

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
LIETUVOS ENERGETIKOS INSTITUTAS

Andrius Kavaliauskas

ŠIAUDŲ DEGIMAS STACIONARIAME
SLUOKSNYJE

Daktaro disertacijos santrauka
Technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija (06T)

Kaunas, 2005

Disertacija rengta 2000–2004 metais Lietuvos energetikos institute bendradarbiaujant su Danijos technikos universiteto Chemijos inžinerijos fakulteto Degimo ir kenksmingų emisijų kontrolės tyrimų centru (CHEC – Combustion and Harmful Emission Control Research Centre) ir Šiaurės šalių energetikos tyrimų programa (NEFP – Nordic Energy research Program).

Mokslinis vadovas:

Prof. habil. dr. Vladislovas Katinas (Lietuvos energetikos institutas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija – 06T).

Energetikos ir termoinžinerijos mokslo krypties taryba:

Prof. habil. dr. Stasys ŠINKŪNAS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija – 06T) – **pirmininkas**;

Prof. habil. dr. Jonas GYLYS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija – 06T);

Prof. habil. dr. Vytautas MARTINAITIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija – 06T);

Prof. habil. dr. Povilas Algimantas SIRVYDAS (Lietuvos žemės ūkio universitetas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija – 06T);

Prof. habil. dr. Povilas POŠKAS (Lietuvos energetikos institutas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija – 06T).

Oficialieji oponentai:

Prof. habil. dr. Alfonsas Kazys SKRINSKA (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija – 06T);

Habil. dr. Benediktas ČESNA (Lietuvos energetikos institutas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija – 06T).

Disertacija ginama 2005 m. birželio 30 d. 10 val. viešame energetikos ir termoinžinerijos mokslo krypties tarybos posėdyje, kuris įvyks Kauno technologijos universitete, centrinių rūmų disertacijų gynimo salėje (K. Donelaičio g. 73-403).

Adresas: K. Donelaičio g. 73, LT-44029 Kaunas.

Tel. (8 ~ 37 300042, faksas 8 ~ 37 324144, el. paštas mok.skyrius@ktu.lt

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2005 m. gegužės 30 d.

Su disertacija galima susipažinti Kauno technologijos universiteto (K. Donelaičio g. 20, Kaunas) ir Lietuvos energetikos instituto (Breslaujos g. 3, Kaunas) bibliotekose.

1. ĮVADAS

Iki šiol šalyje didžiąją dalį kuro, sunaudojamo energetikoje, šilumai ir elektros energijai gaminti, sudaro importuojamas kuras: branduolinis, dujos, naftos produktai, anglis. Tačiau dėl didėjančio klimato atšilimo, kurį sukelia energetikos, transporto bei pramonės šakų į aplinką išmetami teršalai, intensyviai pradėta skatinti bei vystyti atsinaujinančių energijos išteklių (AEI) naudojimą, ypač energetikoje.

Biomasė (mediena, jos atliekos, šiaudai) yra viena iš labiausiai vartojamų AEŠ rūšių Lietuvoje. 2003 metais ji sudarė didžiausią dalį (apie 74 proc.) šių šaltinių naudojimo energetikoje. Katilinių, kuriose naudojamas biomasės kuras, įrengta šiluminė galia 2004 metais viršijo 300 MW_s. Lietuvoje biomasė daugiausia naudojama šilumos gamybai iki 10 MW_s galios katilinėse naudojant tiesioginį kuro deginimą sluoksninėse kūryklose. Jose kuras dega sluoksnyje ant ardyno, tiekiant pirminį orą iš apačios ir antrinį orą virš kuro sluoksnio nevisiško degimo produktams sudeginti. Kietojo kuro degimo procesas sluoksnyje yra gana sudėtingas, susidedantis iš skirtingų fizikinių bei cheminių (dar vadinamų termocheminės konversijos) procesų tokių kaip, kuro drėgmės išgarinimas, pirolizė (lakių medžiagų išsiskyrimas ir anglies susidarymas), lakių medžiagų bei dalinis anglies degimas ir pabaigoje likusios anglies degimas. Neorganiniai junginiai (pelenus formuojantys junginiai) dalinai lieka ant ardyno. Jie pašalinami į pelenų surinkimo konteinerį ar iš kūryklos išmetami su dūmais. Termocheminės konversijos procesai labai priklauso nuo pradinių sąlygų: biomasės kuro rūšies, kai savybės gali labai skirtis (ypač azoto, chloro, kalio ir sieros, drėgmės bei lakių medžiagų kiekiu), tiekiamo oro kiekio, temperatūros ir kt., tai atitinkamai daro įtaką degimo charakteristikoms (degimo fronto greičiui, temperatūrai ir dujinių junginių susidarymui), taip pat lemia ir degimo stabilumą bei kuro konversijos efektyvumą.

Šiame darbe buvo atlikti degimo eksperimentiniai tyrimai nejudančio kuro sluoksnio kūrykloje deginant šiaudus. Tirta pradinių sąlygų (oro kiekio, temperatūros, kuro drėgmės ir deguonies koncentracijos ore) įtaka degimo proceso kuro sluoksnyje charakteristikoms (degimo greičiui, sluoksnio temperatūrai bei teršalų susidarymui) naudojantis CHEC tyrimų centro laboratorinė įranga. Gauti eksperimentiniai rezultatai leidžia paaiškinti termocheminį procesų mechanizmus kuro sluoksnyje. Juos galima panaudoti degimo procesui optimizuoti bei teršalų mažinimo klausimams spręsti realiose kūryklose (pakurose), taip pat matematiniams modeliams tobulinti.

Darbo tikslas

Atlikti eksperimentinius tyrimus kietojo kuro degimo sluoksnyje, nustatyti pradinių sąlygų įtaką degimo procesui. Ištirti azoto oksidų susidarymo ir redukavimo mechanizmus bei atlikti skaitinius tyrimus panaudojant gautus eksperimentinius duomenis.

Darbo uždaviniai

- Eksperimentiškai nustatyti pradinių sąlygų (oro kiekio, oro pašildymo, šiaudų drėgnumo, deguonies koncentracijos į kūryklą tiekiamame ore) įtaką degimo procesą apibūdinančioms charakteristikoms (degimo greičiui ir temperatūrai).
- Eksperimentiškai ištirti azoto oksidų formavimosi ir redukcijos procesus kuro sluoksnyje.
- Panaudojant CHEC tyrimų centre sukurtą matematinį modelį atlikti skaičiavimus, palyginti ir paaiškinti eksperimentinius tyrimų rezultatus.

Darbo aktualumas

Sluoksninės kūryklos yra dažniausiai naudojama technologija deginant kietąjį kurą (taip pat ir buitines atliekas). Degimo procesas kietojo kuro sluoksnyje yra sudėtingas, jis sudarytas iš daugybės fizikinių bei cheminių reiškinių, lemiančių kuro degimo stabilumą, konversijos efektyvumą, taip pat ir teršalų išmetimą į atmosferą. Disertacijoje eksperimentiniais tyrimais nustatyta pradinių sąlygų įtaka degimo proceso parametrų deginant šiaudus sluoksninėje kūrykloje. Žinoma, kad eksperimentiniai tyrimai yra brangūs, todėl juos dažniausiai pakeičia sukurti teoriniai matematiniai modeliai. Tačiau jų tikslumui įvertinti neišvengiamai būtini eksperimentiniai tyrimai. Šiame darbe gauti eksperimentiniai rezultatai buvo naudoti tobulinti ir testuoti matematinį modelį, kuris leido paaiškinti termocheminių procesų mechanizmus. Toks darbas yra mokslinių darbų, atliktų užsienyje, tęsinys, Lietuvoje jis atliekamas pirmą kartą.

Tyrimo objektas

Kuro degimo procesas sluoksnyje ir azoto oksidų susidarymas bei redukavimas deginant šiaudus.

Darbo mokslinis naujumas

Atlikti kietojo kuro degimo sluoksnyje eksperimentiniai tyrimai, nustatyta pradinių sąlygų įtaką degimo proceso parametrų, eksperimentais nustatyti azoto oksidų susidarymą ir redukavimą sluoksnyje lemiantys faktoriai. CHEC sukurtas matematinis modelis skaičiavimo rezultatai pakankamu tikslumu sutapo su eksperimentiniais, taip pat nustatyta kitų parametrų: šiaudų sluoksnio efektyviojo šilumos laidumo, šiaudų savitosios šilumos ir šiaudų sluoksnio tankio svarbi įtaka degimo procesui.

