

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 darbs

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

Konsultante
Dr.phys., pētniece
M.ZAĶE

Rīga 2013

UDK 662.6(043)
Su 980 k

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

Promocijas darbs. – Rīga: RTU, 2013. – 94. lpp.

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

ISBN 978-9934-10-450-3

ANOTĀCIJA

Atbilstoši Eiropas Komisijas un Padomes Direktīvai 2009/28/EK par atjaunojamo energoresursu (AER) izmantošanas veicināšanu Latvija apņēma līdz 2020. gadam panākt 40 % īpatsvaru kopējā energopatēriņā. Neskatoties uz to, ka Latvija ir pieskaitāma pie mežiem bagātām valstīm un koksne ir visizplatītākais atjaunīgais energoresurss Latvijā, 2011. gadā AER īpatsvars kopējā energopatēriņā bija 33,1 %. Pārveidošanas sektorā tās īpatsvars ir tikai 15 %. Siltumenerģijas un elektroenerģijas ražotāji priekšroku dod fosilajam kurināmajam – dabasgāzei, kuras īpatsvars ir ap 80 %. bet tās arvien pieaugošā cena, rada nosacījumus daļējai dabasgāzes aizstāšanai ar kurināmo koksnī, vienlaikus nodrošinot efektīvākus koksnes sadedzināšanas apstākļus.

Promocijas darba mērķis ir izpētīt koksnes granulu un gāzveida fosilā kurināmā līdzdedzināšanas ietekmi uz emisiju veidošanos, efektivitāti un saražoto siltumenerģijas daudzumu. Mērķa un izvirzīto uzdevumu sasniegšanai Fizikas institūta Siltuma un masas pārnesei akreditētājā laboratorijā speciāli tika izveidota eksperimentālā iekārta, kas paredzēta koksnes granulu un propāna/butāna līdzdedzināšanai. Papildus tika veikti eksperimentālie pētījumi par pastāvīgā magnēta ietekmi uz virpuļplūsmas veidošanos, emisiju veidošanos un efektivitāti, dedzinot koksnes granulas ar propāna/butāna padevi un bez tās. Magnētiskā lauka un liesmas mijiedarbības procesus var izmantot, lai ietekmētu plūsmas dinamiku, liesmas temperatūru un degšanas produktu sastāvu.

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

Promocijas darbam ir liela praktiskā nozīme, kuras mērķis ir palielināt koksnes biomasas izmantošanu enerģijas ražošanā, nodrošinot efektīvāko tās izmantošanu. Šim pētījumam ir vairākas mērķa grupas – siltumenerģijas ražotāji, biomasas sadedzināšanas iekārtu ražotāji, pašvaldības un iedzīvotāji.

ANNOTATION

In accordance with European Commission and Council Directive 2009/28/EC on renewable energy sources (RES) promotion, Latvia undertakes an obligation to reach 40 % of state energy consumption to be produced from the renewable energy sources by 2020. Despite the fact that Latvia is a rich in forests country, where wood is the most common renewable energy source, in year 2011 the amount of RES in total energy consumption was 33,1 %.

In the transformation sector its use comprises 15 % only. Use of fossil fuel – natural gas remains a preference for both heat and electrical power producers, and it makes about 80% of total energy consumption. Nonetheless, an ongoing natural gas price growth stimulates its partial replacement with wood fuel, simultaneously ensuring conditions for effective wood fuel combustion.

The goal of the research described in the dissertation is to make a research on co-firing of wood pellets and gaseous fossil fuel, evaluating influence of co-firing on emission production, efficiency, and produced energy volumes. In order to achieve the set aim and objectives a special pilot device for wood pellets and propane/butane co-firing was constructed at an accredited laboratory of Heat and Mass Transfer of the Institute of Physics. In addition an experimental research were held on the influence of permanent magnet on formation of swirling flow, formation of emissions, and efficiency, combusting wood pellets with and without propane/butane supply. Interaction processes of magnetic field and flame can be used to impact flow dynamics, flame temperature, and composition of combustion products.

The results of the experimental research, as well as empirical data allow to run a complete analysis of co-firing and evaluating influence of magnetic field on emission production, efficiency, and produced heat energy volumes.

The thesis has a high practical significance, aimed to increase the level of wood biomass use for energy production, as well as to assure its effective application. The research has multiple target groups, including heat energy producers, biomass combustion equipment manufacturers, governmental bodies and citizens.

PATEICĪBAS

Šis promocijas darbs nebūtu tapis bez vairāku cilvēku palīdzības, kuri dalījās ar savām profesionālajām zināšanām, idejām un atbalstīja mani visus šos gadus.

Visdziļāko pateicību gribu izteikt savam darba vadītājam profesoram Mārtiņam Gedrovičam par idejām, par padomiem, līdzdalību un atbalstu grūtajos brīžos.

Milzīgs paldies promocijas darba konsultantei LU Fizikas institūta pētniecei Maijai Zaķei par iespēju veikt eksperimentālos pētījumus Siltuma un masas pārnese laboratorijā, par viņas dziļajām teorētiskajām zināšanām un padomiem no bagātās praktiskās pieredzes, ar kurām viņa nesavtīgi dalījās, par viņas uzticēšanos un sapratni. Liels paldies LU Fizikas institūta pētniecei Inesai Barminai par palīdzību eksperimentu veikšanā.

Patiesu pateicību vēlos izteikt arī RTU Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūta direktorei, profesorei Dagnijai Blumbergai par profesionāliem ieteikumiem un konstruktīvo kritiku.

Esmu pateicīga visiem RTU Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūta pasniedzējiem, kas deviņu gadu laikā izglītoja mūs, pasniedzot ne tikai teorētiskās zināšanas, bet arī daloties ar personīgo praktisko pieredzi. Paldies Jūlijai Guščai un Dacei Eihvaldei par palīdzību oficiālo jautājumu kārtošanā.

Sirsnīgi pateicos maniem vecākiem par ticību maniem spēkiem, par atbalstu, ko viņi sniedza man katru dienu.

Visbeidzot, gribu pateikt paldies manam vīram Aleksandram un meitai Vasiļisai par viņu mīlestību, enerģiju un uzmundrinājumu, kas neļāva nolaist rokas visgrūtākajos brīžos un iedvesmoja strādāt ar vēl lielāku gribasspēku.

SATURS

Anotācija	3
Annotation	4
Pateicības	5
Saturs	6
Nomentklatūra	8
IEVADS	10
Darba aktualitāte	10
Darba mērķis un uzdevumi	11
Pētījumu metodika	11
Darba zinātniskā novitāte	11
Darba praktiskā nozīme	12
Darba aprobācija	12
Autora publikācijas	12
1. LITERATŪRAS APSKATS	14
1.1. Biomasas izmantošanas novērtējums	14
1.2. Biomasas sastāvs	16
1.3. Biomasas degšana	18
1.4. Degšanas procesa dinamika	21
1.5. Biomasas degšanas ietekme uz apkārtējo vidi	22
1.5.1. Biomasas pilnīgas sadegšanas produkti	22
1.5.2. Nepilnīgas sadegšanas produkti	25
1.6. Biomasas sadedzināšanas veidi efektīvākai enerģijas ražošanai	26
1.6.1. Biomasas līdzdedzināšana ar fosilajiem kurināmajiem	27
1.6.1.1. Līdzdedzināšanas tehnoloģiju veidi	28
1.6.1.2. Līdzdedzināšanas priekšrocības un trūkumi	29
1.6.2. Magnētiskā lauka izmantošana biomasas degšanas laikā	31
1.7. Literatūras apskata kopsavilkums	33
2. EKSPERIMENTĀLĀ IEKĀRTA UN MĒRĪŠANAS METODIKA	35
2.1. Eksperimentālas iekārtas apraksts	35
2.1.1. Eksperimentālā iekārta koksnes granulu un propāna/butāna līdzdedzināšanai	35
2.1.2. Eksperimentālā iekārta ar pastāvīgo magnētu	37
2.2. Izejvielu raksturojošie parametri	39
2.2.1. Koksnes granulas	39
2.2.2. Propāna/butāna maisījums	39
2.2.3. Gaisa padeve	40
2.3. Mērījumu instrumenti	43
2.4. Mērīšanas metodika	43
2.5. Eksperimentālo pētījumu apraksts	44
3. DATU APSTRĀDES UN APRĒĶINU METODIKA	46
3.1. Datorprogrammas PC-20 datu apstrāde	46

