

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTES
Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte
Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts

Vera SUZDALENKO
Doktora studiju programmas „Vides zinātne” doktorante

**KOKSNES GRANULU LĪDZDEDZINĀŠANA AR
GĀZVEIDA FOSILO KURINĀMO**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Dr.sc.ing., profesors
M.GEDROVIČS

Konsultante
Dr.phys., pētniece
M.ZAĶE

Rīga 2013

UDK 662.6(043.2)
Su 980 k

**Suzdaļenko V. Koksnes granulu līdzdedzināšana
ar gāzveida fosilo kurināmo**

Promocijas darba kopsavilkums. –
Rīga: RTU, 2013. – 34. lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU Vides aizsardzības un
siltuma sistēmu institūta 2013.gada 30.maija
lēmumu, protokols Nr.34.

ISBN 978-9934-10-449-7

**PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI
RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2013. gada 29. augustā plkst. 14:00 Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Kronvalda bulvārī 1, 21. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Dr.hab.sc.ing., profesors Ivars Veidenbergs,
Rīgas Tehniskās universitāte

Dr.sc.ing Ivars Bekmanis,
LZA Fizikālās enerģētikas institūts

Dr.sc.ing., associated profesor Edita Baltrenaite,
Gediminas Vilnius Technical University

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājusi doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Vera Suzdaļenko

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tam ir ievads, 4 nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 57 attēli, 16 tabulas un kopā 94 lapas. Literatūras sarakstā ir 87 nosaukumi.

SATURS

Darba aktualitāte	5
Darba mērķis un uzdevumi	5
Pētījumu metodika	6
Darba zinātniskā novitāte.....	6
Darba praktiskā nozīme	7
Darba aprobācija	7
Autora publikācijas	8
1. EKSPERIMENTĀLĀ IEKĀRTA UN IZMANTOTĀS IZEJVIELAS	10
1.1. Izejvielu raksturojošie parametri	11
1.2. Eksperimentālo pētījumu apraksts.....	12
2. DATU APSTRĀDES UN APRĒĶINU METODIKA.....	14
2.1. Gāzes analizatora datu apstrāde.....	14
2.2. Maksimālo CO ₂ emisiju aprēķins	14
2.3. Datu statistiskās apstrādes metodes	16
3. EKSPERIMENTĀLO PĒTĪJUMU REZULTĀTU ANALĪZE	17
3.1. Koksnes granulu un gāzes līdzdedzināšanas izpētes rezultāti un to analīze.....	17
3.2. Magnētiskā lauka ietekmes uz degšanas procesu izpēte.....	23
SECINĀJUMI.....	31
Pielikumi.....	34

Darba aktualitāte

Mūsdienās ilgtspējīgai attīstībai ir ļoti liela nozīme, jo pasaulei strauji attīstoties, tiek patērēts vairāk dabas resursu, palielinās atkritumu daudzums un atmosfērā nonāk piesārņojošas emisijas. Ilgtspējīga attīstība ir svarīga visās jomās: vides aizsardzības, ekonomiskajā un sociālajā. Ekonomiskā izaugsme prasa lielāku energoresursu patēriņu. Pašlaik fosilie kurināmie ieņem pirmo vietu jeb 74,6 % pasaules enerģijas patēriņā. Ar fosilo kurināmo izmantošanu ir saistītas vairākas būtiskās problēmas: pirmkārt, šo kurināmo krājumi ir ierobežoti, otrkārt, fosilo kurināmo krājumi ir koncentrēti tikai dažās valstīs (Krievijas Federācijā, Saūda Arābijā, Apvienotajos Arābu Emirātos, Venecuēlā u. c.), treškārt, dedzinot fosilos kurināmos, gaisā tiek emitētas siltumnīcefekta gāzes (CO₂, CH₄, SO_x, NO_x u. c.).

Eiropas ilgtermiņa attīstības stratēģija balstās uz atjaunīgajiem energoresursiem (AER). Lai veicinātu AER izmantošanu, 2009. gada 23. aprīlī tika apstiprināta Eiropas Komisijas un Padomes Direktīva 2009/28/EK par atjaunojamo energoresursu izmantošanas veicināšanu. Viens no šīs Direktīvas galvenajiem mērķiem ir 20 % atjaunīgo energoresursu saražotās enerģijas īpatsvars kopējā Eiropas Savienības dalībvalstu energopatēriņā. Latvijas individuālais mērķis ir viens no visaugstākajiem Eiropas Savienībā – 40 %. Pēc EUROSTAT datiem 2011. gadā AER īpatsvars kopējā energoresursu patēriņā Latvijā ir 33 %, un šis rādītājs nav būtiski mainījies kopš 2004. gada.

Darba aktualitāti nosaka vairāki faktori:

- Latvijā ir pietiekami liels kurināmās koksnes izmantošanas potenciāls – pēdējo 100 gadu laikā Latvijas mežainums ir dubultojies un sasniedzis 50,9 %;
- neskatoties uz tik lielu potenciālu, koksnes īpatsvars pārveidošanas sektorā ir nepietiekams – tikai 15 %;
- relatīvi zemais lietderības koeficients kurināmo koksni izmantojošās katlu mājās un koģenerācijas stacijās. Piemēram, 2011. gadā kurināmās koksnes katlu mājās un koģenerācijas stacijas strādāja ar 65 % efektivitāti;
- dabasgāzes īpatsvars pārveidošanas sektorā ir ap 80 %, bet tās arvien pieaugošā cena, rada nosacījumus daļējai dabasgāzes aizstāšanai ar kurināmo koksni, vienlaikus nodrošinot efektīvākus koksnes sadedzināšanas apstākļus.

Darba mērķis un uzdevumi

Promocijas darbā aprakstīto pētījumu mērķis ir izpētīt koksnes granulu un gāzveida fosilā kurināmā līdzdedzināšanas ietekmi uz emisiju veidošanos,

efektivitāti un saražoto siltumenerģijas daudzumu. Darba mērķa sasniegšanai tika izvirzīti šādi izpētes uzdevumi:

1. veikt eksperimentus, līdzdedzinot dažāda mitruma satura koksnes granulas ar gāzveida fosilo kurināmo – propānu/butānu maisījumu;
2. izanalizēt iegūtos eksperimentālos datus un uzrakstīt empīriskos vienādojumus, kas apraksta koksnes granulu mitruma satura un propāna/butāna padeves ietekmi uz emisiju veidošanos (CO_2 , CO , NO_x), temperatūru, efektivitāti un saražoto siltumenerģiju;
3. veikt eksperimentus, lai noteiktu magnētiskā lauka ietekmi uz līdzdedzināšanas un koksnes granulu degšanas procesu;
4. izanalizēt pastāvīgā magnēta ietekmi uz degšanas procesa dinamiku – virpuļplūsmas veidošanos, emisiju veidošanos un efektivitāti.

Pētījumu metodika

Promocijas darba ietvaros veiktais pētījums ir sadalāms divās daļās. Pirmajā daļā tika veikti eksperimenti, izmantojot speciāli konstruētu eksperimentālu iekārtu. Šajā iekārtā koksnes granulas ar dažādu mitruma saturu ($W = 8\%$, 15% , 20% un 25%) tika dedzinātas bez propāna/butāna padeves, kā arī ar propāna/butāna padevi. Gāzes kurināmā padeve tika mainīta robežās no $0,9\text{ kJ/s}$ līdz $1,27\text{ kJ/s}$. Eksperimentos par pastāvīgā magnēta ietekmi uz degšanas procesu iekārta tika ievietota pastāvīgajā magnētiskā laukā, kas nodrošināja aksiālu un radiālu magnētiskā lauka indukcijas gradienta veidošanos liesmas degšanas zonā.

Otrajā daļā tika veikta eksperimentālo rezultātu regresijas analīze, kuras rezultātā tika iegūti empīriskie vienādojumi. Iegūtie vienādojumi apraksta koksnes granulu mitruma satura un propāna/butāna padeves ietekmi uz emisijām, efektivitāti un saražotās siltumenerģijas daudzumu. Izmantojot Stjūdenta kritēriju pie noteiktā nozīmības līmeņa P un brīvības pakāpēm f , tika pārbaudīts, vai visi vienādojuma parametri (mitruma saturs koksnē un propāna/butāna padeve) ir būtiski un saglabājami vienādojumā, kā arī tika pārbaudīts vienādojumu adekvātums, izmantojot Fišera kritēriju F .

Darba zinātniskā novitāte

Darbā iegūtie eksperimentālās izpētes rezultāti un izstrādātie empīriskie vienādojumi ļauj pilnvērtīgi analizēt līdzdedzināšanas un magnētiskā lauka ietekmi uz emisiju veidošanos, efektivitāti un saražoto siltumenerģiju.

Propāna/butāna padeve koksnes granulu slānī nodrošina intensīvāku gaistošo savienojumu veidošanos un uzliesmošanu degšanas procesa sākuma stadijā, kā arī pilnīgāku gaistošo savienojumu sadedzināšanu, nodrošinot tīrāku un efektīvāku siltumenerģijas ražošanu. Izvērtējot magnētiskā lauka ietekmi uz degšanas procesu, var rast apliecinājumu, ka magnētiskais lauks būtiski ietekmē

liesmas virpuļplūsmas veidošanos. Magnētiskā lauka un liesmas mijiedarbības procesus var izmantot, lai ietekmētu plūsmas dinamiku, liesmas temperatūru un degšanas produktu sastāvu.

Darba praktiskā nozīme

Promocijas darbam ir liela praktiskā nozīme, jo darba mērķis ir palielināt koksnes biomasas izmantošanu enerģijas ražošanā, nodrošinot efektīvāku tās izmantošanu. Darba rezultātiem ir dažādas mērķa grupas:

- siltumenerģijas ražotāji – dedzinot slapjo koksnī ar gāzveida fosilo kurināmo, ir iespējams nodrošināt efektīvāku un tīrāku biomasas sadegšanu;
- biomasas sadedzināšanas iekārtu ražotāji – izveidot iekārtas biomasas līdzdedzināšanai ar gāzes kurināmo;
- iedzīvotāji un pašvaldības – racionāla un efektīva koksnes biomasas izmantošana.