Praktinė svarba

Gauti eksperimentiniai ir modeliavimo rezultatai gali būti naudojami realiose sluoksninėse kūryklose pradinėms sąlygoms optimizuoti – taip, stabilizuojant degimo procesą ir mažinant teršalų, taip pat ir azoto oksidų,

išmetimą į atmosferą bei išvengiant brangių katalitinių priemonių naudojimo. Gauti eksperimentiniai rezultatai naudojami tolesniems kuro degimo proceso sluoksninėse kūryklose tyrimams atlikti bei matematiniams modeliams tobulinti.

Ginamieji disertacijos teiginiai

- Eksperimentiškai nustatyta pradinių sąlygų įtaka kietojo kuro degimo procesui sluoksnyje;
- Atskleista pradinių sąlygų įtaka teršalų susidarymui ir eksperimentiškai nustatytas NO redukavimo procesas degimo metu kuro sluoksnyje;
- Atliktas degimo proceso kietojo kuro sluoksnyje teorinis skaičiavimas panaudojant matematinį modelį. Gauti rezultatai pakankamu tikslumu sutampa su eksperimentiniais;
- Kriterinės analizės pagalba nustatyta fizikinių savybių įtaka degimo procesui kuro sluoksnyje.

Darbo rezultatų pagrindimas

Disertacijoje pateikti eksperimentiniai ir modeliavimo rezultatai pristatyti CHEC vidiniuose seminaruose, respublikinėse ir tarptautinėje konferencijose.

Darbo struktūra ir apimtis

Disertacinis darbas sudarytas iš keturių dalių ir išvadų. Darbą sudaro 98 puslapiai, 53 paveikslėliai, 14 lentelių ir 110 nuorodų į literatūros šaltinius.

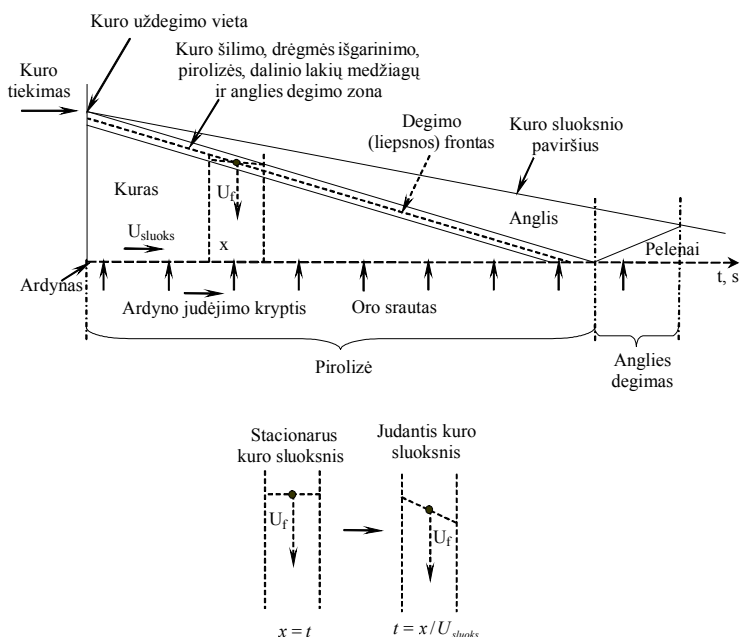
2. DEGIMO PROCESAS STACIONARIAME KURO SLUOKSNYJE

Degimo fronto greitis yra vienas iš pagrindinių tyrimo objektų kietojo kuro degimo sluoksninėse kūryklose, jis nulemia lakiųjų medžiagų išsiskyrimą, daro įtaką degimo šilumos išsiskyrimui, taip pat ir degimo stabilumui.

Literatūroje skelbiami eksperimentiniai darbai apie kietojo kuro degimą stacionariame sluoksnyje atlikti naudojant nejudančio ardyno tipo kūryklą, kurioje vykstantys termocheminiai procesai yra analogiški praktikoje dažniausiai naudojamose judančio sluoksnio tipo kūryklose arba pakurose (2.1 pav.).

Pirmieji tokio tipo eksperimentai buvo atlikti daugiau nei prieš 85 metus. Tuomet eksperimentuose daugiausia kaip kuras buvo naudojamos akmens anglis ir koksas [1, 2], vėliau buitinės atliekos ir išspaudos [3–8], o prieš dešimtmetį – biomasė [9–12]. Tik keletas darbų skelbiama apie šiaudų kurą [11, 12]. Viename jų eksperimentai buvo atlikti žaizdro tipo kūrykloje, naudojant šiaudų ryšulius [11]. Gauti rezultatai pritaikyti vienmačiam matematiniam modeliui tobulinti. Palyginimas parodė, kad sluoksnio temperatūros bei dujų koncentracijos gerai sutampa su eksperimentiniais

rezultatais. Pastebėta, kad kūryklos darbui daugiausia įtakos turėjo kuro sluoksnio tankio nevienodumas. Kitame darbe [12] atliktų tyrimų tikslas buvo nustatyti pradinių sąlygų (oro kiekio ir temperatūros) įtaką degimo procesui stacionaraus tipo kuro sluoksnio kūrykloje deginant smulkintus šiaudus bei šiaudų granules. Gauti rezultatai pritaikyti dvimačiam matematiniam modeliui tobulinti. Rezultatai parodė, kad didelę įtaką degimo fronto greičiui turi oro pašildymas, tačiau praktiškai neturi įtakos sluoksnio temperatūrai. Vienas eksperimentas buvo atliktas naudojant šiaudų granules: buvo nustatyta, kad degimo fronto greitis daug didesnis palyginti su smulkintais šiaudais. Visi eksperimentai buvo atlikti naudojant skirtingas pradines sąlygas, todėl nepakanka informacijos paaiškinti termocheminės konversijos procesus kietojo kuro sluoksnyje.

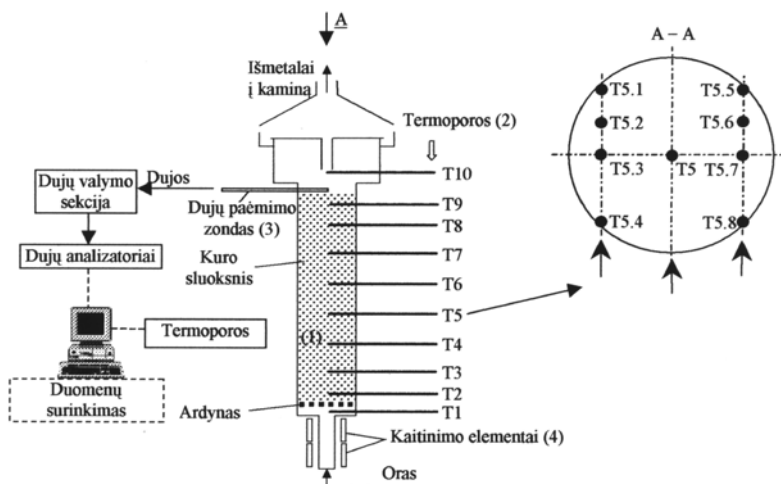


2.1 pav. Kietojo kuro degimo judančiame sluoksnyje analogija stacionaraus kuro sluoksnio tipo kūrykloje.

3. EKSPERIMENTINIS STENDAS IR TYRIMŲ METODIKA

Eksperimentiniai tyrimai buvo atliekami naudojant cilindrinę 15,4 cm diametro ir 120 cm aukščio laboratorinę stacionaraus (nejudančio) sluoksnio kūryklą (3.1 pav.) CHEC tyrimų centre. Kūrykla sudaryta iš vertikalios cilindro – degimo kameros (1) su akyta plokšte–ardynu kūryklos apačioje tolygiai paskirstyti tiekiamą orą į kuro sluoksnį. Degimo kamera iš išorės izoliuota storu

stiklo vatos sluoksniu. Termoporos (2) išdėstytos išilgai kuro sluoksnio kas 10–15 cm. Viena termopora (T1) yra žemiau ardymo įeinančio oro temperatūrai ir kita (T10) išeinančių dujų temperatūrai matuoti. T5 pozicijoje (45 cm aukštyje virš ardymo) yra galimybė išdėstyti daugiau termoporų detalesniam temperatūrų laukui matuoti šiame kuro sluoksnio skerspjūvyje. Kuras užkraunamas iš viršaus suformuojant apie 1 m aukščio sluoksnį. Žemiau ardymo įrengti elektriniai šildymo elementai leidžia pašildyti į kūryklą tiekiamo oro temperatūrą iki 300°C (4). Keletas centimetrų virš kuro sluoksnio yra įmontuotas dujų paėmimo zondas (3), kuriuo degimo produktai tiekiami į analizės stendą deguonies (O₂), anglies monoksido (CO) ir dioksido (CO₂) bei azoto oksidų (NO) koncentracijai matuoti. Oras į kūryklą tiekiamas iš apačios, o kuras uždegamas iš viršaus, todėl degimo frontas juda žemyn – priešingai nei oro srauto kryptis. Eksperimentų metu matuojami parametrai (temperatūros pasiskirstymas kuro sluoksnyje ir dujų (O₂, CO, CO₂ ir NO) koncentracija degimo produktuose) fiksuojami naudojant kompiuterinę programą „LabVIEW 7“.