3.2. Gāzes analizatora datu apstrāde	46
3.3. Maksimālo CO ₂ emisiju aprēķins	47
3.4. Degšanas kontroles diagrammas izmantošana.....	50
3.5. Rupju kļūdu noteikšana un izņemšana.....	53
3.6. Datu statistiskās apstrādes metodes	55
4. EKSPERIMENTĀLO PETĪJUMU REZULTĀTU ANALĪZE.....	57
4.1. Koksnes granulu un gāzes līdzdedzināšanas izpētes rezultāti un to analīze	57
4.1.1. Ātrumu sadalījums biomasas un gāzes līdzdedzināšanā.....	57
4.1.2. Temperatūras un siltuma plūsmas izmaiņu analīze.....	59
4.1.3. Degšanas produktu sastāva un efektivitātes analīze	64
4.2. Magnētiskā lauka ietekmes uz degšanas procesu izpēte.....	74
4.2.1. Magnētiskā lauka ietekme uz degšanas procesa ātruma profiliem .	74
4.2.2. Magnētiskā lauka ietekme uz degšanas zonas veidošanos un degšanas produktu sastāvu	77
SECINĀJUMI.....	84
IZMANTOTĀ LITERATŪRA.....	87

NOMENTKLATŪRA

Saisinājumi

AER	atjaunīgie energoresursi
ES	Eiropas Savienība
PAO	policikliskie aromātiskie ogleņdeņraži
prop.	propāns
SEG	siltumnīcefekta gāzes

Apzīmējumi

A	pelni
Ag	sudrabs
Al	alumīnijs
Au	zelts
B	magnētiskā lauka indukcija (T)
Ba	bārijs
C	Kirī konstante
Ca	kalcijs
Cd	kadmijijs
CH ₄	metāns
Cl	hlors
CO	oglekļa monoksīds
CO ₂	oglekļa dioksīds
Cu	varš
C ₃ H ₈	propāns
C ₄ H ₁₀	butāns
C ₆ H ₁₀ O ₅	biomasa
dB/dL	magnētiskā lauka gradients (T/m)
F	Fišera kritērijs
F _{mag}	magnētiskais spēks (T)
f	brīvības pakāpes
H ₂	ūdeņradis
HCl	hlorūdeņradis
H ₂ S	sērūdeņradis
K	kālijs
KCl	kālija hlorīds
K ₂ SO ₄	kālija sulfāts
Li	litijijs
M	magnētiskais moments
Mg	magnijijs
N	slāpeklijs
Na	nātrijs
NO _x	slāpekļa dioksīds
O ₂	skābeklijs
P	nozīmības līmenis
Pb	svins
Pt	platīns

Pu	plutonijs
R	korelācijas koeficients
R _i	relatīvā novirze
S	sērs
S	virpuļskaitlis
SO _x	sēra dioksīds
T	temperatūra (K)
t	Stjūdentā kritērijs
v	ātrums (m/s)
Zn	cinks
Q	saražotais siltumenerģijas daudzums (kWh)
W	mitruma daudzums (%)
α	gaisa patēriņa koeficients
η	efektivitāte (%)
μ ₀	magnētiskā caurlaidība (N/m)
ρ	blīvums (kg/m ³)
χ _v	magnētiskā uzņēmība (m ³ /kg)

Indeksi

ax	aksiālais
d	darba masa
el	elektriskais
mag	magnētiskais
max	maksimālais
mer.	mērītais
rad	radiālais
ref.	atsauces
tab	tabulas vērtība (Stjūdentā un Fišera kritērijiem)
tg	tangenciālais
vid.	vidējais

IEVADS

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 (CO_2 , CH_4 , 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 mājas 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 kritērijus pie noteiktā nozīmības līmeņa P un brīvības pakāpēm f , tika pārbaudīts, vai visi vienādojuma parametri (mitruma saturs koksne 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, kuras mērķis ir palielināt koksnes biomasas izmantošanu enerģijas ražošanā, nodrošinot efektīvāko tās izmantošanu. Darba rezultātiem ir dažādas mērķa grupas:

- siltumenerģijas ražotāji – dedzinot slapjo koksni vienlaicīgi 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 „Biomassas 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., Buceniķs 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., Buceniķs 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.

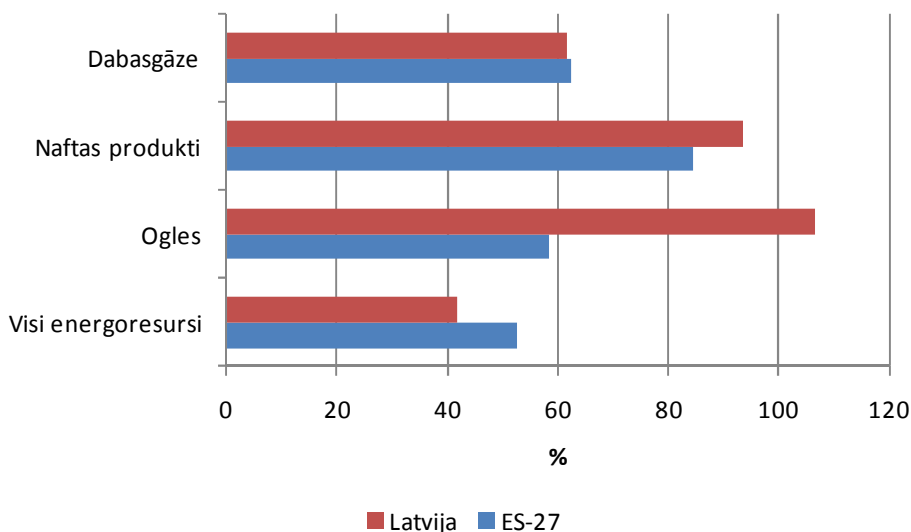
1. LITERATŪRAS APSKATS

Eiropas Komisijas un Padomes Direktīva 2009/28/EK par atjaunojamo energoresursu izmantošanas veicināšanu paredz līdz 2020. gadam panākt 20 % atjaunīgo energoresursu (AER) īpatsvaru kopējā Eiropas Savienības dalībvalstu energopatēriņā [1]. 2010. gadā šis rādītājs bija 10 % [2]. Salīdzinot šo rādītāju ar 1990. gada datiem, var secināt, ka AER īpatsvars kopējā energoresursu patēriņā ir palielinājies par 143,4 % jeb vidēji par 4,5 % gadā [3]. Neskatoties uz tik strauju pieaugumu, lai nodrošinātu Direktīvas izpildi, ir jāveic papildu pasākumi. Biomasas izmantošanas palielināšana var nodrošināt AER īpatsvara pieaugumu, jo tas ir lēts un viegli pieejams kurināmais, biomasai ir nepieciešama minimāla apstrāde, kā arī sadedzināšanas tehnoloģijas ir relatīvi vienkāršas [4].