Darba aprobācija

Par pētījuma rezultātiem tika ziņots un tie tika apspriesti šādās zinātniskajās konferencēs:

1. seminārā projekta CHP Goes Green ietvaros ar prezentāciju „Biomasas un gāzes līdzdedzināšanas izpētes rezultāti” – 2013. gada 14. maijā Rīgā;
2. 53. RTU zinātniskajā konferencē, sekcijā „Vides un klimata tehnoloģijas”, ar stenda referātu „The Regulation Possibilities of Biomass Combustion” – 2012. gada 11.-12. oktobrī Rīgā;
3. 10. starptautiskajā ICheaP konferencē ar referātu „The Effect of Co-Gasification of Biomass Pellets with Gas on the Thermal Degradation of Biomass” – 2011. gada 8.-11. maijā Florencē;
4. 69. Latvijas Universitātes zinātniskajā konferencē ar stenda referātu „Degšanas procesu dinamikas kontroles iespējas virpuļplūsmā” – 2011. gada 9. februārī Rīgā;
5. 51. RTU zinātniskajā konferencē, sekcijā „Vides un klimata tehnoloģijas”, ar referātu „The modification of wood pellets and propane co-firing in a magnetic field” – 2010. gada 12. oktobrī Rīgā;
6. 50. RTU zinātniskajā konferencē, sekcijā „Vides un klimata tehnoloģijas”, ar referātu „The magnetic field effect on the swirling combustion of the renewable fuel” – 2009. gada 13. oktobrī Rīgā;
7. seminārā “Current and future woody biomass for energy – Monitoring use and understanding technology” ar stenda referātu “Co-firing of wood pellets with propane for environmental friendly energy production” – 2009. gada 15. septembrī Rīgā.

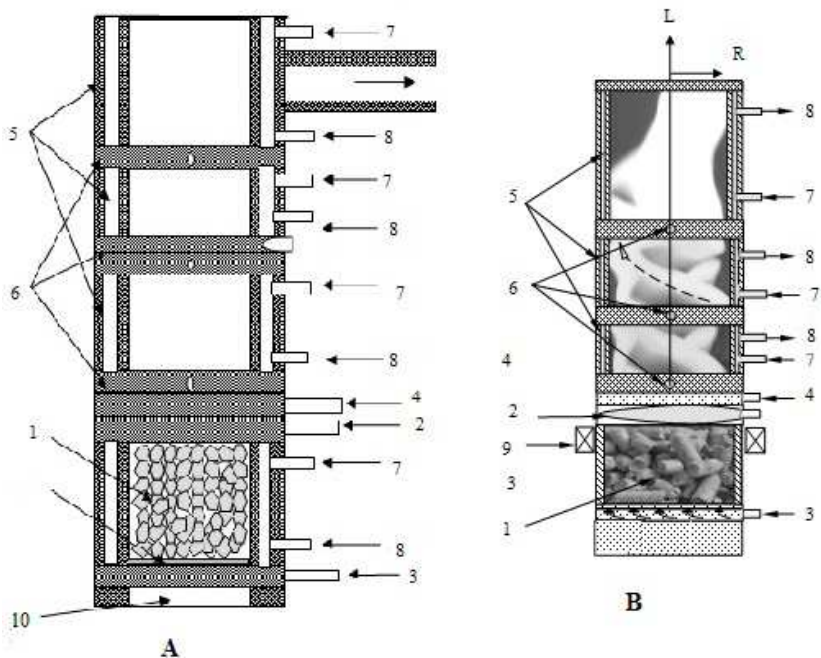
Autora publikācijas

1. Abricka M., Barmina I., Suzdalenko V., Zake M. Combustion Dynamics at biomass Thermochemical conversion downstream of integrated gasifier and combustor // Fosilā kurināmā un atjaunojamo energoresursu līdzsadedzināšana tīrākai un efektīvākai siltumenerģijas ražošanai // Engineering for Rural Development: 12. Starptautiskā konference, Latvija, Jelgava, 23.-24. maijs, 2013. – 638-642 lpp.
2. Suzdalenko V., Gedrovičs M., Zake M., Barmina I. The Regulation Possibilities of Biomass Combustion // Scientific Journal of RTU. 13. series, Environmental and Climate Technologies. – 2012. – Vol.8. – 49-55 p.
3. Barmina I., Lickrastina A., Suzdalenko V., Zake M. Gradient magnetic field promotion of pelletized biomass combustion // Magnetohydrodynamics. – 2012. – Vol.48. – 351-360 p.
4. Suzdalenko V., Zake M., Barmina I., Gedrovičs M. The Effect of Varying Magnetic Gradient on Combustion Dynamic // Scientific Journal of RTU. 13. series, Environmental and Climate Technologies. – 2011. – Vol.6. – 100-105 p.
5. Lickrastina A., Barmina I., Suzdalenko V., Zake M. Gasification of pelletized renewable fuel for clean energy production // Fuel. – 2011. – Vol.90. – 3352-3358 p.
6. Suzdalenko V., Barmina I., Lickrastina A., Zake M. The Effect of Co-Gasification of the Biomass Pellets with Gas on the Thermal Degradation of Biomass // Chemical Engineering Transactions. – 2011. – Vol.24. – 7-12 p.
7. Zaķe M., Barmina I., Buceniēks I., Kriško V. Magnetic Field Control of Combustion Dynamics of the Swirling Flame Flow // Magnetohydrodynamics. – 2010. – Vol.46. – 3-19 p.
8. Barmina I., Zake M., Kriško V., Gedrovičs M. Modification of Wood Pellets and Propane Co-firing in a Magnetic Field // Scientific Journal of RTU. 13. series, Environmental and Climate Technologies. – 2010. – Vol.4. – 16-21 p.
9. Zaķe M., Barmina I., Kriško V., Gedrovičs M., Desņickis A. Experimental study of the Combustion Dynamics of Renewable & Fossil Fuel Co-Fire in Swirling Flame // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. – 2009. – Vol.46 – 3-15 p.
10. Barmina I., Buceniēks I., Gedrovičs M., Kriško V., Zaķe M. The Magnetic Field Effect on the Swirling Combustion of the Renewable Fuel // Scientific Journal of RTU. 13. series, Environmental and Climate Technologies. – 2009. – Vol.3. – 11-18 p.

11. Barmina I., Gedrovičs M., Kriško V., Zaķe M. Co-Firing of the Renewable with Fossil Fuel for the Clean and Effective Heat Energy Production // Scientific Journal of RTU. 13. series, Environmental and Climate Technologies. – 2009. – Vol.2. – 21-29 p.

1. EKSPERIMENTĀLĀ IEKĀRTA UN IZMANTOTĀS IZEJVIELAS

Promocijas darba ietvaros tika veikti eksperimentālie pētījumi par koksnes granulū ar dažādu mitruma saturu līdzdedzināšanu ar propāna/butāna maisījumu un par magnētiskā lauka ietekmi uz degšanas procesu. Visi eksperimenti veikti Latvijas Universitātes Fizikas institūta Siltuma un masas pārnesei akreditētajā laboratorijā, kur tika izveidota speciāla eksperimentālā iekārta. Eksperimentālās iekārtas shēma ir redzama 1.1. attēlā.



1.1. att. Eksperimentālās iekārtas shēma: A – līdzdedzināšana; B – magnētiskā lauka pielietošana

1 – koksnes biomasas gazifikators; 2 – propāna/butāna/gaisa deglis; 3 – primārā gaisa padeve; 4 – sekundārā gaisa padeve; 5 – dzesējamā kanāla sekcijas; 6 – atveres diagnostikas zondēm; 7 – dzesējošā ūdens pievade; 8 – dzesējošā ūdens izvade; 9 – pastāvīgais magnēts; 10 – tērauda siets

Iekārtas galvenās sastāvdaļas ir koksnes biomasas gazifikators (1), propāna/butāna/gaisa deglis (2), kā arī dzesējamā kanāla sekcijas (5), kurās notiek gaistošo savienojumu veidošanās, uzliesmošana un sadegšana. Šis kanāls ir veidots no 3 dzesējamajām sekcijām ar dzesējoša ūdens pievadi (7) un izvadi

(8). Koksnes gazifikācijas nodrošināšanai un pilnīgai gaistošo vielu sadegšanai gazifikatora pamatnē (3) un tā augšējā daļā (4), virs koksnes granulu slāņa tangenciāli caur 2 atverēm (\varnothing 5 mm) tiek pievadīts gaiss. Starp ūdens dzesējamā kanāla sekcijām ir izvietotas sekcijas ar atverēm, kas ir paredzētas diagnostikas zondēm. Zondes ir paredzētas degšanas zonas temperatūras, gāzes sastāva un aksiālā un tangenciālā ātruma mērījumiem. Propāna/butāna/gaisa liesma veidojas, sajaucoties radiālajai propāna/butāna plūsmai un tangenciālajai gaisa plūsmai degļa kanālā. Koksnes granulu slānī ievadītā propāna/butāna liesma nodrošina koksnes granulu ātrāku sasilšanu un termisko sadalīšanos, paātrinot gaistošo vielu izdalīšanos un aizdegšanos.

Pastāvīgais magnēts (9) ar 4 polu pāriem, kuru augstums ir 50 mm, tika piestiprināts zem sekundārā gaisa padeves un propāna/ butāna/gaisa degļa, lai izraisītu aksiālu un radiālu paramagnētiskā skābekļa molekulu pārneši virzienā uz granulu slāņa virsmu, nodrošinot pilnīgāku gaistošo savienojumu un gaisa sajaukšanos degšanas procesa sākuma stadijā. Magnētiskā lauka indukcija (B) virs magnēta poliem savu maksimālo vērtību 120 mT sasniedz pie kanāla ārējās sienas. Eiropas Komisijas un Padomes Direktīva 2004/40/EK par obligātajām drošības un veselības aizsardzības prasībām attiecībā uz nodarbināto pakļaušanu riskam, ko rada fizikāli faktori (elektromagnētiskie lauki), nosaka, ka maksimālais pieļaujamais starojuma līmenis iekārtām ar frekvenci līdz 1 Hz var būt 200 mT. Tas nozīmē, ka eksperimentos izmantotais pastāvīgais magnēts atbilst drošības normatīviem. Magnētiskā lauka indukcijas aksiālais gradients ($\frac{dB}{dL}$) pie kanāla sienas, kas izraisa skābekļa pārneši virzienā uz granulu virsmu, ir 1,56 T/m, bet liesmas centrālajā daļā tas nepārsniedz 0,8 T/m.

1.1. Izejvielu raksturojošie parametri

Visos eksperimentos koksnes granulas tika dedzinātas vienlaicīgi ar propāna/butāna maisījumu un bez tā. Atkarībā no eksperimentiem atšķiras koksnes granulu mitruma saturs (%), daudzums (g), propāna/butāna padeve (kJ/s) un gaisa padeve (l/min).

