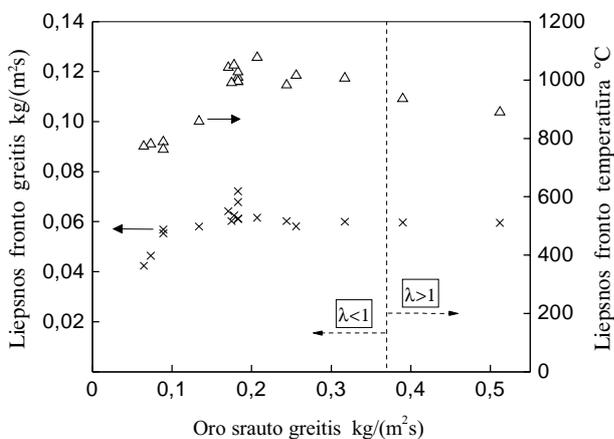
5 pav. pavaizduota oro srauto greičio įtaka liepsnos fronto greičiui bei temperatūrai pirolizės zonoje, naudojant susmulkintus šiaudus. Didinant nuo 0,065 iki 0,09 kg/(m²s) oro srauto greitį, liepsnos frontas padidėja atitinkamai nuo 0,042 iki 0,06 kg/(m²s). Toliau didėjant oro srauto greičiui, liepsnos fronto greitis išlieka pastovus. Tiekiant į kūryklą orą ir prieš uždegant kurą iš viršaus, kuro sluoksnio paviršiuje buvo pastebėti susidarę oro kanalai. Esant didesniam nei 0,32 kg/(m²s) oro greičiui smulkios kuro dalelės buvo išpučiamos iš kūryklos. Tokiomis sąlygomis, ypač sudegus daliai kuro, kuro sluoksnis pradeda tarsi maišytis – „virti“, tampa nestacionarus. Jei oro srauto greitis būtų pakankamas suformuoti „verdantį“ sluoksnį, tuomet oras geriau susimaišytų su kuru ir taip būtų sudaromos geresnės sąlygos degimo procesams. Geresnis oro ir kuro susimaišymas gali būti priežastis pastovaus liepsnos fronto greičio pirolizės zonoje atveju. Tačiau naudojant didesnę nei 0,32 kg/(m²s) oro srauto greitį, sąlygos neatitinka degimo procesų nejudančio kuro sluoksnio atveju, kuris nagrinėjamas šiame darbe, todėl eksperimentų rezultatai šiomis sąlygomis turėtų būti vertinami atsizvelgiant į vizualiai pastebėtus reiškinius eksperimentų metu. Kita vertus, jie gali būti visiškai naudojami degimo procesams, vykstantiems realiose kūryklose, kuriose kuro sluoksnio maišymasis bei oro kanalų susidarymas labai tikėtinas ir kuro degimo procesai gali vykti skirtingose sluoksnio vietose. Naudojant 0,065 kg/(m²s) oro srauto greitį buvo sunku uždegti kurą, tačiau liepsnos frontas susiformavo ir judėjo žemyn. Todėl mažiausias kritinis oro srauto greitis gali būti dar mažesnis liepsnos frontui suformuoti. Kuras neužsidegs, kai reakcijos zonoje bus pasiektas šilumos išsiskyrimo degant lakiosioms medžiagoms ar anglies oksidavimo, šilumos pernešimo dar nesudegusiam kurui ir konvekciniio aušinimo į kūryklą tiekiamu oru balansas. Esant mažesniai oro srauto greičiui, oro pernešamas šilumos kiekis yra

sąlyginai mažas, palyginti su kiekiu šilumos, išsiskyrusios kuro oksidacijos metu, bei šilumos pernešimo laidumu į žemiau esantį šviežio kuro sluoksnį. Naudojant didesnę oro srauto greitį, šilumos kiekis, pernešamas oro srautu, tampa sąlyginai didesnis už kiekį šilumos, išsiskyrusios kuro oksidacijos metu, ir todėl liepsnos fronto greitis mažėja.