1.1. Biomasas izmantošanas novērtējums

Biomas ir galvenais atjaunīgais energoresurss Eiropas Savienībā. Tās īpatsvars AER patēriņā 2000. gadā veidoja 60,6 %, 2005. gadā – 64,1 %, bet 2009. gadā – 68,6 % [5]. Biomasai salīdzinājumā ar fosilajiem kurināmajiem ir vairākas priekšrocības, kas varētu stimulēt tās izmantošanas pieaugumu:

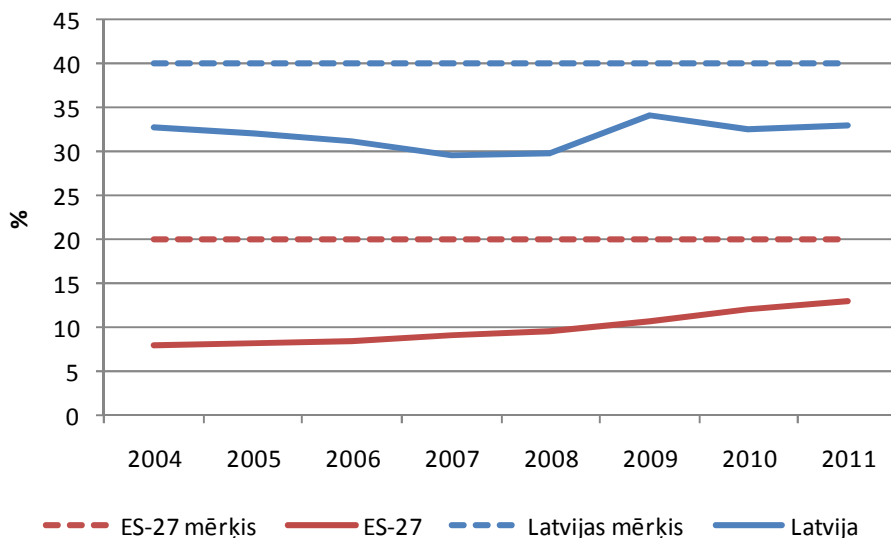
- aizstājot fosilos kurināmos ar biomasu, var nodrošināt siltumnīcefektu izraisīto gāzu emisiju (SEG) samazinājumu, jo biomas ir CO₂ neitrāls kurināmais;
- palielinot biomasas īpatsvaru kopējā energoresursu patēriņā, ir iespējams samazināt ES dalībvalstu enerģētisko atkarību, kas, salīdzinot ar 2000. gadu, ir pieaugusi par 6 % un 2010. gadā veidoja 52,7 % (1.1. att.) [2].



1.1. att. ES un Latvijas enerģētiskā atkarība 2010. gadā [2]

Direktīva 2009/28/EK par atjaunojamo energoresursu izmantošanas veicināšanu paredz, ka katra ES dalībvalsts atjaunīgo energoresursu jomā pieņem valsts rīcības plānu un nosaka individuālo mērķi. Latvijas individuālais mērķis ir 40 %

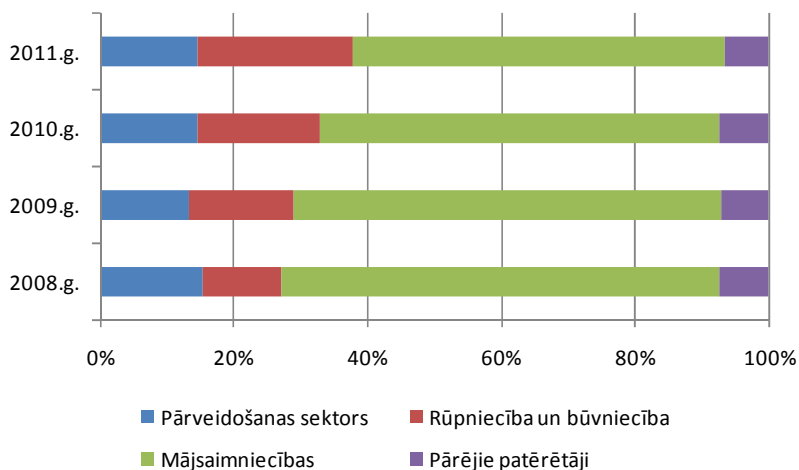
AER īpatsvars kopējā energoresursu patēriņā. 1.2. attēlā ir parādītas ES un Latvijas AER īpatsvara izmaiņas kopējā patēriņā no 2004. līdz 2011. gadam.



1.2. att. ES un Latvijas atjaunīgo energoresursu īpatsvara izmaiņas kopējā energoresursu patēriņā [6]

Kā redzams 1.2. attēlā, 2011. gadā Latvijas AER īpatsvars kopējā energoresursu patēriņā bija 33,1 %, un ir jāatzīmē, ka šis rādītājs astoņu gadu laikā būtiski nav mainījies.

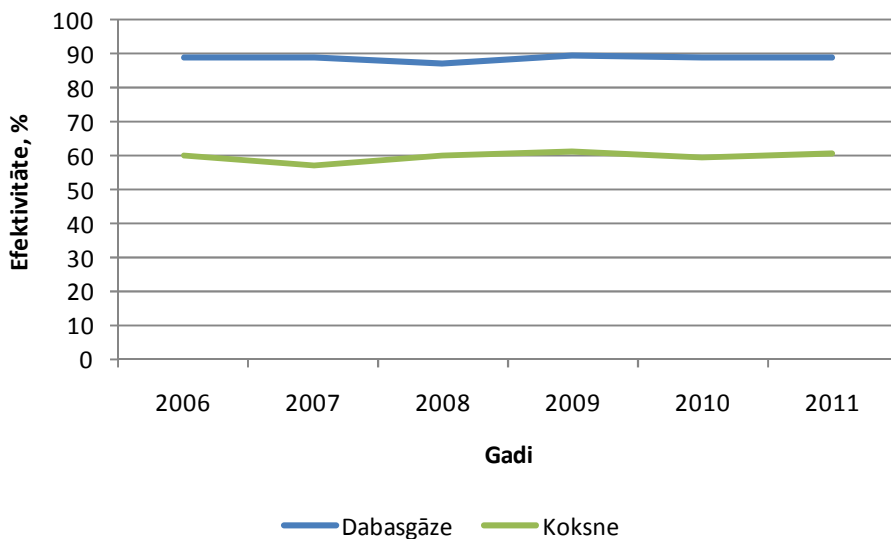
Koksne ir visizplatītākais atjaunīgais energoresurss Latvijā. 2008. gadā kurināmās koksnes īpatsvars starp atjaunīgajiem energoresursiem bija 94,4 %. Kurināmās koksnes patēriņš kopš 1990. gada ir pieaudzis par 70 % [7]. Latvija ir pieskaitāma pie mežiem bagātām valstīm. Pēdējo 100 gadu laikā Latvijas mežainums ir dubultojies un sasniedzis 50,9 %. Eiropā meži vidēji aizņem 33 % no sauszemes teritorijas [8].



1.3. att. Kurināmās koksnes izmantošana pa sektoriem [7]

Vairāk par 50 % no izmantotās kurināmās koksnes Latvijā patērē mājāsaimniecībās (1.3. att.). Siltumenerģijas un elektroenerģijas ražošanai (pārveidošanas sektors) patērē vidēji 15 % [7].

Pārveidošanas sektorā siltumenerģijas un elektroenerģijas ražošanai pārsvarā izmanto dabasgāzi. 2011. gadā dabasgāzes īpatsvars pārveidošanas sektorā bija 80 %, savukārt kurināmās koksnes īpatsvars bija 15 %. Tik zems kurināmās koksnes izmantošanas daudzums enerģijas ražošanā ir var būt saistīts ar tās atšķirīgo biomasas struktūru, elementāro sastāvu, mitruma saturu un sadegšanas siltumu dažādiem biomasas veidiem, kas ietekmē lietderības koeficientu [9].



1.4. att. Koģenerācijas staciju un katlu māju vidējie lietderības koeficienti atkarībā no izmantotā kurināmā [7]

1.4. attēlā ir salīdzināti lietderības koeficienti koģenerācijas stacijām un katlu mājām, kas strādā ar dabasgāzi un koksni, laika periodā no 2006. līdz 2011. gadam. Lietderības koeficienti tika aprēķināti, kā attiecība starp saražoto enerģijas daudzumu pret patērēto kurināmo. Katlu mājas un koģenerācijas stacijas, kas izmanto enerģijas ražošanai dabasgāzi, strādā ar vidējo lietderības koeficientu 90 %. Tajā pašā laikā katlu mājas un koģenerācijas stacijas, kas par pamatkurināmo izmanto kurināmo koksni, strādā ar mazāku efektivitāti, – aptuveni 60 %.