3.1 pav. Eksperimentinio stendo schema.

Degimo eksperimentams buvo naudojami smulkinti ir nesmulkinti šiaudai bei šiaudų granulės. Šiaudų savybės pateiktos 1 lentelėje. Smulkintų šiaudų kuro dalelės buvo panašios į stačiakampio formą, jų ilgis siekė 2–4 mm, o storis – 0,10–0,50 mm. Specialia pjaustymo mašina šiaudai buvo susmulkinti iki 4 mm dalelių dydžio ir išsijoti per 2 mm sietą. Nesmulkinti šiaudai buvo imami tiesiai iš ryšulio. Šiaudų granulės – cilindrinės formos, diametras

svyravo nuo 4 iki 10 mm. Šiaudų kuro kiekis kūrykloje siekė nuo 1 iki 2,5 kg naudojant smulkintus bei nesmulkintus šiaudus ir 8,5 kg naudojant šiaudų granules vienam eksperimentui. Pradinės eksperimentų sąlygos buvo keičiamos. Oras buvo pašildomas iki reikiamos temperatūros prieš tiekiant į kūryklą. Drėgmė kure buvo keičiama paliekant kurą patalpoje džiūti natūraliomis sąlygomis arba kuras buvo papildomai sudrėkinamas. Deguonies koncentracija tiekiamame į kūryklą ore buvo keičiama papildomai pridendant deguonies arba molekulinio azoto (N₂).

1 lentelė. Kuro savybės.

Kuras		Smulkinti ir nesmulkinti šiaudai	Šiaudų granulės
Bendra kuro analizė, %	Drėgmė	9,6	9,1
	Lakiosios medžiagos	68,3	66,16
	Pelenai	4,27	8,1
	Anglis	17,83	16,64
Šiluminė kuro vertė, MJ/kg		15,87	15,26
Elementinė analizė, %			
	C	47,11	45,4
	H	6,29	6,01
	O	44,2	44,9
	N	0,788	0,89
	S	0,129	0,19
	K	1,30	1,9
	Cl	0,188	0,69

Prieš pradėdant kiekvieną naują eksperimentą visi dujų analizatoriai buvo kalibruojami, keičiami filtrai, tikrinamas dujų paėmimas bei analizės sistemų sandarumas.

Atliktas eksperimentų kartotinumų testas parodė, kad kuro sluoksnio temperatūrų ir dujų koncentracijos degimo produktuose matavimų vidutinė kvadratinė paklaida sudaro atitinkamai 2 ir 13 procentų.

Eksperimentinių duomenų apdorojimo metodika

Eksperimentinius rezultatus sudaro temperatūrų matavimas kuro sluoksnyje bei dujų koncentracijos matavimas išeinančiuose dūmuose virš kuro sluoksnio. Degimo fronto greitis laikomas lygiu atstumui tarp termoporų padalytam iš laiko, per kurį degimo frontas praeina nuo vienos termoporos iki kitos pasiekus 400°C temperatūrą. Pirolizės pradžia ($t = 0$) ir pabaiga laikoma atitinkamai, kai kuro sluoksnio temperatūra T₉ ir T₂ (žr. 3.1 pav.) pasiekia 400°C. Visas degimo procesas laikomas baigtu, kai deguonies koncentracija išeinančiuose iš reaktoriaus dūmuose pasiekia 20,5 procento. Didžiausia

temperatūra, atitinkanti degimo (liepsnos) fronto temperatūra, laikoma išmatuota vidutine pikine temperatūros reikšme kuro sluoksnyje degimo metu.

Atstumas tarp termoporų kuro sluoksnyje:

$$\Delta l = l_1 - l_2, \text{ m}; \quad (3.1)$$

Laiko skirtumas tarp termoporų pasiekus 400°C temperatūra:

$$\Delta t^{400^\circ\text{C}} = t_1^{400^\circ\text{C}} - t_2^{400^\circ\text{C}}, \text{ s}; \quad (3.2)$$

Degimo (liepsnos) fronto greitis:

$$v_f = \Delta l / \Delta t^{400^\circ\text{C}}, \text{ m/s}; \quad (3.3)$$

Degimo (liepsnos) fronto greitis:

$$U_f = v_f \cdot \rho_b, \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}); \quad (3.4)$$

Kure esančios anglies konversija į anglies monoksido ir dioksido junginius pirolizės ir likutinės anglies degimo stadijose:

anglies masė CO ir CO₂ dujose:

$$m_{cg} = \int_0^{t_c} ([CO] + [CO_2]) \cdot \frac{P}{RT} \cdot V_{air} \cdot M_c \cdot dt, \text{ g}; \quad (3.5)$$

anglies masė šiauduose:

$$m_{cf} = m_f \frac{X_{cf}}{100}, \text{ g}; \quad (3.6)$$

anglies konversija į CO ir CO₂ dujas:

$$X_c = \frac{m_{cg}}{m_{cf}} \cdot 100, \%; \quad (3.7)$$

Pagrindinės modeliavimo prielaidos

- Sistema yra vienmatė. Laikoma, kad dujos yra idealios;
- Degimo proceso metu nėra kuro irimo (fragmentacijos), trinties ar sukepimo (aglomeracijos) tarp kietųjų kuro dalelių;
- Remiantis pastebėjimais eksperimentų metu galima teigti, kad kuro džiūvimo, pirolizės ir degimo metu tūris nesumažėja. Be to, kuro

sluoksnis išlieka stacionarus, kai tiekiamo oro kiekis yra ne didesnis kaip $0,32 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$.

- Kuras sudarytas iš anglies, vandenilio, deguonies. Dujinius junginius modelyje sudaro CO , CO_2 , H_2O , O_2 , H_2 , CH_4 , aukštesni angliavandeniliai (C_xH_y), dervos (CH_mO_n) ir inertinės dujos (molekulinis azotas N_2).

Šiaudų degimo procesas gali būti padalytas į keturis vienas paskui kitą sekančius arba iš dalies vienu metu vykstančius termocheminius procesus: kuro drėgmės garavimas, lakių medžiagų išsiskyrimas ir anglies susidarymas, lakių medžiagų degimas ir anglies dalelių oksidacija. Kiekvienas procesas matematinėmis lygtimis yra aprašomas atskirai.

Pagrindinės lygtys

Stacionaraus kuro sluoksnio masės ir energijos balanso lygtys gali būti išreikštos taip:

dujinės fazės nepertraukiamumo lygtis:

$$\frac{\partial(\rho_g \varepsilon_b)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_g v_g)}{\partial x} = r_g ; \quad (3.8)$$

Analogiška atskirų dujų junginių lygtis:

$$\frac{\partial(\varepsilon_b \rho_g Y_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_g v_g Y_i)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_b D_{a,eff} \rho_g \frac{\partial Y_i}{\partial x} \right) + \varepsilon_b r_i ; \quad (3.9)$$

čia: i – atskiri dujiniai junginiai ($i = \text{CO}$, CO_2 , H_2 , CH_4 , C_xH_y , H_2O , O_2 , ir dervos (dujinės fazės)). Y_i – dujinių junginių masė, r_i – dujinių junginių susidarymo masinis greitis drėgmės garavimo, lakių medžiagų išsiskyrimo bei lakių medžiagų ir anglies degimo metu.

Kietosios fazės masės tvermės lygtis:

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} = -r_g ; \quad (3.10)$$

Kietosios fazės energijos lygtis:

$$\frac{\partial(\rho_s h_s)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{eff} \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + hS(T_g - T_s) + Q_{H_2O} + Q_s + Q_{ls}; \quad (3.11)$$

čia: antrasis narys iš dešinės – šilumos atidavimas konvekcija tarp dujinės ir kietosios fazių. Nariai Q_{H_2O} , Q_{ls} ir Q_s – šilumos nuostoliai dėl drėgmės garavimo, per reaktoriaus sienelę ir šilumos išsiskyrimas dėl anglies degimo.