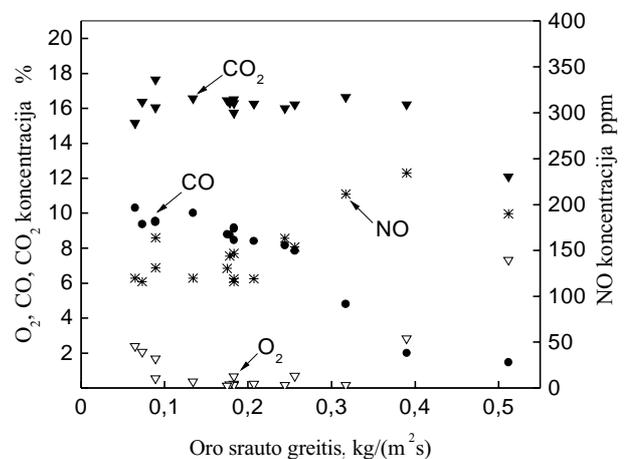
Didžiausias naudojamas oro srauto greitis buvo 0,51 kg/(m²s). Esant tokiam oro srauto greičiui daug kuro dalelių buvo išnešama iš kūryklos, tačiau kurą dar buvo galima uždegti dėl gero oro ir kuro susimaišymo. Todėl maksimalus kritinis oro srauto greitis degimo procesui vykti šiaudų sluoksnyje gali būti didesnis.

Didinant oro srauto greitį, liepsnos fronto temperatūra (5 pav.) padidėja nuo 740 iki 1070°C. Aki vaizdu, kad naudojant didesnę oro kiekį, daugiau deguonies tiekama į reakcijos zoną ir vyksta pilnesnis kuro sudegimas. Taigi reakcijos zonoje išsiskiria daugiau šilumos, kuri toliau pernešama spinduliuote ir konvekcija/laidumu į žemesnius kuro sluoksnius, taip spartinant tokius fizikinius procesus, kaip kuro šilumą, drėgmės išgarinimą bei lakiųjų medžiagų išsiskyrimą, atitinkamai didėja liepsnos fronto greitis. Tiekiant oro srautą didesniu nei 0,32 kg/(m²s) greičiu, liepsnos fronto temperatūra mažėja dėl didėjančio oro pertekliaus reakcijos zonoje. 6 pav. matyti, kad deguonies koncentracija didėja, taigi deguonis nesuvartojamas reakcijos zonoje ir todėl aušina liepsnos fronto temperatūrą ties kuro užsidegimo vieta.

Didinant oro srauto greitį itin sumažėja CO koncentracija, dėl didesnio deguonies kiekio bei pakankamai aukštos temperatūros reakcijos zonoje (>800°C) oksidacijos procesui vykti. CO₂ koncentracija pastovi ir siekia 16%, tačiau sumažėja tik esant didesniam oro pertekliui, kai degimo produktai paprasčiausiai atskiedžiami oro srautu. Azoto oksidų koncentracija iki 0,2 kg/(m²s) oro srauto greičio yra pastovi ir siekia



5 pav. Į kūryklą tiekiamo oro įtaka liepsnos charakteristikoms pirolizės zonoje



6 pav. Į kūryklą tiekiamo oro įtaka dujų koncentracijoms pirolizės zonoje

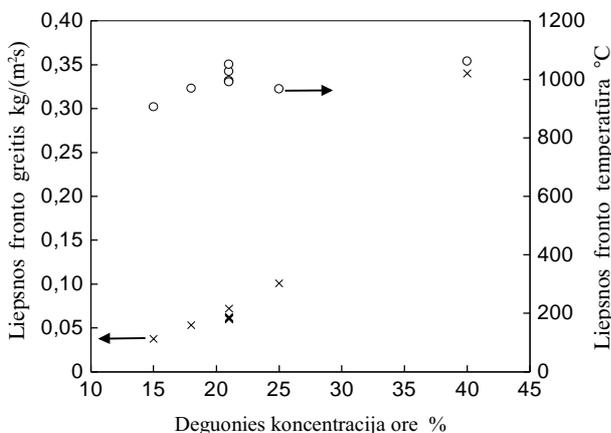
130 ppm, toliau didinant oro srauto greitį NO koncentracija didėja ir esant $0,4 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ siekia 230 ppm. Tolimesnį NO koncentracijos sumažėjimą sąlygoja didėjantis oro perteklius.