Koksnes granulas. Eksperimentos par magnētiskā lauka ietekmi uz degšanas procesu tika dedzinātas koksnes granulas ar mitruma saturu 8 %, bet eksperimentos par koksnes granulu līdzdedzināšanu ar propānu/butānu, tika dedzinātas koksnes granulas ar dažādu mitruma saturu: 8 %, 15 %, 20 % un 25 %. Eksperimentos tika dedzināts diskrēts koksnes granulu daudzums: līdzdedzināšanas eksperimentos tika dedzināti 500 g, bet eksperimentos, kur tika izmantots patstāvīgais magnēts, – 320 g.

Propāna/butāna maisījums. Eksperimentu laikā propāna/butāna padeve tika mainīta robežās no 0 līdz 1,55 kJ/s.

Gaisa padeve. Primārā gaisa padeve eksperimentos bija 47 l/min. Tas ir paredzēts koksnes granulu gazifikācijas ierosināšanai. Sekundārā gaisa padeve bija 69 l/min un 71 l/min attiecīgi līdzdedzināšanā un izmantojot magnētisko lauku. Sekundāro gaisu padeva, lai nodrošinātu pilnīgu gaistošo vielu sadegšanu.

1.1 tabula

Izmantoto izejvielu apkopojums

	Līdzdedzināšana	Magnētiskais lauks
Koksnes granulu svars, g	500	320
Mitruma saturs (W), %	8; 15; 20; 25	8
Propāna/butāna padeve, kJ/s	0,9; 1,03; 1,16; 1,27	1,27; 1,37; 1,46; 1,55
Primārā gaisa padeve, l/min	47	47
Sekundārā gaisa padeve, l/min	69	71

1.1 tabulā ir apkopota informācija par divās eksperimentu sērijās izmantotajām izejvielām: līdzdedzināšanai un magnētiskā lauka izmantošanai.

1.2. Eksperimentālo pētījumu apraksts

Eksperimentālo pētījuma laikā LU Fizikas institūtā tika veikts liels eksperimentu skaits, kuru laikā tika izpēfītas divas koksnes granulu degšanas iespējas:

1. dažāda mitruma satura koksnes granulu vienlaicīga sadedzināšana ar propāna/butāna maisījumu;
2. koksnes granulu sadedzināšana, izmantojot magnētisko lauku.

Eksperimentu laikā tika veikti lokālie liesmas temperatūras mērījumi ($T = f(t)$), degšanas produktu temperatūras un sastāva (O_2 , CO_2 , CO , NO_x) mērījumi, efektivitātes mērījumi, kā arī liesmas tangenciālā un aksiālā ātruma radiālā sadalījuma mērījumi dažādās degšanas procesa attīstības stadijās. Tika veikti arī saražotā siltuma daudzuma mērījumi, novērtējot kopējo saražotā siltuma daudzumu.

Lai iegūtu pilnvērtīgus datus par procesiem, kas notiek sadegšanas kamerā, mērinstrumenti – termopāri, dūmgāzu analizatora zonde un Pito caurulīte – liesma degšanas zonā tika ievietoti dažādos augstumos atkarībā no eksperimentu sērijas.

Mērinstrumentu izvietojums virs propāna/butāna/gaisa degļa

	Līdzdedzināšana	Magnētiskais lauks
Pirmais termopāris	157 mm	55 mm
Otrais termopāris	187 mm	380 mm
Dūmgāzu analizators, Pito caur.	386 mm	145 mm

Termopāri tika izvietoti kanāla centrā ($R = 0$), bet dūmgāzu analizatora zonde un Pito caurulīte atkarībā no eksperimenta mērķa tika ievietota kanāla centrā ($R = 0$), veicot liesmas sastāva kinētiskos mērījumus, vai arī tika pārvietota pa kanāla rādiusu, veicot liesmas sastāva un ātruma radiālā sadalījuma mērījumus stacionārajā degšanas procesā. Liesmas sastāva un ātruma radiālā sadalījuma mērījumi tika veikti, pārvietojot zondes ik pa 30 sekundēm virzienā no liesmas centra līdz kanāla sienīnai un atpakaļ. Kanāla diametrs, kurā veidojās degšanas process, ir 60 mm.

Katra eksperimenta ilgums bija 2400 sekundes jeb 40 minūtes, nodrošinot pilnīgu koksnes granulu sadedzināšanu. Visos eksperimentos to sākuma stadijā tika dedzināts tikai propāns/butāns, bet 60. sekundē gazifikatorā tika iebērtas koksnes granulas.

2. DATU APSTRĀDES UN APRĒĶINU METODIKA

Lai iegūtos eksperimentālos datus varētu izmantot analīzei, bija jāveic datu apstrāde un dažādi aprēķini.

Eksperimentālie dati tika iegūti divos veidos: izmantojot datorprogrammu PC-20, kuru izmantoja lokāliem liesmas temperatūras mērījumiem un dzesējamā ūdens temperatūras mērījumiem, kā arī izmantojot gāzes analizatoru TESTO 350-XL piesārņojošo vielu, efektivitātes un degšanas produktu temperatūras noteikšanai.

2.1. Gāzes analizatora datu apstrāde

Gāzu analizators Testo 350-XL dūmgāzu piesārņojumu analīzei izmanto divas mērvienības: O_2 un CO_2 emisiju noteikšanai – procentus (%), bet CO un NO_x – ppm. ppm (*parts per million* – angļu val.) ir mērvienība, kas nav atkarīga no temperatūras un gaisa spiediena ($1 \text{ ppm} = 0,0001 \%$).

Apstrādājot eksperimentālos datus, CO un NO_x dūmgāzu emisijas (ppm) tika pārrēķinātas mg/nm^3 . Šajā gadījumā tika izmantoti normālie apstākļi (temperatūra $0 \text{ }^\circ\text{C}$, spiediens 1013 mba). Lai salīdzinātu dažādos eksperimentos iegūtos datus, tika veikts mērīto emisiju pārrēķins uz atsaucēs apstākļiem – izmantojot skābekļa saturu dūmgāzēs atsaucēs apstākļos ($O_{2ref.}$). Šis lielums mainās atkarībā no izmantotā kurināmā. Piemēram, koksnei $O_{2ref.}$ ir 10% , gāzei (dabasgāzei, propānam, butānam) – 3% . Ņemot vērā iepriekš minētos faktus, CO un NO_x pārrēķinu formula no ppm uz mg/nm^3 ir šāda:

$$CO(mg / nm^3) = CO(ppm) \times 1,25 \times \left[\frac{21 - O_{2ref.}}{(21 - O_{2mer.})} \right] \quad (2.1)$$

$$NO_x(mg / nm^3) = NO_x(ppm) \times 2,05 \times \left[\frac{21 - O_{2ref.}}{(21 - O_{2mer.})} \right] \quad (2.2)$$

2.2. Maksimālo CO_2 emisiju aprēķins

Oglekļa dioksīds (CO_2) ir pilnīgas sadegšanas produkts. Tā maksimālais daudzums, kas var izdalīties degšanas laikā, ir atkarīgs no izmantotā kurināmā veida un sastāva, un to aprēķina, izmantojot šādas formulas:

$$CO_{2max} = \frac{21}{1 + \beta} \quad (2.3)$$

$$\beta = 2.37 \frac{H^d - 0,125O^d}{C^d + 0,375S^d}, \quad (2.4)$$

kur

H^d – ūdeņraža saturs darba masā;

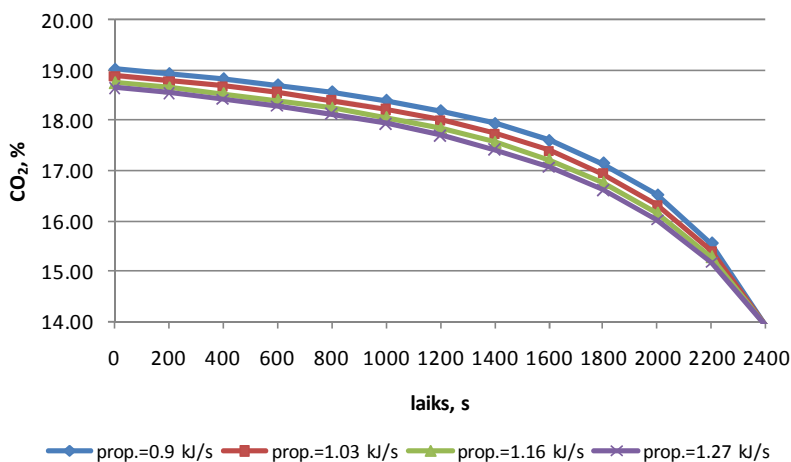
O^d – skābekļa saturs darba masā;

C^d – oglekļa saturs darba masā;

S^d – sēra saturs darba masā.

Dedzinot 1 kg koksnes granulu, maksimālais CO_2 emisiju daudzums ir 20,24 % neatkarīgi no mitruma satura. Dedzinot tikai propāna/butāna maisījumu (1 kg), maksimālais CO_2 emisiju apjoms ir 13,93 %.

Kā jau iepriekš minēts, eksperimentu laikā tika dedzināts diskrets koksnes granulu daudzums (500 g vai 320 g atkarībā no eksperimenta), kas tika iebērts eksperimenta sākumā, un vairs netika papildināts. Degšanas laikā, samazinoties koksnes granulu daudzumam, samazinājās arī oglekļa, skābekļa un ūdeņraža daudzums, tāpēc samazinājās arī maksimālais CO_2 emisiju daudzums.



2.1. att. Maksimālā CO_2 emisiju daudzuma izmaiņas atkarībā no laika un propāna/butāna padeves

2.1. attēlā ir apkopoti rezultāti, kas parāda, kā mainās maksimālais CO_2 emisiju daudzums eksperimentu laikā pie dažādām propāna/butāna padevēm. Eksperimentu sākumā, kad koksnes granulu svars bija 500 g, tika novērots vislielākais CO_{2max} : 19,02 %, 18,88 %, 18,75 % un 18,65 % pie propāna/butāna padeves attiecīgi 0,9 kJ/s, 1,03 kJ/s, 1,16 kJ/s un 1,27 kJ/s. Kad koksnes granulas bija pilnīgi izdegušas, maksimālais CO_2 emisiju daudzums neatkarīgi no gāzes maisījuma ātruma padeves sasniedza 13,93 %.

2.3. Datu statistiskās apstrādes metodes

Promocijas darba ietvaros eksperimentu laikā tika iegūts vairāk nekā 20 tūkstoši datu, no kuriem tika aprēķinātas vidējās vērtības. Iegūtie dati tika apstrādāti, izmantojot divas datu statistiskās apstrādes metodes – korelāciju un regresijas analīzi, kuru mērķis ir iegūt grafiskās un analītiskās sakarības starp mainīgajiem lielumiem.