Efektyvus šilumos laidumo koeficientas gali būti išreikštas lygtimi:

$$k_{eff} = k_{eff,0} + 0,5k_g \text{ Pr Re} / \varepsilon_b; \quad (3.12)$$

čia: $\text{Pr} = 0,7$. $k_{eff,0}$ išreiškiamas lygtimi :

$$k_{eff,0} = \varepsilon_b \cdot (k_g + h_{rv} \Delta l) + \frac{(1 - \varepsilon_b) \Delta l}{1 / (k_g / l_v + h_{rs}) + l_s / k_s}; \quad (3.13)$$

čia: h_{rv} – tuštumų (ertmių) kuro sluoksnyje efektyvus šilumos atidavimo koeficientas radiacija, h_{rs} – pastovaus paviršiaus šilumos atidavimo koeficientas radiacija, Δl – atstumas tarp dviejų kuro dalelių, l_v – dujų srauto sluoksnio storis, m, l_s – kuro sluoksnio storis, apskaičiuotas kaip $l_s = 2d_p / 3$, k_s – šiaudų šilumos laidumas, $k_s = 0,05$, l_v , h_{rv} , h_{rs} , ir Δl išreiškiami taip:

$$l_v = 0,15912 \cdot \Delta l \cdot \left(\frac{k_g}{k_{air}} \right)^{0,3716} \varepsilon_b^{1,7304}; \quad (3.14)$$

$$h_{rv} = 0,1952 \cdot \left(1 + \frac{\varepsilon_b(1 - \varepsilon_s)}{2(1 - \varepsilon_b)\varepsilon_s} \right)^{-1} \cdot \left(\frac{T_s}{100} \right)^n; \quad (3.15)$$

$$h_{rs} = 0,1952 \cdot \left(\frac{\varepsilon_s}{2 - \varepsilon_s} \right) \cdot \left(\frac{T_s}{100} \right)^n; \quad (3.16)$$

$$\Delta l = 0,96795 \cdot d_p \cdot (1 - \varepsilon_b)^{-1/3}; \quad (3.17)$$

čia: oro šilumos laidumo koeficientas, $k_{air}(T_g) = 5,66 \cdot 10^{-5} T_g + 1,1 \cdot 10^{-2}$, ε_s – šiaudų anglies juodumo laipsnis, $\varepsilon_s = 0,9$. n – empirinis parametras, priklausantis nuo kuro sukrovimo sąlygų, $n = 3$, kai šiaudų dalelės susiliečia viena su kita (oro kiekis ne didesnis kaip $0,32 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$). n kinta eksponentiškai (priimta pirmos eilės), kai kuro sluoksnis yra judančios ar verdančios būklės (oro kiekis yra didesnis kaip $0,32 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$). Tai gali būti paaiškinta taip: šiaudai nesutankinti ir nedidelis kontaktas tarp šiaudų kuro dalelių greitai sumažina efektyvų šilumos atdavimą laidumu nuo karšto sluoksnio šaltam, be to, šiaudų juodumo laipsnis gali labai sumažėti esant mažesniai likutinės anglies kiekiui pelenuose; jis lemia mažesnę šilumos atdavimą radiacija.

Šiame modelyje $n = 1,93 + 0,67 \exp(-(\dot{m}_{air} - 0,39)/0,054)$ naudojant smulkintus ir nesmulkintus šiaudus (kur \dot{m}_{air} yra tiekiamo oro kiekis).

Dujinės fazės energijos lygtis:

$$\frac{\partial(\varepsilon_b \rho_g h_g)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_g v_g h_g)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_b k_g \frac{\partial T_g}{\partial x} \right) + hS(T_s - T_g) + Q_g + Q_{lg}; \quad (3.18)$$

čia: h_g – dujų entalpija. Q_g ir Q_{lg} – dujinės fazės šilumos padidėjimas dėl sudegimo ir šilumos nuostolių. Šilumos nuostoliai Q_{ls} ir Q_{lg} , apytiksliai apskaičiuoti pagal šilumos laidumo per tuščiaavidurio cilindro sienelės lygtį, $Q_{ls} = 2\pi k(1 - \varepsilon_b)(T_s - T_a)/\ln(r_2/r_1)$ ir $Q_{lg} = 2\pi k \varepsilon_b (T_s - T_a)/\ln(r_2/r_1)$, k – kuro sluoksnio šilumos laidumo koeficientas, $k = 0,18$, T_a – kambario temperatūra, $T_a = 293 \text{ K}$, r_2 ir r_1 – stacionaraus kuro sluoksnio išorinis ir vidinis spinduliai, $r_2/r_1 = 1,1$.

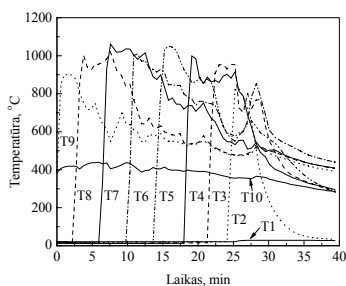
Kad būtų galima apskaičiuoti temperatūrą išraiškose (3.11, 3.18), entalpija $h_{s,(g)}$ buvo randama naudojantis vidutine savitąja šiluma $\bar{C}_{ps,(g)}$, išreikšta:

$$h_{s,(g)} = \bar{C}_p \Delta T_{s,(g)} = \int C_{ps,(g)} dT_{s,(g)}. \quad (3.19)$$

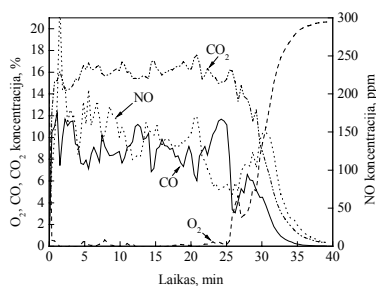
4. EKSPERIMENTINIAI IR MODELIAVIMO REZULTATAI

Degimas šiaudų kuro sluoksnyje

4.1 pav. pateikti temperatūrų bei dujų koncentracijų matavimo duomenys degant smulkintiems šiaudams nejudančiame sluoksnyje tiekiant $0,18 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ oro srautą. Uždegus kuro sluoksnį viršuje ir susidarius degimo (liepsnos arba reakcijos) frontui, per 1,8 min. sluoksnio temperatūra pakilo nuo kambario temperatūros (20°C) iki 910°C (4a pav., T9). Kai degimo frontas praėjo termoporą T9 pozicijoje, temperatūra kūrykloje virš kuro sluoksnio sumažėjo iki $300\text{--}400^\circ\text{C}$ dėl šilumos nuostolių į kūryklos sienelės. Tačiau temperatūra išlieka gana aukšta dėl susidariusių karštų dujų, kylančių iš judančio žemyn degimo fronto. Toks pat temperatūros pokytis pastebimas ir žemesniuose kuro sluoksniuose. Degimo frontas pasiekia ardyną per 25 min. Po vienos minutės temperatūra T3 pozicijoje vėl ima kilti. Čia pirolizės procesas jau baigėsis, visos kure esančios lakiosios medžiagos išsiskyrė ir sudegė liepsnos fronte (reakcijos zonoje), todėl pradeda degti kure likusi anglis. Anglies degimo zonoje degimo frontas juda iš apačios į viršų į kūryklą tiekiamo oro kryptimi.



(a)



(b)

4.1 pav. Temperatūros pasiskirstymas kuro sluoksnyje (a) ir degimo produktų koncentracija (b) degimo metu. Oro srauto greitis $0,18 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$.

Pirolizės pradžia laikomas momentas, kai degimo frontas praėjo pirmą termoporą T9, ir pabaiga, kai pasiekia paskutinę termoporą T2, atitinkamai esant 400°C temperatūrai (3.1 pav.). Degimo proceso pabaiga laikoma, kai deguonies koncentracija pasiekia 20,5 procento. Tuomet anglies degimo zona laiko atžvilgiu apibrėžiama laiko skirtumu tarp degimo ir pirolizės pabaigos.