3.2.2. Deguonies koncentracijos ore įtaka

Eksperimentai buvo atlikti siekiant nustatyti į kūryklą tiekiamo oro deguonies koncentracijos įtaką degimo charakteristikoms. Rezultatai gali būti naudojami nagrinėjant dūmų recirkuliacijos į kūryklą atvejį. Praktikoje deginimo įrenginiuose dūmų recirkuliacija naudojama kaip viena pigiausių liepsnos fronte susidarantių azoto oksidų kiekio mažinimo priemonių. Deguonies koncentracija dūmuose dažniausiai siekia ne mažiau kaip 5%.

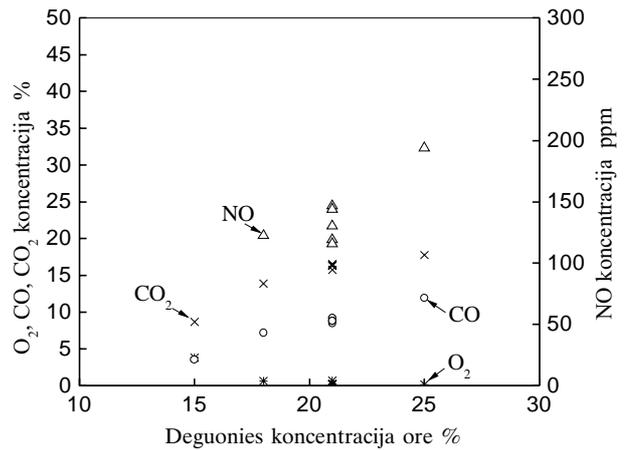
Į kūryklą tiekiamo oro deguonies koncentracija buvo keičiama papildomai pridėdant deguonies arba molekulinio azoto. 7 ir 8 pav. pavaizduota deguonies koncentracijos įtaka liepsnos frontui ir temperatūrai kuro sluoksnyje bei dujų koncentracijoms išeinančiuose dūmuose. Deguonies koncentracijos didinimas ore esant pastoviam oro srauto greičiui gerokai skiriasi nuo anksčiau nagrinėto atvejo, kai deguonies koncentracija didinama tiekiant didesnę oro srautą (5 pav.). Sumažinus deguonies koncentraciją ore iki 15%, liepsnos fronto greitis sumažėja dvigubai, tuo tarpu atitinkamai 6% sumažinus oro srauto greitį, liepsnos fronto greitis mažėja labai nežymiai. Tai galima paaiškinti tuo, kad tiekiant mažiau oro, ne tik mažėja deguonies koncentracija, bet ir mažiau aušinamas jau išilęs arti reakcijos zonos kuro sluoksnis, atitinkamai mažiau šilumos reikia sunaudoti orui šildyti reakcijos zonoje. Tuo tarpu mažinant į kūryklą tiekiamo oro deguonies koncentraciją, tik mažiau šilumos išsiskiria degant kurui.

Didinant deguonies koncentraciją iki 40%, liepsnos frontas didėja eksponentiškai, tačiau temperatū-



7 pav. Į kūryklą tiekiamo oro deguonies koncentracijos įtaka liepsnos charakteristikoms pirolizės zonoje. Oro srauto greitis $0,18 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$

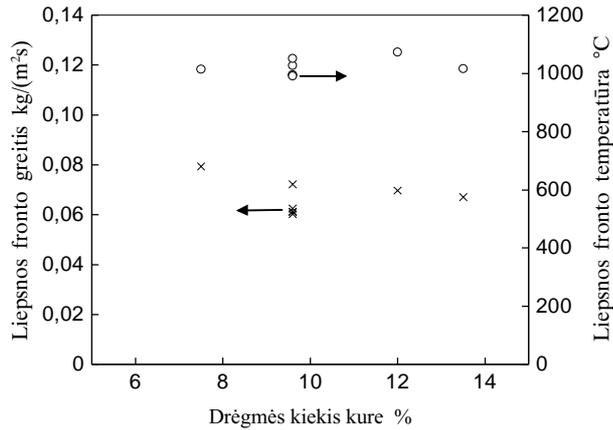
ra lieka beveik pastovi pirolizės zonoje, nepriklausomai nuo deguonies koncentracijos. Naudojant 40% deguonies ore, eksperimentas po kelių minučių buvo sustabdytas dėl aukštos liepsnos, todėl dujų koncentracijos nematuotos (8 pav.). Šiuo atveju lakiųjų medžiagų galėjo oksiduotis virš kuro sluoksnio, kūryklos erdvėje ir suformuoti aukštą liepsnos frontą. 8 pav. matyti, kad didinant deguonies koncentraciją ore, susidaro daugiau NO, taip pat didėja CO koncentracija dėl galimų gazifikacijos reakcijų.