Izmantojot Microsoft Office Excel programmu, tika uzrakstīti vairāki empīriskie vienādojumi ar diviem neatkarīgajiem mainīgajiem: propāna/butāna padevi (kJ/s) un mitruma saturu (%) koksnes granulās. Ar empīrisko vienādojuma palīdzību tika analizēts, kā šie neatkarīgie mainīgie ietekmē emisiju veidošanos (CO_2 , CO, NO_x), efektivitāti un saražoto siltumenerģijas daudzumu. Katram vienādojumam tika veikts iegūto koeficientu statistiskais novērtējums: tika salīdzināts iegūtais t kritērijs katram koeficientam ar vērtību t_{tab} , kas atrodas Stjūdentā sadalījuma tabulās, atbilstoši nozīmības pakāpei $p = 0,05$ un f brīvības pakāpēm, kā arī pārbaudīts vienādojuma adekvātums, izmantojot Fišera kritēriju.

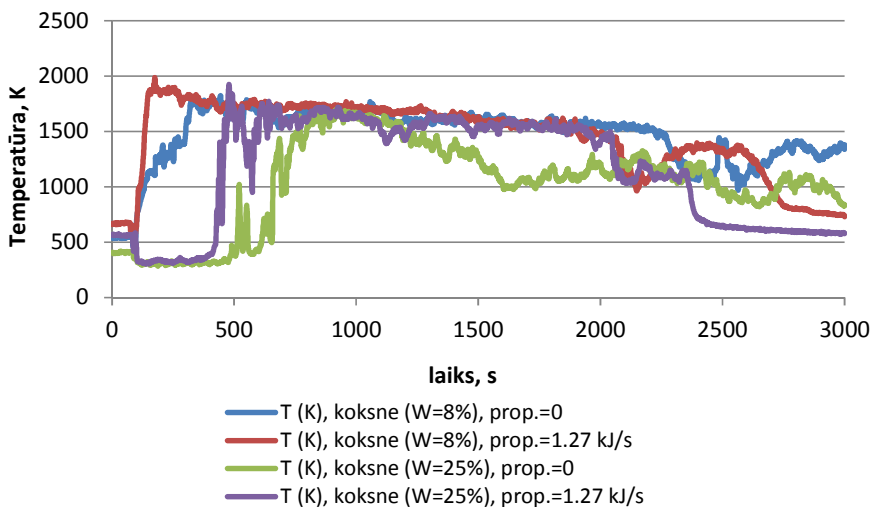
3. EKSPERIMENTĀLO PĒTĪJUMU REZULTĀTU ANALĪZE

Šajā nodaļā ir apkopoti eksperimentālie rezultāti no divu eksperimentu sērijām.

1. Pirmā eksperimentālo pētījumu sērija ir saistīta ar koksnes granulu un propāna/butāna maisījuma līdzdedzināšanu, izvērtējot līdzdedzināšanas ietekmi uz emisiju veidošanos, efektivitāti un saražoto siltumenerģiju.
2. Otrā eksperimentālo pētījumu sērija ir saistīta ar magnētiskā lauka gradienta izmantošanu, izvērtējot magnētiskā lauka gradienta ietekmi uz degšanas procesu un degšanas produktu sastāva veidošanos. Pētījumi par magnētiskā lauka ietekmi uz degšanas procesu veikti, sadedzinot koksnes granulas, kā arī līdzdedzinot koksnes granulas ar propāna/butāna maisījumu.

3.1. Koksnes granulu un gāzes līdzdedzināšanas izpētes rezultāti un to analīze

Koksnes granulu degšanas process sākās ar endotermiskiem koksnes degšanas silšanas, žāvēšanas un termiskās sadalīšanās procesiem. Pētījumi ar dažāda mitruma koksnes granulās un dažādu propāna/butāna padevi iekārtā apliecina, ka koksnes granulu termiskās sadalīšanās procesa sākuma stadijas ilgums ir būtiski atkarīgs no mitruma satura un propāna/butāna padeves koksnes granulu slānī.



- 3.1. Temperatūras izmaiņas (K), dedzinot koksnes granulas ar dažādu mitruma saturu, ar propāna/butāna padevi un bez tās

Dedzinot koksnes granulas ar mitruma saturu 8 % bez propāna/butāna padeves un ar propāna/butāna padevi koksnes granulu slānī, tika novērota gaistošo savienojumu uzliesmošana salīdzinājumā ar mitrās koksnes sadegšanu, ātrāk sasniedzot maksimālo degšanas zonas temperatūru (3.1. att.). Palielinoties mitruma saturam koksnes granulās, temperatūra termiskās sadalīšanās procesa sākuma stadijā samazinās (pēc 100. sekundes), jo dominē endotermiskie mitrās koksnes silšanas un žāvēšanas procesi, ierobežojot gaistošo savienojumu veidošanos un uzliesmošanu.

3.1 tabula

Propāna/butāna padeves ietekme uz maksimālo temperatūru termiskās sadalīšanās procesa sākuma stadijā

Koksnes granulas	W = 8 %	W = 8 %	W = 25 %	W = 25 %
Propāna/butāna padeve	0 kJ/s	1,27 kJ/s	0 kJ/s	1,27 kJ/s
Maksimālā temperatūra	1821 K	1984 K	1699 K	1923 K
Laiks*	445 s	175 s	875 s	479 s

* Laiks, kad tika sasniegta maksimālā temperatūra

Propāna/butāna padeve koksnes granulu slānī nodrošināja ātrāku gaistošo savienojumu veidošanos (3.1. tabula): līdzdedzinot koksnes granulas ar mitrumu 8 % ar propāna/butāna padevi, maksimālā temperatūra tika sasniegta jau 175 sekundē pēc koksnes granulu gazifikācijas procesa ierosināšanas, bet, sadedzinot koksnes granulas bez propāna/butāna padeves, maksimālā degšanas zonas temperatūra tika sasniegta tikai pēc 445 sekundēm. Savukārt granulām ar mitruma saturu W = 25 % ar propāna/butāna padevi maksimālā temperatūra tika sasniegta 479 sekundē, bet, sadedzinot koksnes granulas bez propāna/butāna padeves, maksimālā degšanas zonas temperatūra tika sasniegta tikai pēc 875 sekundēm.

Stabils gaistošo savienojumu degšanas process atkarībā no mitruma satura koksnē veidojās laikā no 500. sekundes līdz 2000. sekundei. Propāna/butāna padeves ietekme uz mitras koksnes degšanas procesu vērojama arī degšanas procesa beigu stadijā ($t > 2000$ s). (3.1. att.). Sadedzinot mitras koksnes granulas bez propāna/butāna padeves iekārtā, degšanas procesa beigu stadijā gazifikatorā paliek aptuveni 25–30 g pārogļotu granulu, kuras turpina lēni gruzdēt, nedaudz palielinot liesmas temperatūru eksperimenta beigās.

Izvērtējot eksperimentālo mērījumu rezultātus par koksnes mitruma satura un propāna/butāna padeves ietekmi uz degšanas zonas vidējo temperatūru, tika iegūts empīriskais vienādojums:

$$T_{vid.} = 1715,23 - 27,15W + 117,83q, \quad (3.1)$$

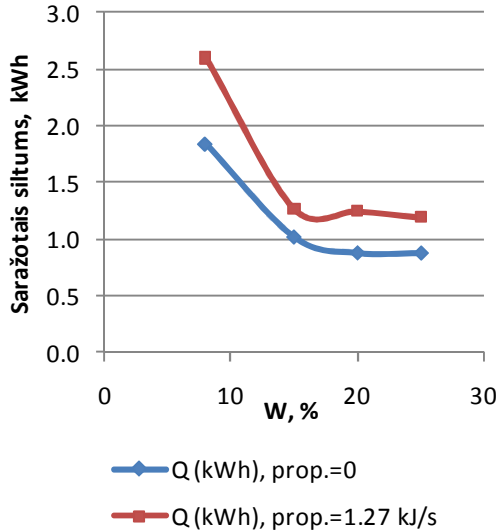
kur

W – koksnes granulu mitruma saturs, %;

q – propāna/butāna padeve, kJ/s.

Empīriskajā vienādojumā (3.1) iegūto koeficientu statistiskais novērtējums ir parādīts 1. tabulā Pielikumos.

Ekspērimētālo pētījumu rezultātā ir konstatēts, ka propāna/butāna padeve koksnes granulu slānī nodrošina ne tikai augstākas temperatūras, bet arī saražotās siltumenerģijas pieaugumu.



3.2. att. Saražotais siltums atkarībā no mitruma satura koksnes granulās un propāna/butāna padeves

Koksnes granulu mitruma palielināšanās samazina saražoto siltuma daudzumu, bet, padodot propānu/butānu degšanas zonas pamatnē, kopējais saražotais siltums palielinās (3.2. att.)

Izvērtējot saražoto siltuma daudzumu iekārtā atkarībā no koksnes granulu mitruma satura un propāna/butāna padeves iekārtā, ir konstatēts, ka šo parametru savstarpējā saistība ir aprakstāma ar empīrisko vienādojumu:

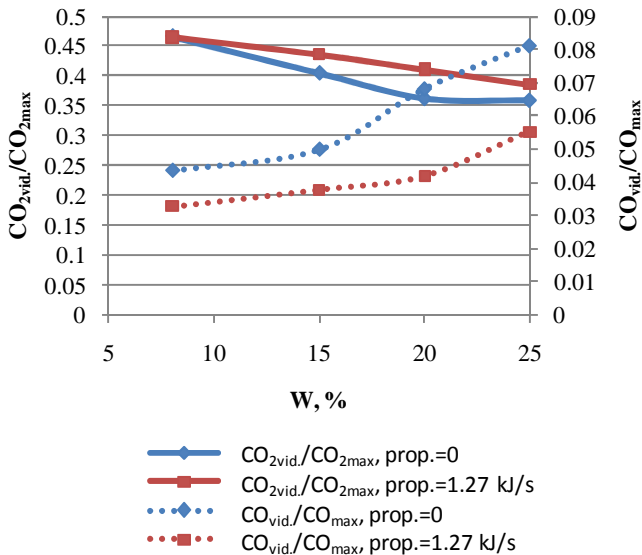
$$Q = 2,42 - 0,08W + 0,35q \quad (3.2)$$

Empīriskajā vienādojumā (3.2) iegūto koeficientu statistiskais novērtējums ir parādīts 1. tabulā Pielikumos.