Iš dujų koncentracijos grafiko matyti (4b pav.), kad po kuro uždegimo praėjus 1 min. deguonies koncentracija sumažėja nuo 21 iki 0 proc., jis sunaudojamas lakių medžiagų oksidacijos procese reakcijos zonoje. Tuo pat metu susidariusi CO, CO₂ ir NO koncentracija pakyla atitinkamai nuo 0 iki 9,7 proc., 15 proc. ir 193 ppm bei lieka pastovios pirolizės zonoje. Kai degimo frontas pasiekia ardyną, CO koncentracija 25 minutę pirolizės zonoje akimirksniu sumažėja iki 3 procentų. 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

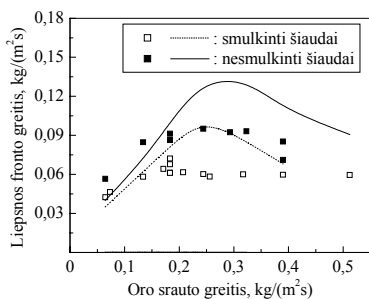
gerai žinoma kaip sąlyginai lėtas procesas (išskyrus atvejį, kai reakcijos zonoje yra vandenilio atomų turinčių junginių) ir tam reikalinga ne mažesnė kaip 800°C temperatūra, po kelių minučių pastebimas CO koncentracijos padidėjimas iki 6 procentų. Tai lėmė ne tik temperatūros sumažėjimas iki 700°C (4.1a pav.) dėl šilumos nuostolių į kūryklos sienelės, bet ir dujų atskiedimas virš reakcijos zonos dėl oro pertekliaus padidėjimo. CO₂ koncentracija anglies degimo zonoje lėtai mažėja dėl oro pertekliaus didėjimo. NO koncentracija sumažėja nuo 160 iki 80 ppm dar pirolizės zonoje (22 min.). Tai galima būtų paaiškinti keliomis priežastimis: redukcijos reakcija su anglimi (4.1), katalizinė redukcijos reakcija su CO ant anglies paviršiaus (4.2), taip pat dėl galimų redukcijos reakcijų su angliavandeniliais (C_xH_y) bei pelenuose esančių neorganinių junginių (metalų) katalizinių savybių.



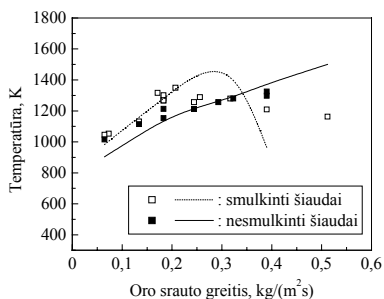
Apie 80 proc. kure esančio azoto išsiskiria pirolizės metu kaip tarpiniai junginiai: NH₃, HCN bei HNCO, ir toliau oksiduojasi į NO arba N₂, atsizvelgiant į degimo sąlygas kuro sluoksnyje. Tačiau 4.1b pav. matyti, kad NO koncentracija padidėja iki 140 ppm anglies degimo zonoje. Pasibaigus pirolizės procesui anglyje likęs azotas gali oksiduotis į NO (4.3), taip pat ir reduktus pagal pirmiau minėtas reakcijas anglies degimo zonoje. Tačiau temperatūra kūrykloje yra gana žema, jos nepakanka redukcijos reakcijoms vykti. Anglies degimas baigėsi po 13 min., kai deguonies koncentracija pasiekė 21 proc. aplinkos oro koncentraciją, o CO, CO₂ ir NO dujų koncentracija sumažėjo iki 0 procentų.

Pradinių sąlygų įtaka degimo charakteristikoms

4.2a pav. pavaizduota oro srauto greičio įtaka degimo fronto greičiui ir temperatūrai pirolizės zonoje naudojant smulkintus ir nesmulkintus šiaudus.



(a)



(b)

4.2 pav. Eksperimentiniai ir modeliavimo rezultatai: liepsnos fronto greičio (a) ir temperatūros (b) priklausomybė nuo oro srauto greičio.

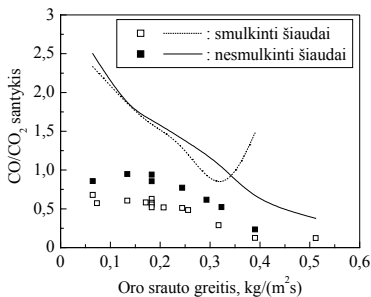
Modeliavimo rezultatai parodyti išsiline ir punktyrine linijomis, eksperimentų rezultatai – taškais. Iš paveikslų matyti, kad modeliavimo rezultatai pakankamai gerai atitinka atliktų eksperimentinių rezultatų kitimo charakterį.

Eksperimentiniai ir modeliavimo rezultatai rodo, kad iš pradžių liepsnos fronto greitis sparčiai didėja didėjant oro srauto greičiui (mažesniai už $0,24 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$), o toliau mažėja. Skaitiniais skaičiavimais nustatyta, kad smulkinti ir nesmulkinti šiaudai neužsidega oro srauto greičiui viršijus $0,4 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ reikšmę. Tai galima paaiškinti taip: reakcijos fronte pasiekiamas balansas tarp šilumos išsiskyrimo degant lakioms medžiagoms ar anglies oksidavimo, šilumos pernešimo dar nesudegusiam kurui bei konvekcinio aušinimo į kūryklą tiekiamu oro srautu. Naudojant $0,065 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ oro srauto greitį buvo sunku uždegti kurą, tačiau liepsnos frontas susiformavo ir judėjo žemyn. Todėl minimalus kritinis oro srauto greitis gali būti dar mažesnis liepsnos frontui suformuoti. Esant mažesniai oro srauto greičiui, oro pernešamas šilumos kiekis yra sąlyginai mažas, lyginant su šilumos kiekiu, išsiskyrusiu kuro oksidacijos metu, ir šilumos atidavimo laidumu į žemiau esantį „šviežią“ kuro sluoksnį. Išsiskyrusi šiluma degant kurui tiesiškai didėja oro srauto greičio atžvilgiu, jis lemia spartų liepsnos fronto greičio didėjimą. Tačiau šilumos kiekis, reikiamas dujinei fazei pašildyti, taip pat didėja tiesiškai oro srauto greičio atžvilgiu. Naudojant didesnę tiekiamą oro srauto greitį, šilumos kiekis, pernešamas oro srautu, tampa sąlyginai didesniu už šilumos kiekio išsiskyrimą kuro oksidacijos metu ir todėl degimo fronto greitis mažėja. Eksperimentai parodė, kad naudojant smulkintus šiaudus kuras gali būti uždegamas oro srauto greičiui esant didesniai kaip $0,4 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. Tačiau pastebėta, kad degimo metu smulkintų šiaudų kuro sluoksnis buvo judančios būklės, dalis smulkių kuro dalelių buvo išpučiama iš kūryklos, formavosi oro kanalai. Esant tokioms sąlygoms, o ypač kai dalis kuro jau yra sudegusi, kuro sluoksnis pradeda tarsi maišytis – „virti“, tampa nestacionarus. Susiformavus „verdančiam“ sluoksniui, vyksta geresnis oro su kuru susimaišymas, dėl to sudaromos geresnės sąlygos degimo procesams. Tačiau naudojant didesnę nei $0,32 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ oro srauto greitį, sąlygos neatitinka degimo procesų stacionarus kuro sluoksnio atveju, kuris nagrinėjamas šiame darbe, todėl eksperimentiniai rezultatai esant šioms sąlygoms turėtų būti vertinami atsižvelgiant į vizualiai pastebėtus reiškinius eksperimentų metu. Kita vertus, jie puikiausiai gali būti 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. Maksimalus eksperimentuose naudojamas oro srauto greitis buvo $0,51 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. Esant tokiam oro srauto greičiui didelė dalis kuro dalelių buvo išmetama iš kūryklos, tačiau kurą dar buvo galima uždegti dėl gero oro ir kuro susimaišymo. Todėl

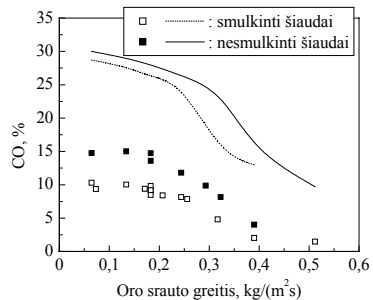
maksimalus kritinis oro srauto greitis degimo procesui vykti šiaudų sluoksnyje gali būti didesnis.