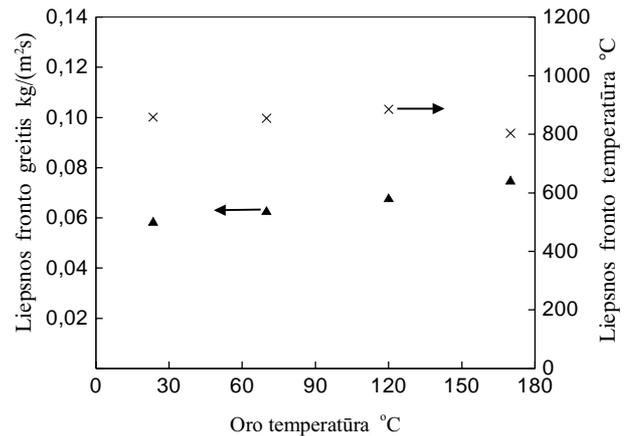
8 pav. Į kūryklą tiekiamo oro deguonies koncentracijos įtaka dujų koncentracijoms pirolizės zonoje. Oro srauto greitis $0,18 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$

3.2.3. Kuro drėgmės įtaka

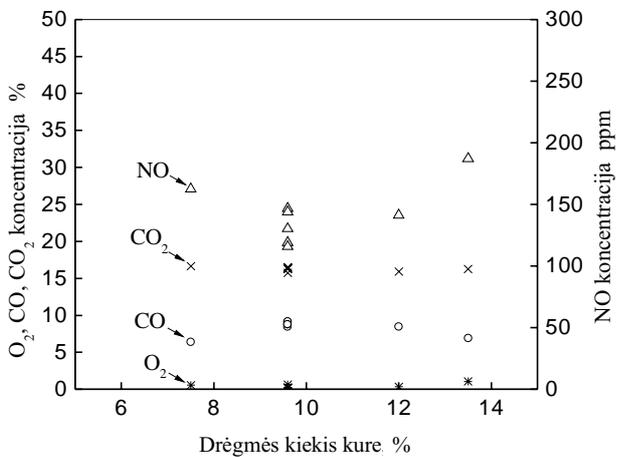
Biomosės drėgnumas gali skirtis nuo 10 iki 50% priklausomai nuo biomasės rūšies, saugojimo sąlygų bei paruošimo kurui būdo. Kuro drėgnumas lemia šilumos išsiskyrimo bei pernešimo procesus reakcijos zonoje, atitinkamai kuro užsidegimą bei dujų susidarymo mechanizmus, todėl buvo atlikti eksperimentai keičiant drėgmės kiekį nuo 7,5 iki 21%. Šiaudai buvo paliekami džiūti keletą valandų kambario temperatūroje arba papildomai sudrėkinami. 9 pav. pavaizduota kuro drėgmės įtaka liepsnos fronto greičiui ir temperatūrai. Didėjant kuro drėgnumui, kurui džiovinti bei uždegti daugiau energijos reikia pernešti į šildymo zoną, tačiau liepsnos fronto greitis neženkliai mažėja. Liepsnos fronto temperatūra didinant kuro drėgnumą beveik nekinta. Tai būtų galima paaiškinti tuo, kad vandens garas dalyvauja oksidacijos reakcijose, didindamas dujų mišinio riebumą reakcijos zonoje. Eksperimentiškai buvo nustatyta, kad liepsnos frontas nesuformuoja esant 21% drėgnumo šiaudams. 10 pav. pavaizduota kuro drėgmės įtaka dujų susidarymui. Matyti, kad didėjant kuro drėgmei CO ir CO_2 koncentracijos lieka pastovios pirolizės zonoje, tačiau NO kiekis šiek tiek padidėja.