1.2. Biomasas sastāvs

Biomasas sastāva noteikšana ir svarīgs posms pirms tās sadedzināšanas, jo sastāvs nosaka kurināmā īpašības, kvalitāti, potenciāli izmantojamās tehnoloģijas un emisijas, kas veidosies kurināmā degšanas laikā [10]. Biomasas ķīmiskais sastāvs un fizikālās īpašības ir atkarīgas no vairākiem faktoriem, kurus var iedalīt trīs grupās:

1. biomasas veids/produkts;
2. augšanas apstākļi, kas iekļauj tādus faktorus kā dienas gaisma, ģeogrāfiskais izvietojums, klimats, augsnes veids, mēslojumu un pesticīdu izmantošana u. c.;
3. biomasas novākšana un apstrāde [4; 10; 11; 12].

Biomasa galvenie bioķīmiskie komponenti ir celuloze, hemiceluloze un lignīns, ko būtiski ietekmē biomasas veids [13; 14; 15]. Piemēram, mīkstokoks satur 40–50 % celulozes, 25–35 % hemicelulozes un 16–33 % lignīna. Lauksaimniecības biomasa, piemēram, sausa lopbarība, satur 33–35 % celulozes, 21–24 % hemicelulozes un 17–22 % lignīna. Zāle satur daudz vairāk celulozes (38–40 %), bet mazāk lignīna (15–19 %) salīdzinājumā ar mīkstokoku [14–16].

Elementārais biomasas sastāvs iekļauj pamatelementus – oglekli (C), ūdeņradi (H), slāpekli (N), sēru (S), hloru (Cl) un skābekli (O), gaistošos savienojumus (līdz 70–80 %, oglēm, piemēram, šis rādītājs ir 30–40 %) – kāliju (K), nātriju (Na), magniju (Mg), kalciju (Ca), fosforu (P) – un dažus smagos metālus [11; 13]. 1.1. tabulā ir parādīts dažādu biomasas veidu pamatelementu sastāvs. Ogleklis, ūdeņradis un skābeklis ir galvenie cietā kurināmā elementi. C un H degšanas laikā oksidējas, un eksotermisku reakciju rezultātā veidojas CO₂ un H₂O [17].

1.1. tabula

Dažāda veida biomasas kurināmā degošās masas sastāvs, % [11; 13]

<i>Kurināmā veids</i>	C^{deg}	H^{deg}	O^{deg}	N^{deg}	S^{deg}	Cl^{deg}
Koksnes šķelda (priedes)	52,0	6,2	41,59	0,12	0,08	0,01
Kviešu salmi	49,23	5,78	43,99	0,64	0,1	0,26
Lignīns	72,0	6,6	21,34	0,0	0,0	0,0
Celuloze	44,4	6,17	49,3	0,0	0,0	0,0

Biomasai salīdzinājumā ar citiem kurināmajiem ir raksturīgs liels gaistošo savienojumu daudzums, kas parasti svārstās starp 48–86 % [10]: vislielākais gaistošo savienojumu daudzums (86 %) ir konstatēts koksnes šķeldai (egles) [13]. Rezultātā lielākā daļa šo savienojumu no biomasas iztvaiko, pirms sākas homogēnas gāzes degšanas reakcijas. Gaistošo savienojumu daudzums būtiski ietekmē cietā kurināmā termisko sadalīšanu un degšanas procesa norisi. Sēra daudzums biomasas sastāvā ir nenozīmīgs – no 0,2 līdz 2 %. Vislielākā sēra koncentrācija ir novērojama salmos. Cl un S biomasā atrodas kā organiskās daļiņas, bet lielākā daļā – kā neorganiskie sāļi. Gan hlors, gan sērs daļēji atbrīvojas devolatilizācijas stadijas laikā, bet lielākā daļa šo vielu atbrīvojas oglekļa degšanas laikā [4; 10; 13].

Biomasa sastāvu veido nedegošā daļa, kurā ietilpst pelni (A) un mitrums (W). Koksnes dabiskais mitrums ir viens no visbūtiskākajiem faktoriem, kas ierobežo koksnes izmantošanu pārveidošanas sektorā. Mitrums samazina degošo vielu daudzumu kurināmajā un ietekmē degšanas procesa norisi: apgrūtina kurināmā aizdegšanos, pagarina žāvēšanas laiku, samazina kurināmā sadegšanas siltumu, samazina efektivitāti [18–20]. Bignals K. [21] u. c. un Bhatačarja S. u. c. [22] savos pētījumos secinājuši, ka mitrums koksnes biomasā ietekmē degšanas temperatūru, palielina CO emisiju daudzumu, tādā veidā samazinot CO₂ emisiju daudzumu. Tomēr tajā pašā laikā pavisam sausās koksnes degšana nenodrošina maksimālās efektivitātes sasniegšanu. Ir pierādīts [23], ka koksnes biomasā ir jābūt nedaudz mitrumam, lai samazinātu emisiju veidošanos un palielinātu efektivitāti.

1.2. tabulā ir parādīts, kā mitruma saturs koksne ietekmē tās elementāro sastāvu un sadegšanas siltumu.

1.2. tabula

Koksnes darba masas sastāvs atkarībā no mitruma satura [24]

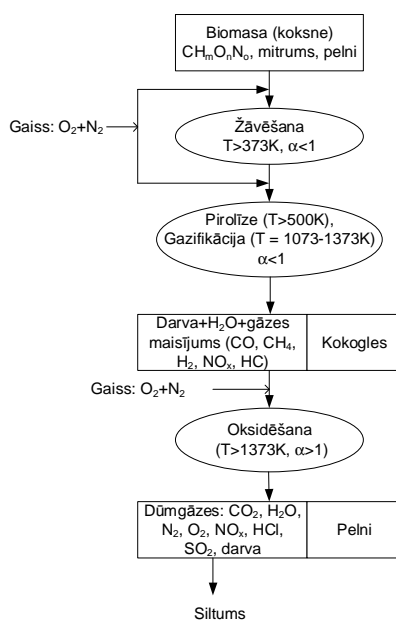
W^d , %	C^d , %	H^d , %	O^d , %	N^d , %	A^d , %	O_z^d , MJ/kg
0	50,49	6,04	41,88	0,59	1,00	18,8
10	45,44	5,44	37,69	0,53	0,90	16,7
20	40,39	4,83	33,50	0,48	0,80	14,6
30	35,34	4,23	29,31	0,42	0,70	12,4
40	30,29	3,62	25,13	0,36	0,60	10,3
50	25,25	3,02	20,94	0,30	0,50	8,2
60	20,20	2,42	16,75	0,24	0,40	6,0

Sadegot kurināmajam, paliek pāri pelni. Koksnes produktiem ir raksturīgs mazāks pelnu saturs sastāvā (ap 0,5 %), nekā lauksaimniecības produktiem (salmiem pelnu saturs svārstās līdz 12 %).

Biomases sastāvs ietekmē degšanas tehnoloģijas izvēli, kā arī ietekmē kopējās biomasas enerģijas pārveidošanas izmaksas [12; 13].

1.3. Biomasas degšana

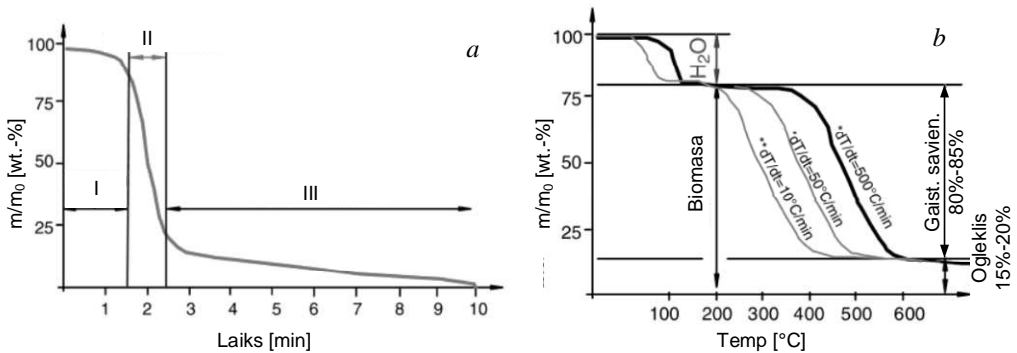
Biomasas sadegšana ir kurināmā cietās organiskās daļas oksidēšana – pārvēršana par gāzes sadegšanas produktiem. Degšana ietver vairākus sarežģītus fizikālus un ķīmiskus procesus: biomasas silšanu, mitruma iztvaicēšanu, pirolīzi un gazifikāciju ar gaistošo savienojumu veidošanos, šo savienojumu uzliesmošanu un degšanu, un pēdējais posms ir kokogļu un gāzes sadegšanas produktu veidošanās (1.5. att.) [13; 17; 25; 26].