Didinant oro srauto greitį degimo fronto temperatūra (4.2b pav.) padidėja nuo 1010 K iki 1340 K. Akivaizdu, kad naudojant didesnę oro kiekį, daugiau deguonies tiekama į reakcijos zoną ir vyksta intensyvesnės oksidacijos reakcijos. Tokiu būdu reakcijos zonoje išsiskiria didesnis šilumos kiekis, kuris toliau pernešamas radiacija, konvekcija ir laidumu į žemesnius kuro sluoksnius. Dėl to spartėja fizikiniai procesai, tokie kaip kuro šilimas, drėgmės išgarinimas bei lakių medžiagų išsiskyrimas, o atitinkamai didėja ir degimo fronto greitis. Tiekiant oro srautą didesniu kaip $0,32 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ greičiu, degimo fronto temperatūra mažėja dėl oro pertekliaus didėjimo reakcijos zonoje. Tai reiškia, kad deguonis nėra visiškai sunaudojamas reakcijos zonoje ir todėl aušina degimo fronto temperatūrą ties kuro užsidegimo vieta. Svarbu yra tai, kad mažėjant liepsnos fronto greičiui, kuro sluoksnio temperatūra toliau didėja, kai oro srauto greitis yra didesnis kaip $0,24 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. Eksperimentai ir skaitinis modeliavimas parodė, kad smulkintų ir nesmulkintų šiaudų kuro sluoksnio degimas yra taip vadinamose riebaus mišinio sąlygose, t. y. deguonies kiekio tiekiamame į reaktorių ore nepakanka visiškai oksiduoti degiuosius dujinius junginius bei anglies likutį. Daugiau lakių medžiagų, tokių kaip dervos, CO, kt. sunaudojama esant didesniai oro srauto greičiui, kuris sąlygoja didesnę kuro sluoksnio temperatūrą.

Eksperimentinių ir modeliavimo CO/CO_2 santykio ir CO kuro sluoksnyje rezultatų palyginimai parodyti 4.3 pav.



(a)



(b)

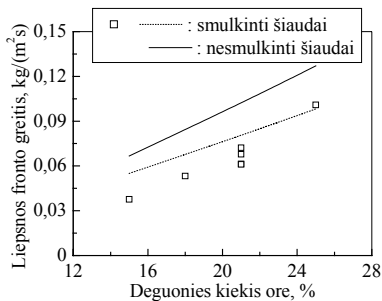
4.3 pav. Eksperimentiniai ir modeliavimo rezultatai: CO/CO_2 santykis (a) ir CO (b) priklausomybė nuo oro srauto greičio.

Iš grafiko matyti, kad modeliavimo rezultatai pakankamai gerai atitinka eksperimentinių matavimų kitimo charakterį. CO/CO_2 santykio ir CO koncentracijos reikšmės yra didesnės modeliuojant, nei rodo atlikti eksperimentai. Oro kanalų kuro sluoksnyje formavimasis lemia mažesnę CO/CO_2 santykį už nustatytą eksperimentuose. Modeliavimas parodė, kad

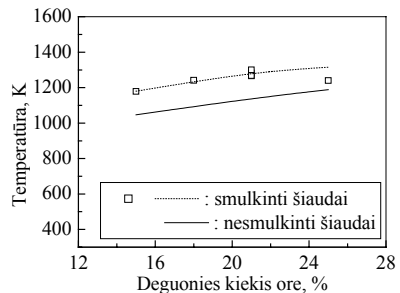
didelis CO/CO₂ santykis esant mažiausiam oro srauto greičiui naudojant smulkintus šiaudus yra dėl mažesnės dujų temperatūros, dėl kurios nesudega CO. Didinant oro srauto greitį CO koncentracija sumažėja dėl didesnio deguonies kiekio ir gana aukštos temperatūros reakcijos zonoje (> 1270 K), pakankamos oksidacijos procesams vykti.

Buvo atlikti eksperimentai nustatyti deguonies koncentracijos į kūryklą tiekiamame ore įtaką degimo charakteristikoms. Deguonies koncentracija tiekiamame į kūryklą ore buvo keičiama papildomai teikiant deguonies arba molekulinio azoto. Rezultatai gali būti naudojami nagrinėjant dūmų recirkuliacijos į kūryklą atvejį. Praktikoje deginimo įrenginiuose dūmų recirkuliacija naudojama kaip viena iš pigiausių priemonių mažinti azoto oksidų susidarymą liepsnos fronte. Deguonies koncentracija dūmuose dažniausiai siekia ne mažiau kaip 5 procentus.

Kaip parodyta 4.4 pav., liepsnos fronto greičio ir sluoksnio temperatūros modeliavimo rezultatai pakankamai gerai sutampa su eksperimentiniais.



(a)

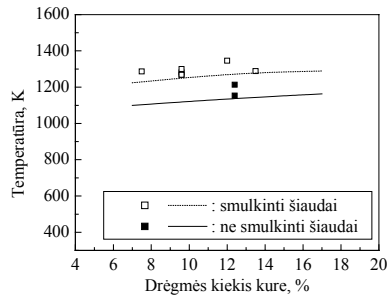
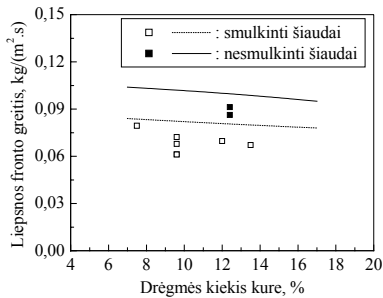


(b)

4.4 pav. Eksperimentiniai ir modeliavimo rezultatai: liepsnos fronto greičio (a) ir temperatūros (b) priklausomybė nuo deguonies kiekio ore.

Deguonies koncentracijos didinimas ore esant pastoviam oro srauto greičiui labai skiriasi nuo nagrinėto atvejo pirmiau, kai deguonies koncentracija didinama tiekiant didesnę oro srautą (4.2 pav.). Šiek tiek sumažinus deguonies koncentraciją ore, liepsnos fronto greitis labai sumažėja, o šiek tiek sumažinus oro srauto greitį degimo fronto greitis mažėja labai nedaug. Tai galima paaiškinti tuo, kad tiekiant mažiau oro ne tik mažėja deguonies koncentracija, bet ir mažiau aušinamas jau išilęs oro srautas esantis arti reakcijos (degimo) zonos, atitinkamai mažiau šilumos reikia sunaudoti ir orui pašildyti reakcijos zonoje. Tuo tarpu mažinant deguonies koncentraciją tiekiamame į kūryklą ore sumažėja tik šilumos išsiskyrimas degant kurui.

4.5 pav. parodyta kuro drėgmės įtaka liepsnos fronto greičiui ir kuro sluoksnio temperatūrai, palyginti modeliavimo rezultatai su eksperimentiniais.



(a)

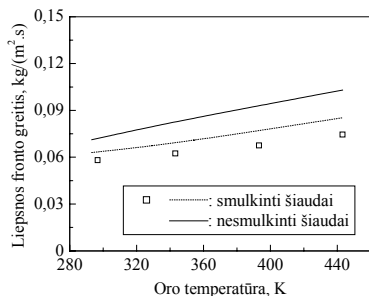
(b)

4.5 pav. Eksperimentiniai ir modeliavimo rezultatai: liepsnos fronto greičio (a) ir temperatūros (b) priklausomybė nuo drėgmės kiekio ore.

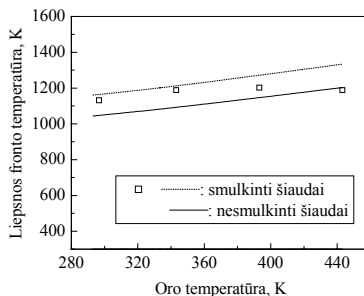
Biomosės drėgnumas gali kisti nuo 10 iki 50 proc., atsižvelgiant į biomasės rūšį, saugojimo sąlygas bei paruošimo kurui būdą. Kuro drėgnumas lemia šilumos išsiskyrimo bei pernešimo procesus reakcijos zonoje, atitinkamai kuro užsidegimą bei dujų susidarymo mechanizmus, todėl buvo atlikti eksperimentai keičiant drėgmės kiekį nuo 7 iki 21 procento. Šiaudai buvo paliekami džiūti keletą valandų kambario temperatūroje arba papildomai sudrėkinami. Didėjant kuro drėgnumui, kurui džiovinti bei uždegti daugiau energijos reikia perduoti į pašildymo zoną, tačiau liepsnos fronto greitis nedaug mažėja (4.5a pav.). Liepsnos fronto temperatūra (4.5b pav.) didinant kuro drėgnumą beveik nekinta. Tai galima būtų paaiškinti tuo, kad vandens garai dalyvauja oksidacijos reakcijose ir didina dujų mišinio riebumą reakcijos zonoje. Modeliavimas parodė, kad šiaudų nebūtų galima uždegti kuro drėgnumui esant 33 procentų.