9 pav. Kuro drėgmės įtaka liepsnos charakteristikoms pirolizės zonoje. Oro srauto greitis 0,18 kg/(m²s)



11 pav. Šildomo oro temperatūros įtaka liepsnos greičiui ir temperatūrai pirolizės zonoje. Oro srauto greitis 0,13 kg/(m²s)



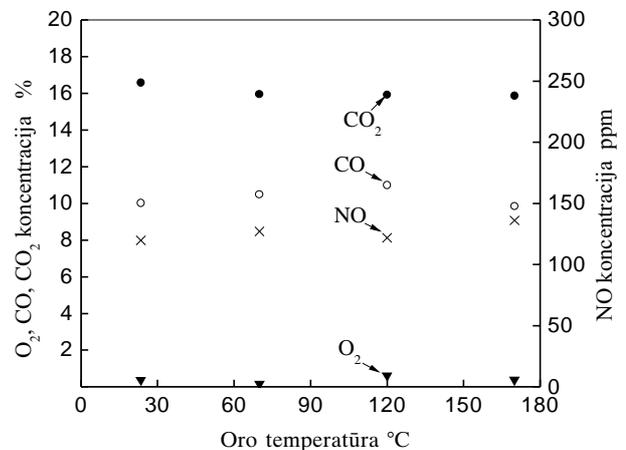
10 pav. Kuro drėgmės įtaka dujų koncentracijoms pirolizės zonoje. Oro srauto greitis 0,18 kg/(m²s)

3.2.4. Oro srauto šildymo įtaka

Praktikoje realiose kūryklose tiekiamas oras degimo procesui yra dažniausiai šildomas iki 150°C, siekiant padidinti kuro konversijos į šilumos energiją efektyvumą. Todėl šiame darbe buvo tirta oro šildymo įtaka degimo proceso charakteristikoms. Oras prieš jį tiekiant į kūryklą buvo šildomas nuo 20 iki 230°C temperatūros, esant pastoviam 0,13 kg/(m²s) oro srauto greičiui. 11 pav. matyti, kad didinant į kūryklą tiekiamo oro temperatūrą, liepsnos frontas didėja, tačiau temperatūra beveik išlieka pastovi. Dėl tiekiamo karšto oro į kūryklą apatiniame kuro sluoksnyje pradeda garuoti drėgmė. Oro srauto pernešamas šilumos kiekis sunaudojamas vandeniui išgarinti apatiniuose kuro sluoksniuose, todėl oro temperatūra sumažėja ir viršutinis kuro sluoksnis žemiau reakcijos fronto yra šaltas (apie 40°C). Šildymo fronto greitis yra apie 30% mažesnis nei liepsnos fronto greitis, o tai reiškia, kad didesnė kuro sluoksnio dalis yra šalta. Priklausomai nuo oro

srauto kiekio ir temperatūros ore esantis vandens garas gali kondensuotis viršutiniuose kuro sluoksniuose. Drėgmė, išgaravusi iš apatinių kuro sluoksnių, suformuoja iš apačios į viršų judantį garavimo frontą, kuris tam tikru laiko momentu susiduria su liepsnos frontu, judančiu iš viršaus žemyn. Po susidūrimo liepsnos fronto greitis padidėja dėl sąlyginai sauso kuro sluoksnio apačioje. Todėl didinant tiekiamo oro temperatūrą, vidutinis liepsnos frontas sluoksnyje didėja.

Pašildžius tiekiamo oro temperatūrą iki 230°C bei uždegus kuro sluoksnį iš viršaus, po kelių minučių kuras savaime užsidega sluoksnio apačioje. Iš apačios ir iš viršaus susiformavę du liepsnos frontai juda vienas prieš kitą. Tačiau netrukus, po savaiminio kuro užsidegimo iš apačios, deguonis visiškai suvartojamas reakcijos fronte ir susidarę suodžiai užgesina iš viršaus judantį liepsnos frontą. Toliau pirolizė vyksta bei anglis dega vienu metu.



12 pav. Šildomo oro temperatūros įtaka dujų koncentracijoms pirolizės zonoje. Oro srauto greitis 0,13 kg/(m²s)

12 pav. pavaizduotos dujų koncentracijos nepriklausomai nuo šildomo oro temperatūros išlieka pastovios pirolizės metu.

4. IŠVADOS

1. Atliktais degimo procesų eksperimentiniais tyrimais nustatyti skirtingų termocheminių procesų, vykstančių kietojo kuro sluoksnyje, mechanizmai, t. y. kuro šilimas ir drėgmės išgarinimas, lakiųjų medžiagų išsiskyrimas (pirolizė) ir užsidegimas bei anglies degimas. Eksperimentų rezultatai gali būti naudojami kietojo kuro degimui optimizuoti judančio sluoksnio tipo kūryklose bei šių procesų skaičiavimo matematiniais modeliais tobulinti.