Propāna/butāna un mitruma satura ietekme uz CO₂ un CO emisijām tika izvērtēta, attiecinot vidējās CO₂ un CO emisijas eksperimenta laikā pret to maksimālo vērtību. CO gadījumam tā bija maksimālā vērtība, kas tika sasniegta

eksperimenta laikā, bet CO₂ maksimālais daudzums tika aprēķināts atkarībā no propāna/butāna padeves ātruma (kJ/s).

Mitruma saturs koksnes granulās ietekmē CO₂ emisiju veidošanos koksnes granulū degšanas procesā un tā koncentrāciju produktos. Palielinoties mitruma saturam koksnes granulās, samazinās CO₂ emisijas, bet palielinās CO emisiju daudzums. Propāna/butāna padeve degšanas kamerā intensificē koksnes granulū degšanas procesu, palielinot CO₂ koncentrāciju, bet samazinot CO koncentrāciju produktos (3.3. att.).



3.3. att. Propāna/butāna padeves ietekme uz relatīvajām CO_{2vid}/CO_{2max} un CO_{vid}/CO_{max} izmaiņām dažāda mitruma satura koksnes granulū degšanas procesā

Eksperimentālo pētījumu rezultāti apliecina, ka šīs korelācijas var aprakstīt, izmantojot empīriskos vienādojumus:

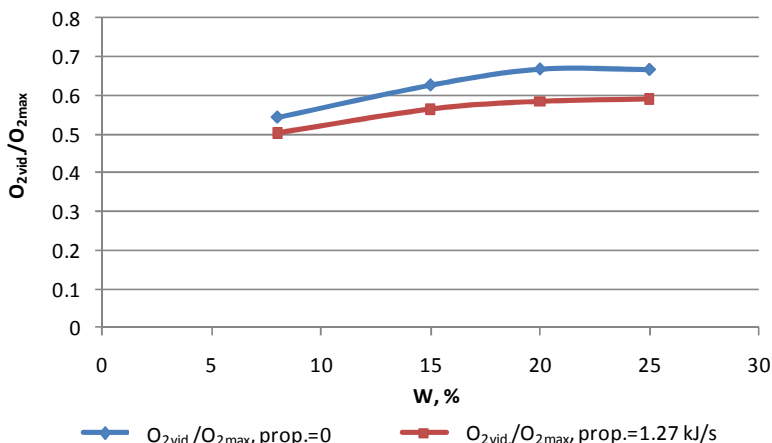
$$\frac{CO_{2vid.}}{CO_{2max}} = 0,49 - 0,01W + 0,03q \quad (3.3)$$

$$\frac{CO_{vid.}}{CO_{max}} = -0,001 + 0,006W + 0,039q \quad (3.4)$$

Empīriskajos vienādojumos (3.3) un (3.4) iegūto koeficientu statistiskais novērtējums ir parādīts 1. tabulā Pielikumos.

Pilnīgai koksnes granulū un gāzes maisījuma sadedzināšanai ir jānodrošina pietiekama gaisa padeves pārsvars ($\alpha \geq 1$). Palielinoties mitruma

saturam koksnes granulās, samazinās teorētiski nepieciešamais gaisa tilpums pilnīgai kurināmā sadegšanai, savukārt eksperimentos tika padots vienāds gaisa daudzums neatkarīgi no mitruma satura koksnes granulās. Šī iemesla dēļ gaisa patēriņa koeficients, palielinoties mitruma saturam koksnes granulās no 8 % līdz 25 %, palielinās no 2,5 līdz 3,07 un koksnes granulu degšanas process veidojas pie izteiktas gaisa padeves pārsvara iekārtā.



3.4. att. $O_{2vid.}/O_{2max}$ izmaiņas produktos atkarībā no koksnes granulu mitruma un propāna/butāna padeves degšanas zonā

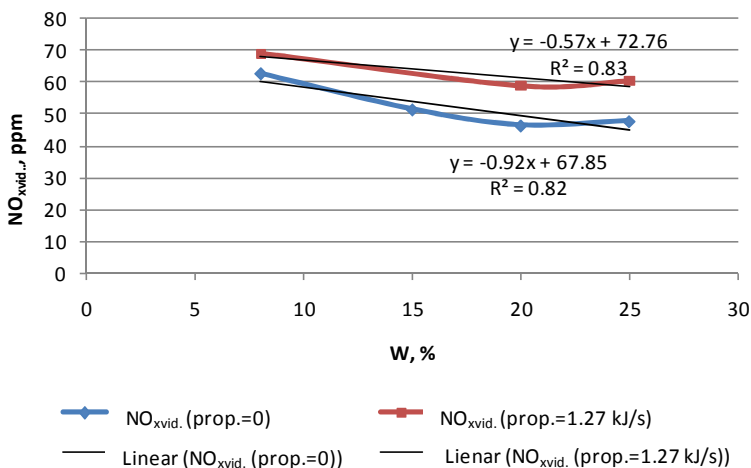
Palielinoties mitruma saturam koksnē, rādītājs $O_{2vid.}/O_{2max}$ ($O_{2max} = 21\%$) aug (3.4. att.) un palielinās vidējā O_2 koncentrācija produktos, kas apliecina, ka, palielinoties mitruma saturam biomasā, ir jāpadod mazāk gaisa pilnīgai kurināmā sadedzināšanai. Vienlaicīgi sadedzinot koksnes granulas ar propāna/butāna padevi iekārtā, relatīvais $O_{2vid.}/O_{2max}$ tilpuma koncentrācijas pieaugums produktos ir nedaudz mazāks, jo propāna/butāna padeve palielina degšanas zonas vidējo temperatūru, nodrošinot gaistošo savienojumu pilnīgāku sadedzināšanu (3.3. att.).

Eksperimentālo rezultātu analīze apliecina, ka koksnes granulu mitruma satura un propāna/butāna padeves ietekmi uz relatīvajām $O_{2vid.}/O_{2max}$ tilpuma koncentrācijas izmaiņām tuvināti var raksturot, izmantojot empīrisko vienādojumu (3.5):

$$\frac{O_{2vid.}}{O_{2max}} = 0,52 + 0,01W - 0,06q \quad (3.5)$$

Empīriskajā vienādojumā (3.5) iegūto koeficientu statistiskais novērtējums ir parādīts 1. tabulā Pielikumos.

NO_x emisijas degšanas procesā veidojas atbilstoši Zeldoviča mehānismam, kura veidošanos būtiski ietekmē degšanas zonas temperatūra, gaisa padeve iekārtā, kā arī slāpekļa saturs biomasā. Neliels (~ 20 %) NO_x koncentrācijas pieaugums produktos ir vērojams, izmantojot propāna/butāna padevi degšanas zonā (3.5. att.). Tomēr ir jāatzīmē, ka maksimālā NO_x koncentrācija produktos, līdzdedzinot koksnes granulas ar propānu/butānu, nepārsniedz 70 ppm, ko nosaka nelielā slāpekļa koncentrācija koksnes granulās (0,18 %), nodrošinot ekoloģiski tīru degšanas procesu.



3.5. att. Propāna/butāna un koksnes granulu mitruma satura ietekme uz NO_x emisiju koncentrāciju produktos

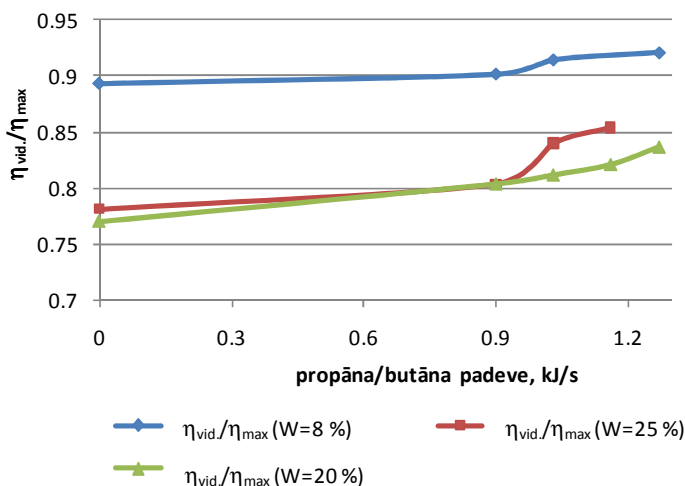
No eksperimentālo mērījumu rezultātiem izriet, ka koksnes granulu mitruma satura un propāna/butāna padeves ietekmi uz relatīvajām NO_xvid./NO_xmax izmaiņām ir iespējams aprakstīt, izmantojot vienādojumu (3.6). NO_xvid. ir vidējā vērtība eksperimenta laikā, bet NO_xmax – maksimālā vērtība eksperimenta laikā.

$$\frac{NO_{x\text{vid.}}}{NO_{x\text{max}}} = 0,65 - 0,01W + 0,12q \quad (3.6)$$

Empīriskajā vienādojumā (3.6) iegūto koeficientu statistiskais novērtējums ir parādīts 1. tabulā Pielikumos.

Sadedzinot biomasu, ir svarīgi organizēt degšanas procesu ne tikai ar ierobežotu kaitīgo emisiju izplūdi atmosfērā, bet jānodrošina arī pēc iespējas lielāka siltuma ražošanas un degšanas procesu efektivitāte. Apstrādājot eksperimentālos datus par degšanas efektivitāti, ir konstatēts, ka propāna/butāna padeve un mitruma satura izmaiņas koksnes granulās ietekmē degšanas procesa

efektivitāti (η), kas pieaug, palielinot propāna/butāna padevi degšanas zonā, bet samazinās, palielinot mitruma saturu koksnes granulās (3.6. att.).



3.6. att. $\eta_{vid.}/\eta_{max}$ pie dažādas propāna/butāna padeves un pie dažāda mitruma satura koksnes granulās

Koksnes granulu mitruma un propāna/butāna padeves ietekmi uz efektivitāti var aprakstīt, izmantojot lineāru vienādojumu:

$$\frac{\eta_{vid.}}{\eta_{max}} = 0,93 - 0,008W + 0,04q \quad (3.7)$$

Empīriskajā vienādojumā (3.7) iegūto koeficientu statistiskais novērtējums ir parādīts 1. tabulā Pielikumos.