1.5. att. Biomasas degšanas posmi [17]

Cietā kurināmā degšanas procesa norise ir būtiski atkarīga no izmantotā kurināmā veida, fizikālajiem parametriem (mitrums, sadegšanas siltums, daļiņu izmērs, tilpuma blīvums), kurināmā ķīmiskā sastāva, gaisa padeves veida, gaistošo savienojumu sajaukšanās ar gaisa plūsmu, kā arī no sadedzināšanas iekārtām [17; 26; 31].

Katram biomasas degšanas posmam ir raksturīgas noteiktas temperatūras un ilgums. 1.6. attēlā ir parādītas biomasas masas zuduma izmaiņas degšanas laikā atkarībā no laika un temperatūras. Katra posma ilgums ir atkarīgs no kurināmā gabalu izmēriem un īpašībām, temperatūras un degšanas nosacījumiem [26].

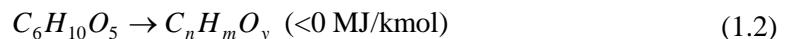


1.6. att. Biomasas masas zuduma funkcija atkarībā no laika (a) un temperatūras (b) [26]

I – biomasas sildīšana un žāvēšana, II – pirolīze, III – oglekļa oksidēšanās un reducēšanās

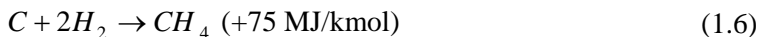
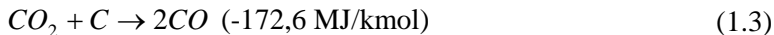
Žāvēšana. Biomasas sildīšana un žāvēšana ir pirmais posms kopējā cietā kurināmā degšanā. Šis process ir atkarīgs no mitruma satura kurināmajā [27].

Pirolīze. Pirolīze ir viens no biomasas termiskās sadalīšanās posmiem, kas notiek bez skābekļa vidē [14; 18]. Sākumā 450–600 K temperatūrā sadalās hemiceluloze, augstākās temperatūrās (580–650 K) sāk sadalīties celuloze. 673 K temperatūrā lielākā daļa gaistošo savienojumu ir iztvaikota un pirolīzes ātrums strauji samazinās. Sākas lignīna sadalīšanās, kas notiek augstās temperatūrās (500–1200 K). Lignīna termiskā sadalīšanās norit relatīvi lēni un samērā plašā temperatūru intervālā [14; 15; 25]. Galvenās pirolīzes reakcijas ir [27]:



Biomasas pirolīzes rezultātā galvenokārt veidojas darvas tvaiki ($CH_{1,2}O_{0,5}$), ogļu un gāzu maisījums, kura sastāvā ir CO un CO_2 , H_2 , H_2O , CH_4 . Kurināmā veids, spiediens, sildīšanas temperatūra un reakcijas laiks ietekmē galaproduktu daudzumu un īpašības [4; 27; 28]. Obernbergers un Bruners savā pētījumā [17] ir secinājuši, ka zemas temperatūras un lēna sildīšanas ātruma dēļ pirolīzes laikā veidojas maksimāls kokogļu daudzums, bet, ja mērķis ir palielināt gāzes maisījuma daudzumu, ir jānodrošina augstas temperatūras, lēns sildīšanas ātrums un ilgs gāzes uzturēšanās laiks.

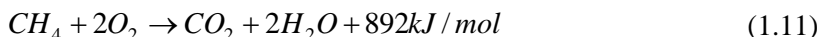
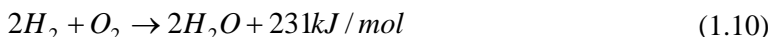
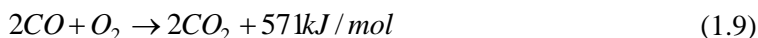
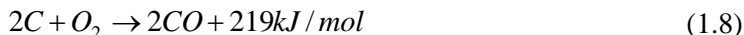
Gazifikācija. Gazifikācija ir termisks biomasas sadalīšanās process, kas notiek ierobežota skābekļa daudzuma apstākļos: $\alpha < 1$ (parasti α ir aptuveni 0,25–0,3) [27–29]. Biomasas gazifikācija iekļauj sekojošas un paralēlas reakcijas [27; 28; 30]:



Reakcijas (1.3) un (1.4) ir endotermiskas, reducēšanās reakcijas. Šo reakciju laikā samazinās gāzes temperatūra, un tā ir 1073–1273 K [27].

Gazifikācijas rezultātā veidojas viegli uzliesmojošs gāzes maisījums, kura sastāvā ir CO, H₂, CO₂, H₂O un neliels metāna daudzums. Gāzes sastāvs ir atkarīgs no biomasas veida, gazifikācijas temperatūras, oglekļa monoksīda un dioksīda vai ūdeņraža un tvaika attiecības (CO/CO₂ vai H₂/H₂O), reaktora tipa, kā arī no stehiometriskajiem apstākļiem gazifikācijas laikā. Gazifikācijas procesā gaisa patēriņa koeficients (α) ir aptuveni 0,25, kas ir pietiekami, lai pārvērstu oglekli gāzē. Ja $\alpha < 0,25$, tad noteikts oglekļa daudzums var nepārvērsties par gāzi, bet, ja $\alpha > 0,25$, neliels gāzes daudzums var tikt sadedzināts un temperatūra strauji pieaug [13; 27–29].

Oksidēšana. Oksidēšana ir pēdējais biomasas degšanas process. Lai nodrošinātu pilnīgu degšanu, gaisa daudzumam ir jābūt lielākam, nekā teorētiski nepieciešams ($\alpha > 1$). Degšanas reakcijas ir eksotermiskas. Galvenās reakcijas, kas nodrošina siltuma izdalīšanos degšanas procesā, ir oglekļa un gaistošo savienojumu (CO, H₂) reakcijas ar gaisa skābekli [32]:



Pēdējā posmā iegūtās karstās gāzes var izmantot siltumenerģijas ražošanā.

Viens no vissvarīgākajiem degšanas procesa kontrolēšanas parametriem ir attiecība starp pievienotā gaisa daudzumu un gaisa (skābekļa) daudzumu, kas ir nepieciešams, lai nodrošinātu pilnu sadegšanu, – gaisa patēriņa koeficients α . Pirolīzes un gazifikācijas procesam ir raksturīgs $\alpha < 1$. Tā ir nepilnīgā kurināmā oksidēšanās, tāpēc tikai daļa tiek pārveidota siltumenerģijā. Teorētiskais optimums jeb stehiometriskie apstākļi ir tad, kad $\alpha = 1$, tomēr parasti gaisu pievieno nedaudz vairāk. Gaisa patēriņa koeficients α ir atkarīgs no sadedzināšanas iekārtām: lielajām iekārtām α ir robežās no 1,1–1,8, bet mazajām – 1,5–2,0 [17].

Iepriekš veiktie pētījumi [33; 34] ir apliecinājuši, ka gaistošo savienojumu veidošanos un uzliesmošanu var nodrošināt, izmantojot propāna/butāna liesmu, kuru vienlaicīgi ir iespējams izmantot biomasas degšanas procesa stabilizācijai, palielinot degšanas procesa efektivitāti un ierobežojot nepilnīgās sadegšanas produktu veidošanos biomasas degšanas procesā.