2. Deginant susmulkintus šiaudus išaiškinta, kad egzistuoja nestabilus kuro sluoksnio degimas, kai oro srauto greitis didelis, per $0,32 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$. Kuro sluoksnyje susidarę oro kanalai turi įtakos degimo charakteristikoms. Kita vertus, susiformavęs „verdantis“ sluoksnis sąlygoja geresnį oro su kuru susimaišymą bei intensyvina kuro užsidegimo procesus.

3. Tyrimai parodė, kad:

– didinant į kūryklą tiekiamo oro srauto greitį bei deguonies koncentraciją ore, daugiau degimo produktų oksiduojama reakcijos fronte, išsiskiria daugiau šilumos, pagreiteja lakiųjų medžiagų išsiskyrimo bei užsidegimo procesai, kartu padidėja liepsnos fronto greitis bei temperatūra;

– didinant kuro drėgnumą daugiau šilumos sunaudojama vandens išgarinimo procesui bei kuro šilimui iki užsidegimo temperatūros, todėl liepsnos fronto greitis mažėja, tačiau temperatūra beveik nekinta;

– šildomas oras intensyvina termocheminius procesus sluoksnyje. Tačiau dėl mažesnio šildymo fronto greičio nei liepsnos fronto greitis didesnė kuro sluoksnio dalis yra šalta, todėl vidutinis liepsnos fronto greitis pirolizės zonoje didėja nežymiai, o temperatūra išlieka pastovi;

– azoto oksidų koncentracija didėja kuro sluoksnyje, didinant oro srauto greitį, deguonies koncentraciją tiekiamame ore bei kuro drėgnumą. CO koncentracija mažėja didinant oro srauto greitį, tačiau didėja didinant į kūryklą tiekiamo oro deguonies koncentraciją. CO₂ koncentracija praktiškai pastovi nepriklausomai nuo keičiamų pradinių sąlygų.

4. Nustatyta, kad esant kritiniam šiaudų drėgnumui 21%, susmulkinti šiaudai neužsidega, savaiminio šiaudų užsidegimo temperatūra – 230°C.

Gauta

2004 07 12

Literatūra

1. Katinas V., Škėma R. Renewable energy policy in Lithuania // *Energy Policy*. 2001. Vol. 29. P. 811–816.

2. Katinas V., Škėma R. Renewable energies in Lithuania // Ed. Reiche D. *Handbook of Renewable Energies in the European Union II (Case Studies of all Accession States)*. Berlin: Peter Lang, 2003. P. 115–125.
3. Baltrušaitis A., Andersson L. Biokuro panaudojimo Lietuvoje galimybės. Lietuvos–Švedijos projektas. Vilnius, 2000. P. 19–31.
4. Atsinaujinančiųjų ir vietinių energijos išteklių naudojimo didinimas Lietuvoje. Danijos energetikos agentūros projektas // www.avei.lt.
5. Nichols P. Underfeed combustion, effect of preheat and distribution of ash in fuel beds // *Fuel in Science and Practise*. 1935. Vol. 14. P. 205–211.
6. Hobbs M. L., Radulovic P. T., & Smoot L. D. Combustion and gasification of coals in fixed beds // *Progress Energy and Combustion Science*. 1993. Vol. 19. P. 505–586.
7. Ryan J. S., Hallet W. L. H. Packed bed combustion of char particles: experiments and an ash model // *Chemical Engineering Science*. 2002. Vol. 57. P. 3873–3882.
8. Stubington J. F. Fenton H. Combustion characteristics of dried and pelletized baggase // *Combustion Science and Tehnology*. 1984. Vol. 37. P. 285–299.
9. Shin D., Choi S. The combustion of simulated waste particles in a fixed bed // *Combustion and flame*. 2000. Vol. 121. P. 167–180.
10. Yang Y. B., Nasserzadeh V., Goodfellow J., Goh Y. R., Swithenbank J. Parameter study on the inceneration of municipal solid waste fuels in packed bed // *Journal of Institute of Energy*. 2002. Vol. 75. P. 66–80.
11. Yang Y. B., Yamauchi H., Nasserzadeh V., Swithenbank J. Effects of fuel devolatilisation on the combustion of wood chips and incineration of simulated municipal solid wastes in a packed bed // *Fuel*. 2003. Vol. 82. P. 2205–2221.
12. Van Kessel L. B. M., Arendsen A. R. J., De Boer-Meulman P. D. M., Brem G. The effect of air preheating on the combustion of solid fuels on a grate // *Fuel*. 2004. Vol. 83. P. 1123–1131.
13. Gort R. On the propagation of reaction front in a packed bed; thermal conversion of municipal solid waste and biomass. / Academic dissertation. University of Twente, 1995.
14. Fatehi M., Kaviany M. Adiabatic reverse combustion in a packed bed // *Combustion and flame*. 1994. Vol. 99. P. 1–17.
15. Saastamoinen J. J., Taipale R., Horttanainen M., Sarkomaa P. Propagation of the ignition front in beds of wood particles // *Combustion and flame*. 2000. Vol. 123. P. 214–226.
16. Axell M., Combustion processe in a biomass fuel bed. Licentiate thesis (in Swedish). Dept. of energy technology, Chalmers University of Technology, Gothenburgh, Sweden, 2000.
17. Thunman H., Leckner B. Ignition and propagation of a reaction front in cross-current bed combustion of wet biofuels // *Fuel*. 2000. Vol. 80. P. 473–481.
18. Bech N., Wolff L., Germann L. Mathematical modelling of straw bale combustion in cigar burners // *Energy & Fuels*. 1996. Vol. 10. P. 276–283.
19. Van der Lans R. P., Pedersen L. T., Jensen A., Glarborg P., Dam-Johansen K. Modelling and experiments