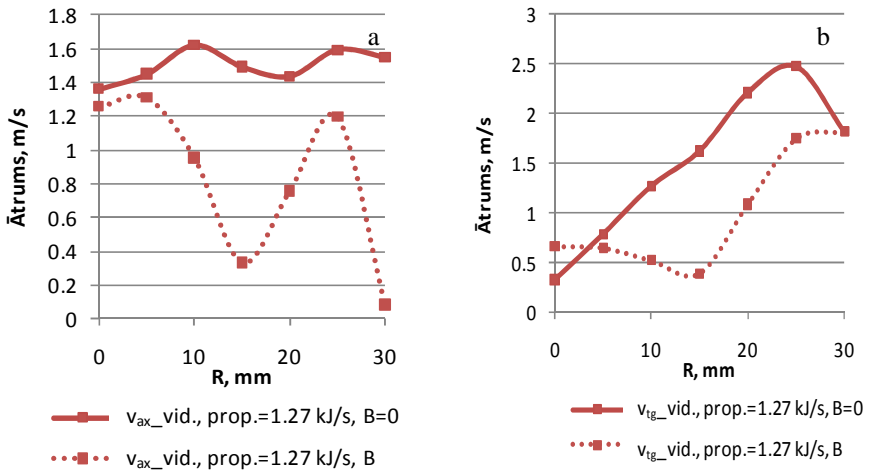
3.2. Magnētiskā lauka ietekmes uz degšanas procesu izpēte

Iepriekš veiktie pētījumi ir apliecinājuši, ka degšanas procesa papildu ietekmēšanai ir iespējams izmantot liesmas un nehomogēna magnētiskā lauka mijiedarbības efektu, kura pamatā ir magnētiskā lauka gradienta izraisīta paramagnētiskā skābekļa pārnese lauka gradienta virzienā, radot lokālas skābekļa koncentrācijas izmaiņas gaisa un gaistošo savienojumu maisījumā ar sekojošām gaistošo savienojumu degšanas procesa izmaiņām. Lai izvērtētu magnētiskā lauka ietekmi uz degšanas procesa veidošanos, degšanas zonas pamatne tika ievietota pastāvīgā magnēta laukā, nodrošinot magnētiskā lauka gradienta veidošanos degšanas zonas pamatnē, kurā notiek intensīva gaistošo savienojumu plūsmas sajaukšanās ar gaisa virpuļplūsmu.

Magnētiskā lauka gradienta (dB/dL) ietekmi uz plūsmas dinamiku galvenokārt nosaka magnētiskais spēks (F_{mag}), kas ir atkarīgs no skābekļa

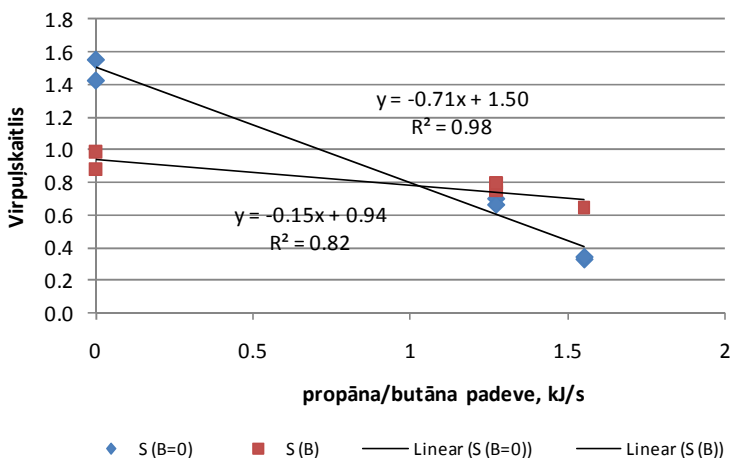
magnētiskās uzņēmības (χ_v) un magnētiskās caurlaidības (μ_0). Magnētiskā lauka gradienta izraisītais spēks nosaka virpuļplūsmas dinamikas izmaiņas ar tai sekojošām gaistošo savienojumu degšanas procesa izmaiņām.

Lai izvērtētu magnētiskā lauka ietekmi uz plūsmas dinamiku, tika veikti aksiālā un tangenciālā ātruma sadalījuma mērījumi degšanas zonas pamatnē, izvērtējot magnētiskā lauka ietekmi uz ātruma sadalījuma veidošanos. Magnētiskā lauka gradienta izraisītā spēka un liesmas mijiedarbības rezultātā ir vērojamas virpuļplūsmas dinamikas izmaiņas ar izteiktu liesmas aksiālā un tangenciālā ātruma samazināšanos (3.7. att.). Ņemot vērā, šo faktu, var prognozēt, kas magnētiskā lauka un liesmas mijiedarbības procesā palielinās gaistošo savienojumu uzturēšanās ilgums degšanas zonā, nodrošinot pilnīgāku gaistošo savienojumu sadedzināšanu.



3.7. att. Magnētiskā lauka ietekme uz liesmas aksiālā (a) un tangenciālā (b) ātruma sadalījumu veidošanos līdzdedzināšanas procesā ($L/D \sim 2,6$)

Propāna/butāna padeve degšanas zonā un magnētiskā lauka ietekme uz liesmas aksiālā un tangenciālā ātruma sadalījuma veidošanos ir saistīta ar liesmas virpuļskaitļa (S) izmaiņām, kas nosaka recirkulācijas zonas veidošanos un virpuļplūsmas intensitāti (3.8. att.).

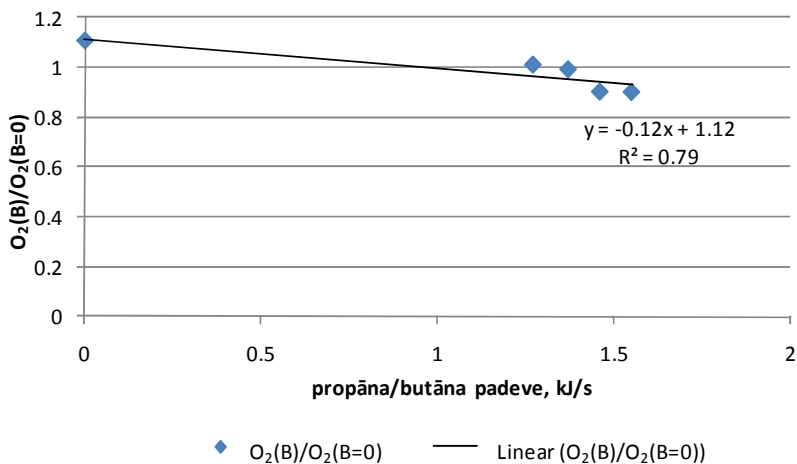


3.8. att. Magnētiskā lauka ietekme uz liesmas virpuļskaitļa izmaiņām pie dažādas propāna/butāna padeves

Kā izriet no eksperimentālo mērījumu rezultātiem, palielinot propāna/butāna padevi degšanas kamerā, liesmas virpuļskaitlis pakāpeniski samazinās. Respektīvi, propāna/butāna padeves izraisītais aksiālā ātruma pieaugums ierobežo recirkulācijas plūsmas veidošanos.

Magnētiskā lauka ietekme uz degšanas procesa emisijām, temperatūru un saražoto siltumenerģiju tika pētīta un izvērtēta arī koksnes granulu degšanas procesā ar propāna/butāna padevi degšanas zonas pamatnē, mainot siltuma padeves ātrumu no 1,27 kJ/s līdz 1,55 kJ/s. Šie eksperimentālie dati tika salīdzināti ar koksnes granulu un gāzes maisījuma līdzdedzināšanas procesu, kad magnētiskais lauks netika pielietots ($B = 0$). Datu analīzei tika aprēķinātas visu parametru vidējās vērtības. Šīs vidējās vērtības no eksperimentiem ar magnētisko lauku (B) tika izdalītas ar vidējām vērtībām no eksperimentiem bez magnētiskā lauka ($B = 0$).

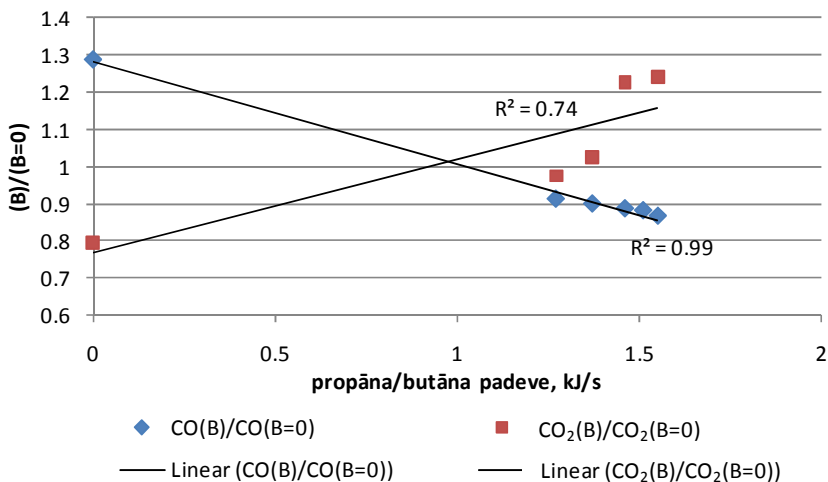
3.9. attēlā ir parādīts, kā mainās $O_2(B)/O_2(B = 0)$ attiecība atkarībā no propāna/butāna padeves eksperimentu laikā.



3.9. att. Propāna/butāna padeves ietekme uz O₂(B)/O₂(B=0)

Sadedzinot koksnes granulas bez p propāna/butāna padeves degšanas zonas pamatnē, O₂(B)/O₂(B=0) attiecība ir lielāka par 1. Tas nozīmē, ka vidējais skābekļa daudzums degšanas zonas pamatnē palielinās, ja tiek intensificēta paramagnētiskā skābekļa pārnese lauka virzienā. Savukārt, ja koksnes granulas tiek dedzinātas ar propāna/butāna padevi degšanas zonas pamatnē, O₂(B)/O₂(B=0) attiecība samazinās, kas liecina par vidējā skābekļa daudzuma samazināšanos. Pamatā to var izskaidrot ar faktu, ka gadījumā, kad koksnes granulas tika dedzinātas ar propāna/butāna padevi, tika nodrošināta paramagnētiskā skābekļa papildus uzsildīšana, nodrošinot karstākas siltuma plūsmas pārnesi uz granulu virsmu, tā uzlabojot koksnes biomasas gazifikāciju un nodrošinot intensīvāku gaistošo savienojumu veidošanos.

Pretēji skābekļa koncentrācijas izmaiņām, lielāka CO₂(B)/CO₂(B=0) attiecība koksnes granulu degšanas procesam ir novērota, palielinot propāna/butāna padevi degšanas zonas pamatnē (3.10. att.). Bez propāna/butāna padeves degšanas zonas pamatnē intensīvāks degšanas process ar CO₂ emisiju pieaugumu veidojās, ja netika intensificēta paramagnētiskā skābekļa pārnese virzienā uz degšanas zonas pamatni. Kombinējot propāna/butāna padevi degšanas zonas pamatnē ar magnētiskā spēka izraisītu paramagnētiskā skābekļa pārnesi, var nodrošināt pilnīgāku gaistošo savienojumu sadedzināšanu.