1.4. Degšanas procesa dinamika

Gan gāzveida, gan arī cietā kurināmā stabila degšanas procesa nodrošināšanā svarīga loma ir pareizas liesmas dinamikas izveidei, veicinot efektīvu kurināmā sajaukšanos ar gaisa plūsmu un pilnīgu gaistošo savienojumu sadedzināšanu. Praksē efektīvu gaisa un degvielas sajaukšanos nodrošina, izmantojot gaisa virpuļplūsmas [35–37]. Virpuļplūsmas plaši izmanto degšanas kamerās kā instrumentu, ar kura palīdzību ir iespējams vadīt liesmas izmēru un formu, kā arī degšanas stabilitāti un intensitāti. Virpuļplūsmas veido, izmantojot rotējošās lāpstiņas, rotējošās iekārtas ar aksiālo-tangenciālo pievadīšanu, kā arī tangenciālo iepūšanu degšanas kamerā. Liesmas virpuļplūsmas raksturo trīsdimensionālu ātruma sadalījumu veidošanās, ko nosaka:

- plūsmas aksiālais ātrums, veidojot konvektīvu plūsmu gar liesmas garumu (v_{ax});
- radiālais ātrums, kas saistīts ar liesmas komponentu radiālo pārnesi virzienā no liesmas centra uz tās ārējo daļu (v_{rad});
- tangenciālais ātrums, kas virzīts pa pieskari liesmas šķērsriezuma konkrētajā punktā (v_{tg}) [35].

Virpuļplūsmas intensitāti raksturo ar bezdimensionālu parametru S . S ir virpuļskaitlis, kurš nosaka aksiālās plūsmas tangenciālā momenta un aksiālā momenta attiecību un kuru var aptuveni novērtēt ar šādu formulu [35; 38]:

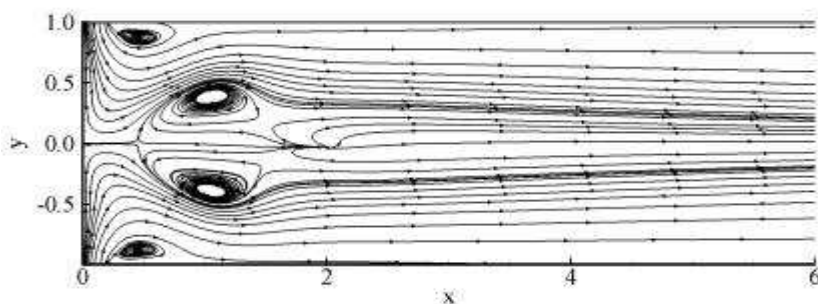
$$S = \frac{2 v_{tg}}{3 v_{ax}}, \quad (1.12)$$

kur

v_{ax} – aksiālais ātrums;

v_{tg} – tangenciālais ātrums.

Ja virpuļplūsmas intensitāte ir neliela ($S \leq 0,6$), degļa izejā centrālās spēku iedarbības rezultātā novēro virpuļplūsmas pakāpenisku izplešanos ar pakāpenisku aksiālā un radiālā spiediena gradientu veidošanos. Stipri savirpuļotā plūsmā ($S \geq 0,6$), veidojas lieli spiediena gradienti ($\partial p / \partial r = \rho \omega^2 / r$), kas izraisa recirkulācijas zonas veidošanos degļa izejā (1.7. att.), samazinot aksiālās plūsmas ātrumu liesmas veidošanās sākuma stadijā un intensificējot komponentu sajaukšanos degļa izejā [39].



1.7. att. Recirkulācijas zonas veidošanās [40]

Recirkulācijas zonu raksturo ātruma sadalījuma izmaiņas un augsts plūsmas turbulences līmenis, nodrošinot intensīvu liesmas komponentu sajaukšanos molekulārā līmenī ar savstarpēji saistītām ķīmisko reakciju ātruma izmaiņām degšanas zonā [35; 39; 41]. Eksperimentālo pētījumu rezultāti [42–44] apliecina, ka recirkulācijas zonai ir būtiska loma degšanas procesa stabilizēšanā, izraisot karsto degšanas produktu recirkulāciju un samazinot degšanas zonas izmērus ar būtisku liesmas garuma samazināšanos. Respektīvi, mainot virpušķaitli S degļa izejā un degšanas produktu recirkulāciju, ir iespējams mērķtiecīgi izmainīt degšanas zonas temperatūru, mainot ķīmisko reakciju ātrumu degšanas zonā un degšanas produktu sastāvu. No iepriekšējiem pētījumiem [42; 45] secināts, ka pakāpeniska gaisa virpuļplūsmas sajaušanās ar gaistošo savienojumu plūsmu veido samērā zemu degšanas zonas temperatūru, tādā veidā ierobežojot NO_x emisiju veidošanos.

1.5. Biomasas degšanas ietekme uz apkārtējo vidi

Piesārņojumus, kas veidojas biomasas degšanas laikā, var iedalīt trīs galvenajās kategorijās:

1. pilnīgas biomasas sadegšanas galaprodukti: CO_2 , H_2O , NO_x ;
2. nepilnīgas biomasas sadegšanas produkti: CO , C_xH_y , darva, kvēpi, H_2 , N_2O , poliaromātiskie ogleņdeņraži u. c.;
3. pelni un dažādas izcelsmes minerālvielu, kā arī metālu piejaukumi: KCl , SO_2 , HCl , Cu , Pb u. c. Šī veida piesārņojumi var veidoties gan pilnīgas, gan nepilnīgas sadegšanas rezultātā [4; 13; 17; 26].

1.5.1. Biomasas pilnīgas sadegšanas produkti

Biomasas degšanas laikā viens no mērķiem ir nodrošināt pilnīgu sadegšanu. Svarīgi nosacījumi pilnīgai biomasas sadegšanai ir temperatūra $> 850\text{ }^\circ\text{C}$, gaisa patēriņa koeficients $\alpha > 1$ un laba sajaušanās [13; 26]. Zemāk ir minētas emisijas, kas veidojas biomasas pilnīgas sadegšanas rezultātā.

Oglekļa dioksīda (CO_2) emisijas

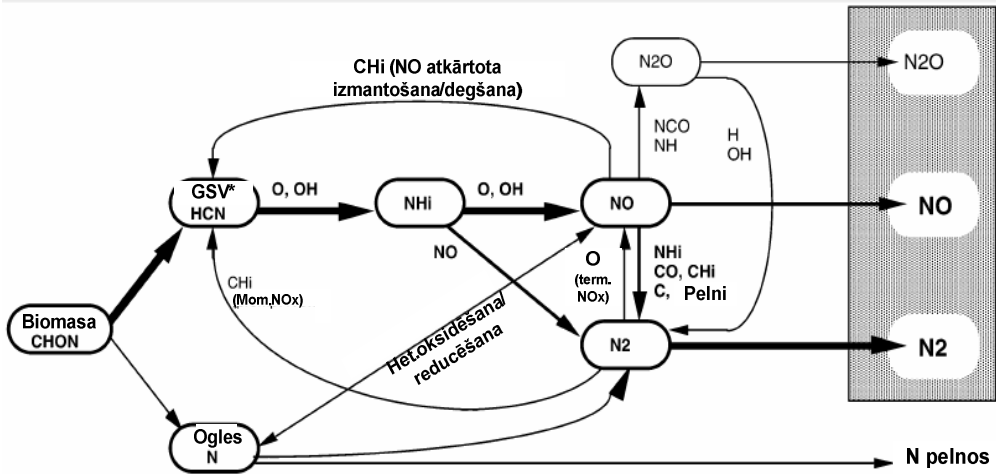
Pilnīgas biomasas sadegšanas galvenais produkts CO_2 atšķirībā no oglekļa izmešiem, kas veidojas fosilā kurināmā degšanas procesā, ir nekaitīgs apkārtējai videi, jo neizraisa siltumnīcefekta veidošanos un globālo sasilšanu, veicinot dabīgo oglekļa apriti dabā.