Realiose kūryklose tiekiamas oras degimo procesui yra dažniausiai pašildomas iki 150°C siekiant padidinti kuro konversijos į šiluminę energiją efektyvumą. Todėl šiame darbe eksperimentiškai buvo tirta oro pašildymo įtaka degimo proceso charakteristikoms. Oras buvo pašildomas prieš tiekiant į kūryklą nuo 20 iki 230°C temperatūros esant nuolatiniam 0,13 kg/(m²·s) oro srauto greičiui. 4.6 pav. parodyta pašildyto oro įtaka liepsnos fronto greičiui ir kuro sluoksnio temperatūrai, palyginti modeliavimo rezultatai su eksperimentais. Modeliavimo rezultatai visiškai atitinka eksperimentinių rezultatų kitimo charakterį, tačiau skiriasi naudojant skirtingo tipo šiaudus. Abu degimo parametrai – tiek liepsnos frontas, tiek ir temperatūra – didėja didėjant tiekiamam oro kiekiui. Dėl tiekiamo karšto oro į kūryklą apatiniame kuro sluoksnyje ima garuoti drėgmė. Oro srautu pernešamas šilumos kiekis sunaudojamas vandeniui išgarinti apatiniuose kuro sluoksniuose, todėl oro temperatūra sumažėja, ir viršutinis kuro sluoksnis esantis žemiau reakcijos

fronto yra šaltas (apie 40°C). Pašildymo fronto greitis yra apie 30 proc. mažesnis už liepsnos fronto greitį, o tai reiškia, kad didesnė kuro sluoksnio dalis yra šalta.



(a)



(b)

4.6 pav. Eksperimentiniai ir modeliavimo rezultatai: liepsnos fronto greičio (a) ir temperatūros (b) priklausomybė nuo oro temperatūros.

Atsižvelgiant į tiekiamo oro srauto greitį ir temperatūrą, ore esantys vandens garai gali kondensuotis viršutiniuose kuro sluoksniuose. Drėgmė, išgaravusi iš apatinių kuro sluoksnių, suformuoja garavimo frontą, judantį iš apačios į viršų, jis tam tikru laiko momentu susiduria su degimo frontu, jundančiu iš viršaus žemyn. Po susidūrimo degimo fronto greitis padidėja dėl sąlyginai sauso kuro sluoksnio apačioje. Todėl didinant tiekiamo oro temperatūrą vidutinis liepsnos fronto greitis sluoksnyje didėja.

Pašildžius tiekiamo oro temperatūrą iki 230°C bei uždegus kuro sluoksnį iš viršaus, po kelių minučių kuras savaime užsidega sluoksnio apačioje. Susiformavę du liepsnos frontai – iš apačios ir iš viršaus – juda vienas priešais kitą. Tačiau netrukus, savaime užsidegus kurui apačioje, deguonis visiškai sunaudojamas reakcijos fronte, o susidarę suodžiai užgesina iš viršaus judantį liepsnos frontą. Toliau pirolizė bei anglies degimas vyksta vienu metu.

4. IŠVADOS

Eksperimentiškai ištirta oro kiekio, oro pašildymo, šiaudų drėgnumo, deguonies koncentracijos į kūrįklą tiekiamame ore įtaka degimo procesą kuro sluoksnyje apibūdinančioms charakteristikoms (degimo greičiui ir temperatūrai, teršalų susidarymui). Nustatyta, kad teoriniams skaičiavimams naudotas matematinis modelis yra tinkamas modeliuoti kietojo kuro degimo procesą stacionariame sluoksnyje. Modelis pakankamu tikslumu aprašo vandens garavimo ir pirolizės procesus, CO ir CO₂ susidarymo heterogenines reakcijas, CO, H₂, CH₄, C_xH_y ir dervų susidarymo homogenines reakcijas, šilumos ir masės pernešimą tarp dujų ir kuro (anglies) dalelių.

1. Nustatyta, kad deginant smulkintus šiaudus sluoksnyje vyksta nestabilus degimas naudojant didelį oro srauto greitį (didesnį kaip $0,32 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$). Tokiu atveju kuro sluoksnyje susidarę oro kanalai lemia degimą apibūdinančias charakteristikas (degimo frontą ir temperatūrą). „Verdančio“ sluoksnio atsiradimas sudaro geresnes sąlygas orui su kuru susimaišyti ir pagreitina kuro užsidegimo procesą.
2. Nustatyta, kad degimo fronto greitis yra 50 proc. didesnis kuro sluoksnyje esant du kartus mažesniai sluoksnio tankiui bei didesnėms kuro dalelėms, tačiau jo temperatūra nekinta. Deginant smulkintus ir nesmulkintus šiaudus pasiekiami maksimali iki 1000°C temperatūra. Deginant šiaudų granules temperatūra pasiekiami daugiau kaip 1200°C ir tai galima paaiškinti vienu metu vykstančių lakių medžiagų ir šiaudų anglies degimu. Šiaudų degimo atveju temperatūrai pakilus daugiau kaip 1000°C formuojasi šlakas. Tyrimai patvirtina, kad didinant tiekiamo į kūryklą oro srauto greitį bei deguonies koncentraciją ore daugiau degimo produktų oksiduojama reakcijos fronte, išsiskiria didesnis šilumos kiekis, pagreitėja lakiųjų medžiagų išsiskyrimo bei užsidegimo procesai.
3. Nustatyta, kad didinant kuro drėgnumą nuo 7,5 iki 18 proc., degimo fronto greitis mažėja, tačiau temperatūra beveik nekinta. Kritinis šiaudų drėgnumas yra 21 proc. ir jam esant smulkinti šiaudai eksperimento sąlygomis neužsidega.
4. Atskleista, kad esant mažesniai šildymo fronto greičiui už degimo fronto greitį, didesnė kuro sluoksnio dalis išlieka šalta, todėl į kūryklą tiekiamą orą pašildžius nuo 20 iki 170°C vidutinis degimo fronto greitis ir temperatūra pirolizės zonoje didėja nedaug. Tiriant į kūryklą tiekiamo oro kritinę pašildymo temperatūrą, gauta savaiminė šiaudų užsidegimo temperatūra lygi 230°C .
5. Tiriant teršalų susidarymą nustatyta, kad azoto oksidų koncentracija kuro sluoksnyje didėja didinant oro srauto greitį, deguonies koncentraciją tiekiamame ore ir kuro drėgnumą. Oro srauto greičio didėjimas kure esančio azoto konversiją į NO pirolizės zonoje padidina nuo 1 iki 8,6 proc., o CO koncentraciją mažina. Tačiau CO koncentracija didėja didinant deguonies koncentraciją į kūryklą tiekiamame ore. Pastarųjų faktorių įtaka CO₂ koncentracijai yra nežymi. Didinant oro srauto greitį kuro anglies konversija į CO ir CO₂ dujas pirolizės zonoje deginant smulkintus šiaudus pasiekta 90 proc., nesmulkintus šiaudus – 63 proc., o deginant šiaudų granules – beveik 100 proc.
6. Eksperimentų kartotinumui testas parodė, kad eksperimentiniai rezultatai yra atkuriami bei aprobuoti ir gali būti naudojami matematinėse modeliuose kūrinių bei tobulinimui.
7. Tiriant degimo procesą panaudojant matematinį modelį nustatyta detali liepsnos fronto struktūra, dujų junginių (CO ir CO₂) koncentracija, kuro sluoksnyje, liepsnos fronto greitis ir temperatūra.

8. Tyrimų rezultatai parodė, kad keičiant pradines degimo sąlygas eksperimentinių rezultatų kitimas sutampa pakankamu tikslumu su gautais liepsnos fronto greičio, temperatūros ir dujinių junginių koncentracijos rezultatais panaudojant matematinį modelį.
9. Kriterinės analizės pagalba nustatyta šiaudų sluoksnio efektyvaus šilumos laidumo, šiaudų savitosios šilumos ir šiaudų tankio įtaka, kuri yra pagrindinė degimo procesui sluoksninėje kūrykloje.