3.10. att. Propāna/butāna padeves ietekme uz $CO_2(B)/CO_2(B=0)$ un $CO(B)/CO(B=0)$

Propāna/butāna padeves ietekme uz $CO_2(B)/CO_2(B=0)$ ir aprakstāma ar lineāro vienādojumu:

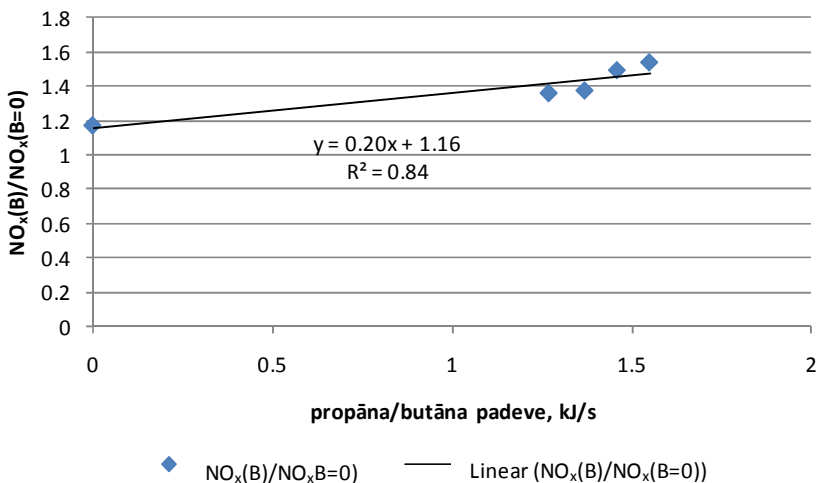
$$\frac{CO_2(B)}{CO_2(B=0)} = 0,25q + 0,77 \quad (3.8)$$

Izvērtējot magnētiskā lauka un propāna/butāna padeves ietekmi uz CO emisiju koncentrāciju, ir konstatēts, ka propāna/butāna padeve nodrošina attiecības $CO(B)/CO(B=0)$ samazināšanos (3.10. att.).

Vislielākā $CO(B)/CO(B=0)$ attiecība ir novērota, ja koksnes granulas tiek dedzinātas bez propāna/butāna padeves degšanas zonas pamatnē, kad paramagnētiskā skābekļa pārnese veicina gaisa padeves pārsvara veidošanos un temperatūras samazināšanos. Padodot propānu/butānu degšanas zonas pamatnē, šī attiecība samazinās, nodrošinot pilnīgāku degšanas procesu un samazinot kaitīgo CO emisiju izplūdi apkārtējā vidē. Propāna/butāna padeves ietekme uz $CO(B)/CO(B=0)$ ir aprakstāma ar lineāro vienādojumu:

$$\frac{CO(B)}{CO(B=0)} = -0,28q + 1,28 \quad (3.9)$$

Magnētiskā lauka izraisītā paramagnētiskā skābekļa pārnese un propāna/butāna padeve degšanas zonas pamatnē ietekmē arī NO_x veidošanos. Eksperimentālo pētījumu rezultāti par šo faktoru ietekmi uz $NO_x(B)/NO_x(B=0)$ izmaiņām ir apkopoti 3.11. attēlā.



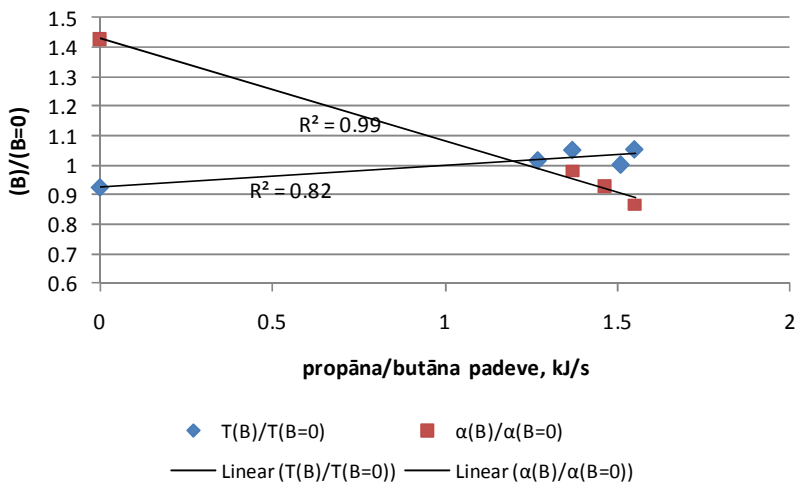
3.11. att. Propāna/butāna padeves ietekme uz $\text{NO}_x(\text{B})/\text{NO}_x(\text{B}=0)$

Kā redzams 3.11. attēlā, koksnes granulu degšanas procesā $\text{NO}_x(\text{B})/\text{NO}_x(\text{B}=0)$ attiecības pieaugums vērojams, palielinot propāna/butāna padevi degšanas zonas pamatnē. Attēlā arī parādīts, ka visos gadījumos $\text{NO}_x(\text{B})/\text{NO}_x(\text{B}=0)$ attiecība ir lielāka par 1, kas nozīmē, ka magnētiskā lauka izmantošana intensificē NO_x veidošanos ar lielāku NO_x emisiju izplūdi atmosfērā. Tas ir jāvērtē kā negatīvs lauka un liesmas mijiedarbības rezultāts.

Viens no būtiskiem faktoriem, kas ietekmē NO_x emisiju veidošanās, ir propāna/butāna padeves un magnētiskā lauka izraisītās degšanas zonas temperatūras un gaisa patēriņa koeficienta (α) izmaiņas, kas redzamas 3.12. attēlā.

$\alpha(\text{B})/\alpha(\text{B}=0)$ attiecība samazinās, palielinot propāna/butāna padevi degšanas zonas pamatnē (līdzīgi $\text{O}_2(\text{B})/\text{O}_2(\text{B}=0)$ attiecībai). Šī attiecība ir redzama 3.12. attēlā un aprakstāma ar lineāro vienādojumu:

$$\frac{\alpha(\text{B})}{\alpha(\text{B} = 0)} = 0,35q + 1,43 \quad (3.10)$$

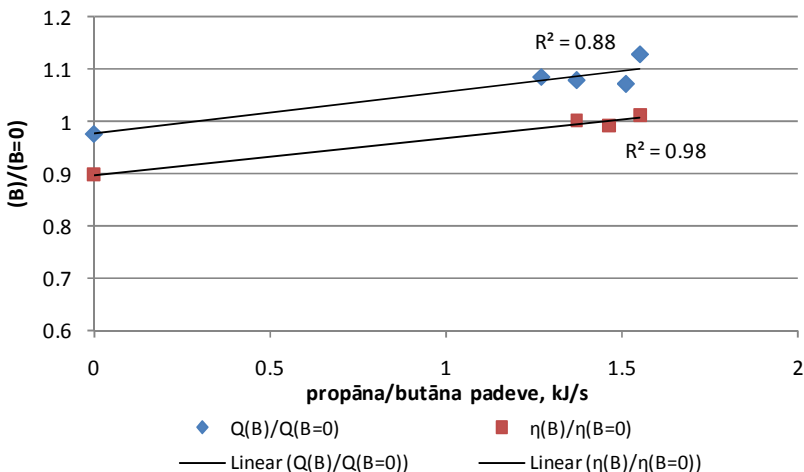


3.12. att. Propāna/butāna padeves ietekme uz $\alpha(B)/\alpha(B=0)$ un $T(B)/T(B=0)$

3.12. attēlā ir redzams, ka $T(B)/T(B=0)$ attiecības izmaiņas ir atkarīgas no propāna/butāna padeves degšanas zonas pamatnē. Padodot propānu/butānu degšanas zonas pamatnē, temperatūra palielinās. Tā kā magnētiskā lauka izraisītā skābekļa pārnese vienlaicīgi palielina skābekļa koncentrāciju, tiek intensificēta gaistošo savienojumu sadedzināšana. Ar lineārā vienādojumu palīdzību ir aprakstāma propāna/butāna padeves ietekme uz temperatūru:

$$\frac{T(B)}{T(B=0)} = 0,07q + 0,93 \quad (3.11)$$

Izvērtējot magnētiskā lauka un propāna/butāna padeves ietekmi uz degšanas procesa veidošanos, ir izvērtēta arī šo faktoru ietekme uz degšanas procesa efektivitāti un saražoto siltumenerģiju. Rezultāti ir apkopoti 3.13. attēlā.



3.13. att. Propāna/butāna padeves ietekme uz $\eta(B)/\eta(B=0)$ un $Q(B)/Q(B=0)$

Kā izriet no 3.13. attēla, propāna/butāna padeves ietekme uz liesmas un magnētiskā lauka mijiedarbības procesu $\eta(B)/\eta(B=0)$ ir aprakstāma ar lineāro vienādojumu:

$$\frac{\eta(B)}{\eta(B=0)} = 0,07q + 0,90 \quad (3.12)$$

Ja koksnes granulas tiek sadedzinātas, palielinot propāna/butāna padevi degšanas zonas pamatnē, degšanas procesa efektivitāte palielinās. Magnētiskā lauka un liesmas mijiedarbības rezultātā vidēja degšanas procesa efektivitāte ir lielāka, salīdzinot to ar efektivitāti, ja magnētiskais lauks netika izmantots un netika intensificēta paramagnētiskā skābekļa pārnese lauka gradienta virzienā.

3.13. attēlā ir parādīta propāna/butāna padeves ietekme uz attiecību $Q(B)/Q(B=0)$, salīdzinot saražoto siltumenerģiju (kWh) eksperimentos ar magnētiskā lauka izmantošanu un bez tās. Propāna/butāna ietekme uz attiecību $Q(B)/Q(B=0)$ ir aprakstāma ar lineāro vienādojumu:

$$\frac{Q(B)}{Q(B=0)} = 0,08q + 0,98 \quad (3.13)$$

Magnētiskā lauka un liesmas mijiedarbības rezultātā vērojams saražotā siltuma daudzuma pieaugums, kas palielinās, palielinot propāna/butāna padevi iekārtā.