- of straw combustion in a grate furnace // *Biomass and Bioenergy*. 2000. Vol. 19. P. 199–208.
20. Venkataraman C., Joshi P., Sethi V., Kohli S. and Ravi M. R. Aerosol and Carbon Monoxide emissions from Low-Temperature Combustion in a Sawdust Packed-Bed Stove // *Aerosol Science and Technology*. 2004. Vol. 38. P. 50–61.
 21. Garijo E. G., Jensen A. D., Glarborg P. Kinetic study of NO reduction over biomass char under dynamic conditions // *Energy & Fuels*. 2003. Vol. 17. P. 1429–1436.
 22. Glarborg P., Jensen A. D., Johnson J. E. Fuel nitrogen conversion in solid fuel fired systems // *Progress in Energy Combustion Science*. 2003. Vol. 29. P. 89–113.

Andrius Kavaliauskas, Vladislovas Katinas, Anker Jensen, Peter Arendt Jensen

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SOLID FUEL COMBUSTION IN A PACKED BED

S u m m a r y

The behavior of the combustion process in a fuel bed on the grate is characterized by different thermochemical conversion stages, each with significantly different temperatures, and the reacting conditions. This simple analysis of combustion processes taking place on the grate is a useful information for understanding the paths of emission formation and destruction. A large fixed bed reactor was used for obtaining the experimental results of straw combustion. A fixed bed reactor contains a column of biomass fuel, which is ignited at the top and with air entering through the grate from the bottom, measurements are performed while the ignition front proceeds downwards. The influence of the inlet air flow velocity and

temperature, moisture content in the fuel and oxygen concentration in the inlet air on the combustion parameters such as ignition front velocity ($\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$), temperature, and gas species concentration during combustion is presented based on measurements of in-bed temperatures along the bed and different gas compounds (O_2 , CO_2 , CO and NO) over the bed.

Key words: biomass, combustion, fuel layer, emission

Андрюс Кавальяускас, Владислоvas Катинас, Анкер Енсен, Петер Арендт Енсен

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ В СЛОЕ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Р е з ю м е

Рассматривается экспериментальное исследование процесса горения в неподвижном топливном слое, используя солому. Эксперименты были выполнены в вертикальном, цилиндрическом реакторе неподвижного топливного слоя. Условия могут сравниваться с процессами, происходящими в печах с кипящим топливным слоем, и поверхностным горением.

На основе распределения температур в слое топлива и измерения концентрации газа (O_2 , CO , CO_2 и NO) было исследовано влияние начальных условий, таких как скорость и температура потока воздуха, количество влажности в топливе и концентрация кислорода в подающемся в печь воздухе, на параметры сгорания, такие как скорость фронта воспламенения, температуры и газообразования в течение сгорания.

Ключевые слова: биомасса, солома, топливный слой, сгорание, загрязнители