Pagrindiniai žymėjimai

m_{cg} – anglies masė dujose (CO+CO₂), g; m_{cf} – anglies masė šiauduose, g; X_c – anglies konversijos koeficientas, %; [CO] ir [CO₂] – atitinkamai anglies monoksido ir dioksido dujų koncentracija dūmuose likutinės anglies degimo ir pirolizės stadijose, %; V_{air} – tiekiamo į reaktorių oro kiekis, m³/s; M_c – anglies molekulinė masė, g/mol; t – laikas, s; x – koordinatė išilgai kuro sluoksnio aukščio, m; r_g – kuro konversija iš kietosios į dujinę fazę dėl drėgmės garavimo, lakių medžiagų išsiskyrimo ir anglies degimo; D – molekulinė difuzija, m²/s; $D_{a,eff}$ – efektyviosios ašinės dispersijos koeficientas, m²/s, $D_{a,eff} = D_i + 0,5v_g d_p$; $k_{eff,0}$ – šilumos laidumas, kai nėra dujų srauto tekėjimo, W/(m·K); h – šilumos atidavimo koeficientas konvekcija, W/(m²·K); h_s , h_g – kietojo ir dujinio kuro entalpija, J/kg; h_{rs} – šilumos atidavimo koeficientas radiacija, W/(m²·K); C – dujinių junginių koncentracija, mol/m³; C_p – dujų savitoji šiluminė talpa, J/(mol·K); $C_{w,s}$ – drėgmės koncentracija ant kuro dalelės paviršiaus, kg/m³; d_p – šiaudų dalelės diametras, m; k – kuro sluoksnio šilumos laidumo koeficientas, W/(m·K); k_{air} – oro šilumos laidumas, W/(m·K); k_g – dujų šilumos laidumas, W/(m·K); k_d – masės pernešimo koeficientas, m/s; k_{eff} – efektyvus šilumos laidumo koeficientas, W/(m·K); k_s – šiaudų šilumos laidumas, W/(m·K); l_s – kuro sluoksnio storis, m; l_v – dujų srauto sluoksnio storis, m; m – masė, kg; \dot{m}_{air} – masinis oro srauto greitis, kg/(m²·s); n – empirinis parametras; Pr – Prandtlio skaičius; Q – tūrinis šilumos išsiskyrimas arba nuostolis, W/m³; Q_c , Q_r – šilumos srautas dėl konvekcijos/laidumo ir radiacijos; r_1 , r_2 – vidinis ir išorinis kuro sluoksnio spinduliai atitinkamai, m; r_c – CO/CO₂ santykis; Re – Reinoldso skaičius; S – tūrinis kuro sluoksnio paviršiaus plotas, m²/m³; T_a – kambario temperatūra, K; T_b – sluoksnio temperatūra, K; T , T_e – temperatūra, K; v – dujų greitis, m/s; ε_b – kuro sluoksnio porėtumas; ρ – tankis, kg/m³; ε_s – šiaudų juodumo laipsnis; Δl – atstumas tarp dviejų kuro dalelių, m.

Indeksai: g – dujinė fazė; s – kietoji fazė, b – sluoksnis, c – anglis, f – kuras.

LITERATŪRA

1. Hobbs M. L., Radulovic P. T., & Smoot L. D. Combustion and gasification of coals in fixed beds. *Progress Energy and Combustion Science* 19, 1993. 505–586 p.
2. Kreisinger, Henry, Ovitz, F. K., and Augustine C. E. Combustion in the fuel bed of hand-fired furnaces: Tech. Paper 137, Bureau of Mines, 1916. 76 p.
3. Lamb B.W., Bilger R.W. The combustion of wet cellulosic fuel bed. Second Australian Conference on Heat and Mass Transfer. The University of Sydney, 1977. 501–508 p.
4. Stubington J. F. Fenton H. Combustion characteristics of dried and pelletized baggase. *Combustion Science and Tehnology* 37, 1984. 285–299 p.
5. 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. ISBN 90-9008751-6, 1995.
6. Shin D., Choi S. The combustion of simulated waste particles in a fixed bed. *Combustion and flame* 121, 2000. 167–180 p.
7. 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* 82, 2003. 2205–2221 p.
8. 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* 83, 2004. 1123–1131 p.
9. Saastamoinen J.J., Horttanainen M., Sarkomaa P. Ignition wave propagation and release of volatiles in beds of wood particles. *Combustion Science and Technology* 165, 2001. 41–60 p.
10. Thunman H., Leckner B. Ignition and propagation of a reaction front in cross-current bed combustion of wet biofuels. *Fuel* 80, 2001. 473–481 p.
11. Bech N., Wolff L., Germann L. Mathematical modelling of straw bale combustion in cigar burners. *Energy & fuels* 10, 1996. 276–283 p.
12. 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* 19, 2000. 199–208 p.

PUBLIKACIJŲ SARAŠAS

STRAIPSNAI

leidiniuose, įrašytuose į Mokslinės informacijos instituto (ISI) sąrašą

1. Jensen A.D., H. Zhou., Glarborg P., Jensen P.A. and Kavaliauskas A. Numerical modeling of straw combustion in a fixed bed // Fuel. ISSN 0016-2361 Elsevier, 2005, nr. 84, p. 389–403.

STRAIPSNAI

Lietuvos leidiniuose, įrašytuose į Mokslo ir studijų departamento patvirtintą sąrašą

1. Kavaliauskas A., Katinas V., Jensen A., Jensen P. Kietojo kuro degimo sluoksnyje eksperimentinis tyrimas // Energetika. ISSN 0235-7208, 2004, nr. 3, p. 12–20.
2. Kavaliauskas A., Vaitiekūnas P. Reinoldso įtempimų modeliavimas oro srautui aptekant kliūtį kvadratiname kanale // Energetika. ISSN 0235-7208, 2001, nr. 3, p. 38–43.

STRAIPSNAI

konferencijos pranešimų medžiagoje

1. Kavaliauskas A., Katinas V., Dam-Johansen K., Jensen A., Jensen P. A., Glarborg P. Investigation of biomass combustion on grates // Proceedings of the 1st International Ukrainian Conference on Biomass for energy, 23–27 September 2002. Kyiv, Ukraine.
2. Vrubliauskas S., Kavaliauskas A. Medienos kuro kokybės klausimai // Šilumos energetika ir technologijos: konferencijos pranešimų medžiaga, Kauno technologijos universitetas. 2004. P. 299–304.
3. Kavaliauskas A., Katinas V., Dam-Johansen K. Pradinių sąlygų įtaka sluoksniniam biomasės degimo procesui // Šilumos energetika ir technologijos: konferencijos pranešimų medžiaga, Kauno technologijos universitetas. 2003. P. 288–291.
4. Savickas J., Kavaliauskas A. Subalansuotos plėtros aspektai energetikoje // Šilumos energetika ir technologijos: konferencijos pranešimų medžiaga, Kauno technologijos universitetas. 2003. P. 292–298.
5. Kavaliauskas A., Katinas V., Dam-Johansen K. Biomasės termocheminės konversijos procesų sluoksninėse kūryklose tyrimas // Šilumos energetika ir technologijos: konferencijos pranešimų medžiaga, Kauno technologijos universitetas. 2002. P. 151–156.

6. Savickas J., Kavaliauskas A. Biomės naudojimo energetikos tikslams efektyvumo įvertinimas // Šilumos energetika ir technologijos: konferencijos pranešimų medžiaga, Kauno technologijos universitetas. 2001. P. 415–420.

Informacija apie autorių

Andrius Kavaliauskas gimė 1976 m. Kėdainiuose. 1994 m. baigė Kėdainių „Aušros“ vidurinę mokyklą, 1994–2000 m. studijavo Kauno technologijos universitete, ten 1998 m. įgijo termoinžinerijos mokslo bakalauro laipsnį, o 2000 m. – termoinžinerijos magistro mokslo laipsnį. 2000 m. Andrius Kavaliauskas pradėjo doktorantūros studijas Lietuvos energetikos institute, Atsinaujinančių energijos šaltinių laboratorijoje. 2000 – 2004 m. laikotarpyje periodiškai stažavosi Danijos technikos universitete.

Straw combustion in a packed bed

Abstract of Doctoral Dissertation

Behavior of combustion process in the 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 of the paths of pollutants formation and destruction as well. The large fixed bed reactor was used for obtaining the experimental results of straw combustion. The fixed bed reactor contains a column of biomass fuel that 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 inlet air flow velocity and temperature, moisture content in the fuel and oxygen concentration in the inlet air on combustion parameters such as ignition front velocity ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$), 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. A 1-D transient heterogeneous model was used for straw combustion in a fixed bed. The processes included in the model comprise: moisture evaporation, biomass pyrolysis, heterogeneous reaction of char forming CO and CO_2 , homogeneous reactions of CO , H_2 , CH_4 , C_xH_y and tar, heat and mass transfer between the gas and solid phases. The model provided detailed structure of the ignition flame front, gas species concentration such as CO and CO_2 at the bed surface, ignition flame front rate, temperature and its structure. From a qualitative point of view, the predictions and measurements such as ignition flame front rate and

temperature, and gas species concentration are in good agreement at different operating conditions such as the primary air flow rate, preheating of the primary air, oxygen concentration and moisture content of straw. A parametric study indicates that effective heat conductivity, heat capacity of straw, and straw packing condition have significant effects on the model predictions of the straw combustion behavior in the fixed bed while others are less important.