Slāpekļa oksīdu (NO_x) emisijas

Degšanas laikā kurināmā slāpekļis pilnīgi pārveidojas par N_2 un slāpekļa oksīdiem NO_x (NO , NO_2) [4; 13]. NO_x emisijas veidojas pie dažādiem nosacījumiem, un tās iedala trīs grupās:

- termiskās NO_x emisijas (*thermal NO_x* – angļu val.), kas veidojas augstās temperatūrās $\sim 1300\text{ }^\circ\text{C}$, oksidējoties ar atmosfēras N_2 . Šīs emisijas palielinās, pieaugot temperatūrai, skābekļa koncentrācijai un uzturēšanās laikam;
- momentānās NO_x emisijas (*prompt NO_x* – angļu val.), līdzīgi kā termiskās NO_x emisijas, oksidējas ar atmosfēras N_2 , veidojas temperatūrās virs $1300\text{ }^\circ\text{C}$, pie zema gaisa patēriņa koeficienta un ogleņdeņraža klātbūtnē;
- kurināmā NO_x emisijas (*fuel NO_x* – angļu val.) veidojas no kurināmajā esošā slāpekļa oksidācijas. Kurināmā slāpekļis pārveidojas par NO ($> 90\%$) un NO_2 ($< 10\%$) emisijām. Svarīgi primārie slāpekli saturošie elementi ir NH_3 un HCN , kas, reaģējot ar skābekli, pārveidojas NO emisijās [13; 15; 25; 46].

Pirmie divi NO_x emisiju veidi veido tikai 30 % no kopējā NO_x emisiju daudzuma, kas rodas biomasas sadegšanas rezultātā. Lielākā daļa no NO_x emisijām veidojas no kurināmā slāpekļa, kas biomasā pastāv vairākos veidos: kā neorganiskais nitrāts un amonija jons, aminosavienojumi, heterocikliskie purīni un pirimidīni [4]. NO_x emisijas veidojas gāzes un oglekļa degšanas stadijā. 1.8. attēlā ir parādīta slāpekļa pārveidošanās biomasas degšanas laikā.



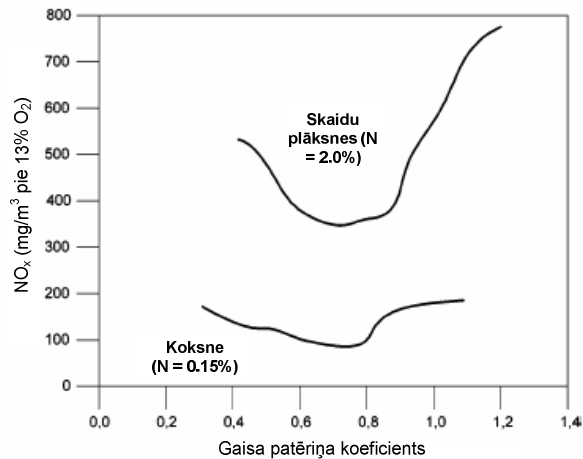
1.8. att. Kurināmā slāpekļa pārveidošanās biomasas degšanas laikā [26]

Degšanas zonas sastāvs nosaka vairākus iespējamus NO_x veidošanās mehānismus degšanas procesā. Ja degšanas procesu organizē ar nosacījumu, ka tiek nodrošināta stehiometriska ($\alpha = 1$) biomasas degšana, NO_x veidošanos nosaka divpakāpju Zeldoviča mehānisms ar divpakāpju reakcijām starp skābekļa atomiem un slāpekļa molekulām [47]:



Šajā gadījumā NO_x veidošanās ātrumu ierobežo atomārā skābekļa veidošanās un tā mijiedarbība ar slāpekli. Šo reakciju raksturo augsta aktivizācijas enerģija, un reakcijas ātrums strauji samazinās, ja tiek nodrošināts gaisa padeves pārsvars degšanas zonā ($\alpha > 1$), vienlaikus samazinot degšanas zonas temperatūru [47].

Galvenie parametri, kas ietekmē NO_x emisiju veidošanos, ir slāpekļa saturs kurināmajā, gaisa patēriņa koeficients (α), kurtuves uzbūve, degšanas temperatūra, degšanas tehnoloģijas veids [13; 17]. 1.9. attēlā ir parādīts, kā NO_x daudzums ir atkarīgs no gaisa patēriņa koeficienta (α).



1.9. att. NO_x emisijas kā funkcija no primārā gaisa patēriņa koeficienta [26]

Sēra oksīdu (SO_x) emisijas

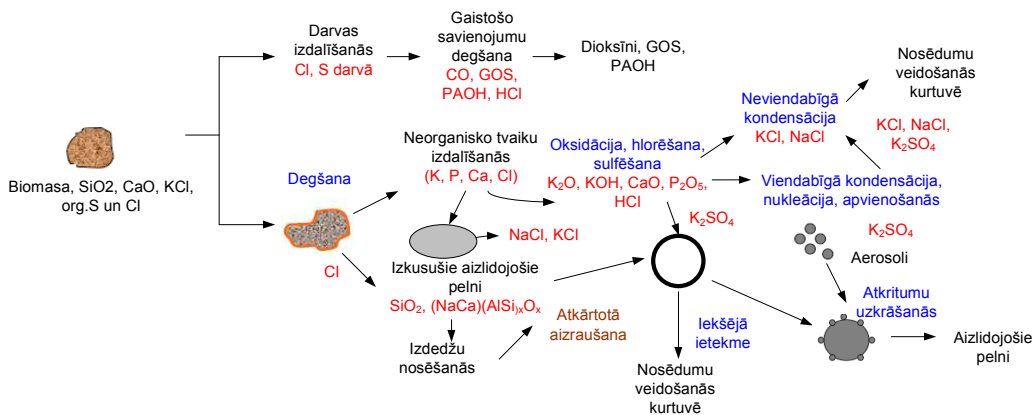
Sēra oksīdi ir kurināmā sēra pilnas oksidēšanās rezultāts. Sērs veido pārsvarā SO₂ emisijas (> 95 %) un SO₃ emisijas (< 5 %), kas veidojas zemās temperatūrās. Kurināmā sērs pilnīgi nepārveidojas SO_x emisijās, nozīmīga daļa paliek pelnos (40–90 %), bet mazākā daļa tiek emitēta K₂SO₄ vai H₂S veidā zemās temperatūrās. Katlā, kur dūmgāzes ātri tiek atdzesētas, sulfāti kondensējas uz gaistošām pelnu daļiņām vai uz cauruļu virsmas [4; 13].

Ūdeņraža hlorīda (HCl) emisijas

Kā iepriekš jau minēts, hlora daudzums koksnē ir ļoti nenozīmīgs. Daļa hlora, kas ir biomasas kurināmā sastāvā, tiek emitēta HCl veidā, neliels daudzums tiek emitēts dioksīnu un organiskā hlora veidā, bet lielākā daļa pārveidojas sāļos (KCl, NaCl), reaģējot ar K un Na. Samazinoties dūmgāzu temperatūrai, sārmu un sārmainie hlorīdi kondensējas uz katla sienām, gaistošo pelnu daļiņām vai siltummaiņa virsmas [13; 17].

Cietās daļiņas no pilnīgas biomasas sadegšanas

Cietās daļiņas veidojas biomasas degšanas procesā vairākos veidos. Pie pilnīgas biomasas sadegšanas daļiņām pieskaita gaistošos pelnus, kas tiek aizrauti no dūmgāzēm. Aizlidojošie pelni satur daļiņas, kuru izmērs ir lielāks par 1 μm, un daļiņas (aerosoli), kuru izmērs ir mazāk par 1 μm. Aerosoli veidojas no tādām daļiņām kā sāļi KCl, NaCl, K₂SO₄. Aerosoli ir rezultāts reakcijām starp K vai Na un Cl vai S, kas atbrīvojas degšanas laikā [4; 13]. 1.10. attēlā ir parādīta aerosolu, nogulsņējumu un piesārņojumu veidošanās no K, Cl un S daļiņām.