SECINĀJUMI

1. Promocijas darba ietvaros eksperimentāli tika izpētīts, kā propāna/butāna līdzdedzināšana ietekmē koksnes granulu degšanas procesu – emisiju veidošanos, temperatūru, efektivitāti un saražoto siltumenerģijas daudzumu. Lai nodrošināto eksperimentālo izpēti, speciāli tika konstruēta eksperimentālā iekārta, kas paredzēta koksnes biomasas un gāzveida kurināmā līdzdedzināšanai.
2. Līdzdedzinot dažāda mitruma satūra koksnes granulas ar propānu/butānu, tika izdarīti vairāki secinājumi:
 - 2.1. koksnes granulu termiskās sadalīšanās procesa sākuma stadijas ilgums ir būtiski atkarīgs no mitruma satūra un propāna/butāna padeves koksnes granulu slānī. Mitrums koksnes granulās aizkavē gaistošo savienojumu veidošanos, to uzliesmošanu un degšanu, kuras laikā tiek sasniegta maksimālā degšanas zonas temperatūra. Dedzinot koksnes granulas ar mitrumu 8 %, degšanas zonas maksimālā temperatūra tika sasniegta jau 445. sekundē pēc koksnes granulu gazifikācijas procesa ierosināšanas, bet, dedzinot koksnes granulas ar mitrumu 25 %, gaistošo savienojumu veidošanās un to uzliesmošana būtiski aizkavējās un degšanas zonas maksimālā temperatūra tika sasniegta tikai 875. sekundē. Darbā veiktie eksperimentālie pētījumi apliecina, ka endotermiskos procesus, kas saistīti ar mitrās koksnes silšanu, žāvēšanu var kompensēt, līdzdedzinot koksnes granulas ar propānu/butānu 1,27 kJ/s), līdz ar to intensificējot gaistošo savienojumu veidošanos un uzliesmošanu degšanas zonas maksimālā temperatūra tika sasniegta ievērojami ātrāk – jau 479. sekundē;
 - 2.2. eksperimentālo pētījumu rezultātā ir konstatēts, ka propāna/butāna padeve koksnes granulu slānī nodrošina saražotās siltumenerģijas pieaugumu. Dedzinot koksnes granulas ar mitruma saturu 25 % bez propāna/butāna padeves, saražotais siltumenerģijas daudzums eksperimenta laikā bija 0,87 kWh. Līdzdedzinot šo koksni ar gāzes kurināmo, kura padeve bija 1,27 kJ/s, saražotais siltumenerģijas daudzums palielinājās par 36 %;
 - 2.3. lai izvērtētu līdzdedzināšanas ietekmi uz degšanas produktu sastāvu, tika veikta degšanas produktu sastāva izmaiņu analīze, izvērtējot degšanas produktu sastāva relatīvās izmaiņas līdzdedzināšanas procesā. Šo izmaiņu analīze apliecina, ka CO₂ emisiju veidošanos koksnes granulu degšanas procesā būtiski ietekmē koksnes granulu mitruma saturs – palielinoties mitrumam koksnē, tiek ierobežota CO₂ emisiju veidošanās, bet palielinās CO emisijas. Piemēram, dedzinot koksnes granulas ar mitruma saturu 8 %, CO₂vid./CO₂max bija 0,47, bet

$CO_{vid.}/CO_{max} = 0,04$, savukārt dedzinot koksnes granulas ar mitruma saturu 25 %, CO_2 relatīvais lielums samazinājās par 23 %, bet CO relatīvais lielums palielinājās par 70 %. Dedzinot koksnes granulas ar mitruma saturu 25 % ar propāna/butāna padevi CO_2 relatīvais lielums palielinājās par 8 %, bet CO relatīvais lielums samazinājās par 31 %, salīdzinot ar koksnes granulu dedzināšanu bez propāna/butāna padeves. Tas apliecina, ka izmantojot propāna/butāna padevi koksnes granulu slānī, tiek intensificēta gaistošo savienojumu veidošanās, to uzliesmošana un degšana, intensificējot CO_2 veidošanos, bet samazinot CO koncentrāciju produktos;

2.4. palielinoties koksnes granulu mitruma saturam no 8 % līdz 25 %, palielinās vidējā O_2 tilpuma koncentrācija produktos no 11,41 % līdz 13,97 %, kas apliecina, ka, palielinoties mitruma saturam koksnē, tiek ierobežota gaistošo savienojumu sadedzināšana un ir jāsamazina gaisa padeve, lai nodrošinātu pilnīgu kurināmā sadedzināšanu. Vienlaicīgi sadedzinot koksnes granulas ar propāna/butāna padevi iekārtā, relatīvais $O_{2vid.}/O_{2max}$ lielums ir mazāks par 11 %, salīdzinot ar koksnes granulu sadedzināšanu bez propāna/butāna padeves, jo gāzes kurināmā padeve palielina degšanas zonas vidējo temperatūru, nodrošinot gaistošo savienojumu pilnīgāku sadedzināšanu;

2.5. palielinot koksnes granulu mitruma saturu, tika ierobežota NO_x emisiju veidošanās, kas ir saistīta ar skābekļa koncentrācijas pieaugumu, savukārt, līdzdedzinot koksnes biomasu ar propāna/butāna padevi, tika novērots NO_x emisiju pieaugums vidēji par 21 %, kas ir saistīts ar vidējās temperatūras pieaugumu;

2.6. apstrādājot eksperimentālos datus par degšanas efektivitāti, ir konstatēts, ka propāna/butāna padeve un koksnes granulu mitruma satura izmaiņas ietekmē degšanas procesa efektivitāti, kas palielinās, palielinot propāna/butāna padevi degšanas zonā, bet samazinās, palielinot koksnes granulu mitruma saturu;

2.7. izvērtējot koksnes granulu mitruma satura un propāna/butāna padeves

ietekmi uz $T_{vid.}$, Q , $\frac{CO_{2vid.}}{CO_{2max}}$, $\frac{CO_{vid.}}{CO_{max}}$, $\frac{O_{2vid.}}{O_{2max}}$, $\frac{NO_{xvid.}}{NO_{xmax}}$, $\frac{\eta_{vid.}}{\eta_{max}}$, ar

regresijas analīzes palīdzību tika iegūti empīriskie vienādojumi. Veicot vienādojumu koeficientu statistisko novērtējumu, kā arī pārbaudot vienādojumu adekvātumu, tika secināts, ka izmantotie parametri – mitruma saturs koksnē un propāna/butāna padeve – ir būtiski un vienādojumu lietojums ir korekts.

3. Eksperimentālo pētījumu rezultātā ir konstatēts arī, ka papildus degšanas procesu ietekmēšanai ir iespējams izmantot arī liesmas un nehomogēna

magnētiskā lauka mijiedarbības efektu. Šis efekts balstās uz magnētiskā lauka gradienta izraisīto paramagnētiskā skābekļa pārnese lauka gradienta virzienā, izraisot lokālas skābekļa koncentrācijas izmaiņas gaisa un gaistošo savienojumu maisījumā ar sekojošām gaistošo savienojumu degšanas procesa izmaiņām. Ievietojot eksperimentālo iekārtu pastāvīgajā magnētiskajā laukā un dedzinot koksnes granulas ar propāna/butāna padevi un bez tās, tika izdarīti šādi secinājumi:

- 3.1. magnētiskā lauka gradienta izraisītā spēka un liesmas mijiedarbības rezultātā ir vērojamas virpuļplūsmas dinamikas izmaiņas ar izteiktu liesmas aksiālā un tangenciālā ātruma samazināšanos par 31 % degšanas zonas pamatnē. Ņemot vērā ātrumu samazināšanos, var prognozēt, ka magnētiskā lauka un liesmas mijiedarbības procesā palielinās gaistošo savienojumu uzturēšanās ilgums degšanas zonā, nodrošinot pilnīgāku gaistošo savienojumu sadedzināšanu;
- 3.2. dedzinot koksnes granulas bez propāna/butāna padeves, tika konstatēts, ka magnētiskais lauks izraisa paramagnētiskā skābekļa pārnese virzienā uz liesmas ārējo daļu, ierobežojot CO₂ veidošanos, samazinot degšanas zonas temperatūru un degšanas procesa efektivitāti;
- 3.3. attiecība O₂(B)/O₂(B=0) samazinājās par 19 % bet T(B)/T(B=0) palielinājās par 16 %, palielinot propāna/butāna padevi koksnes granulu slānī no 0 kJ/s līdz 1,55 kJ/s, nodrošinot CO₂(B)/CO₂(B=0) pieaugumu par 56 %, bet CO(B)/CO(B=0) samazinājumu par 33 %. Tas nozīmē, ka kombinējot propāna/butāna padevi degšanas zonas pamatnē ar magnētiskā spēka izraisīto paramagnētiskā skābekļa pārnese, var nodrošināt pilnīgāku gaistošo savienojumu sadedzināšanu. Propāna/butāna padeve un magnētiskā lauka izmantošana, izraisot temperatūras pieaugumu, palielināja NO_x emisiju veidošanos par 30 %;
- 3.4. magnētiskā lauka izmantošana un koksnes granulu līdzdedzināšana ar propānu/butānu, nodrošināja efektivitātes pieaugumu vidēji par 8 % un saražotās siltumenerģijas daudzuma pieaugumu par 6 %.

Pielikumi

1. Pielikums

Empīrisko vienādojumu koeficientu statistiskais novērtējums

	Neatkarīgie mainīgie	Koeficienti	t statistika	P vērtība	R
$T_{vid.}$	b_0	1715,23	25,1	0,000	0,94
	b_1	-27,15	-8,42	0,000	
	b_2	117,83	2,42	0,036	
$Q_{vid.}$	b_0	2,42	10,38	0,000	0,88
	b_1	-0,08	-6,81	0,000	
	b_2	0,35	2,31	0,035	
$\frac{CO_{2vid.}}{CO_{2max}}$	b_0	0,49	26,43	0,000	0,85
	b_1	-0,01	-5,74	0,000	
	b_2	0,03	2,5	0,026	
$\frac{CO_{vid.}}{CO_{max}}$	b_0	-0,001	10,38	0,004	0,86
	b_1	0,006	-6,81	0,008	
	b_2	0,039	2,31	0,019	
$\frac{O_{2vid.}}{O_{2max}}$	b_0	0,52	20,97	0,000	0,84
	b_1	0,01	5,22	0,000	
	b_2	-0,06	-3,53	0,003	
$\frac{NO_{xvid.}}{NO_{xmax}}$	b_0	0,65	16,11	0,000	0,87
	b_1	-0,01	2,32	0,036	
	b_2	0,12	-6,39	0,000	
$\frac{\eta_{vid.}}{\eta_{max}}$	b_0	0,93	44,77	0,000	0,92
	b_1	-0,008	-6,99	0,000	
	b_2	0,04	3,34	0,007	