1.10. att. Aerosolu, nosēdumu un piesārņojumu veidošanās no K, Cl un S daļiņām [4]

Galvenā aerosolu sastāvdaļa ir viegļie gaistošie elementi, ieskaitot smagos metālus. Šiem elementiem ir raksturīga zema kušanas temperatūra, tāpēc aerosoli ietekmē nosēdumu veidošanos boileros un palielina katla korozijas risku [4].

Smagie metāli

Neapstrādāta biomasa satur smagos metālus. Svarīgākie no tiem ir Cu, Pb, Cd, Hg. Šie metāli paliek pelnos vai iztvaiko, vai tiek emitēti kopā ar gaistošajiem pelniem [4].

1.5.2. Nepilnīgas sadegšanas produkti

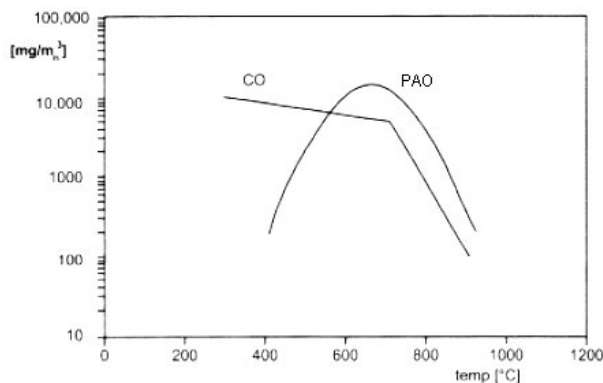
Nepilnīgas sadegšanas produkti veidojas vairāku iemeslu dēļ:

- degšanas laikā nav nodrošināta atbilstoša kurināmā un gaisa sajaukšanās degšanas kamerā, kā rezultātā veidojas atsevišķas ar kurināmo bagātas zonas;
- nav nodrošināts nepieciešamais gaisa daudzums;
- pārāk zemas degšanas temperatūras;
- pārāk mazs uzturēšanās laiks.

Nepilnīgas degšanas rezultātā veidojas vairākas emisijas: CO, CH₄, policikliskie aromātiskie ogļūdeņraži (turpmāk – PAO), gaistošie savienojumi, daļiņas u. c. [13; 26; 48].

Oglekļa monoksīda (CO) emisijas

Degšanas laikā kurināmā ogleklis pārveidojas CO₂ emisijās. Savukārt, ja degšanas laikā nav nodrošināts pietiekams skābekļa daudzums, tad veidojas oglekļa monoksīda emisijas. Ātrums, pie kura CO oksidējas par CO₂, galvenokārt ir atkarīgs no temperatūras (1.11. att.). Uzturēšanās laiks arī ietekmē CO emisiju veidošanos. Ņemot vērā, ka biomasā ir relatīvi liels gaistošo savienojumu daudzums, tai ir nepieciešams ilgāks uzturēšanās laiks, lai gaistošie savienojumi pilnībā sadegtu. Cits iemesls, kāpēc veidojas CO emisijas, ir saistīts ar kurināmā sastāvu – pelnu daudzumu. Pelnu slānis, kas atrodas ap kurināmā daļiņām, ierobežo skābekļa difūziju. CO emisiju daudzums ir indikators, kas nosaka degšanas kvalitāti. Parasti lielas jaudas iekārtās ir vairāk iespēju uzlabot degšanas procesu nekā mazas jaudas iekārtās [13; 48].



1.11. att. CO un PAO emisijas (mg/m^3) kā funkcija no degšanas temperatūras [13]

Metāna (CH_4) un PAO emisijas, gaistošie savienojumi

CH_4 , PAO un gaistošie savienojumi (visi ogļūdeņraži, neieskaitot CH_4 un PAO) veidojas zemās sadegšanas temperatūrās, kad ir īss uzturēšanās laiks un nepietiekams skābekļa daudzums. Šīs emisijas veidojas starpposmā, kad kurināmā ogleklis pārveidojas CO_2 emisijās, bet kurināmā ūdeņradis – H_2O [48].

Daļiņas no nepilnīgas biomasas sadegšanas

Šajā gadījumā ar daļiņām, kas veidojas biomasas nepilnīgas sadegšanas rezultātā, saprot kvēpus, ogles vai kondensētus ogļūdeņražus (darvu). Kvēpu sastāvā pārsvarā ir ogleklis, kas veidojas gaisa trūkuma dēļ liesmas zonā un/vai liesmas izdzišanā. Ogles daļiņas tiek aizrautas līdz uz dūmgāzēm šo daļiņu zemā blīvuma dēļ, īpaši pie liela dūmgāzes ātruma. Šīs emisijas veidojas, esot zemām sadegšanas temperatūrām, īsam uzturēšanās laikam un nepietiekamam skābekļa daudzumam [13].

Polihlorēti dioksīni un furāni

Šīs emisijas sastāv no ļoti toksiskiem komponentiem, kas veidojas ļoti mazā daudzumā. Dioksīni veidojas, kad hlors, ogleklis, ūdeņradis un skābeklis nonāk kontaktā ar siltumu. Šo emisiju daudzums ir atkarīgs no apstākļiem, kādos kurināmais ir dedzināts, kā arī no dūmgāzu dzesēšanas [13; 48]. Pirmie dioksīni sāk veidoties 500–700 °C temperatūrā, bet tos var likvidēt 2 sekunžu laikā 850 °C temperatūrā un vienas sekundes laikā 1000 °C temperatūrā. Bez noteiktas temperatūras dioksīnu sagraušanai ir jānodrošina šādi nosacījumi: gaiss jāpadod vairāk, nekā teorētiski nepieciešams ($\alpha > 1$) un jānodrošina pienācīga sajaukšanās [48].

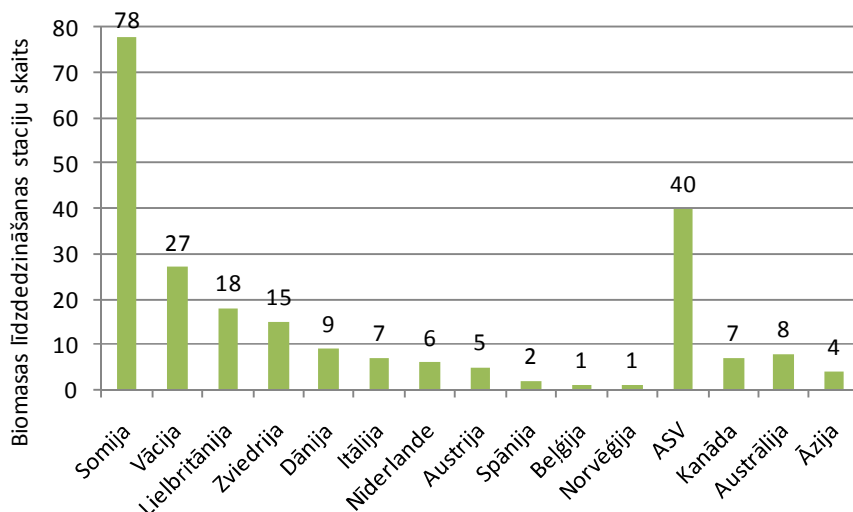
1.6. Biomasas sadedzināšanas veidi efektīvākai enerģijas ražošanai

Dedzinot kurināmo, galvenais mērķis attiecībā uz apkārtējo vidi ir nodrošināt efektīvu kurināmo sadedzināšanu, kuras laikā veidojas pēc iespējas mazāk siltumnīcefektu izraisošo gāzu emisiju. Pastāv dažādas iespējas [13], lai nodrošinātu emisiju samazinājumu un efektīvāku enerģijas ražošanu, dedzinot koksnes biomasu. Šīs iespējas ir saistītas ar izmantoto kurināmo (koksnes biomasas veidu, mitruma saturu), degšanas iekārtu (dizainu, kurināmā un gaisa padevi) un degšanas nosacījumiem (degšanas temperatūra, uzturēšanās laiks) u. c. Promocijas darba ietvaros ir izpētītas divas iespējas koksnes biomasas efektīvākai sadedzināšanai: līdzdedzināšana ar gāzes fosilo kurināmo un magnētiskā lauka izmantošana. Iepriekš veiktie pētījumi [33; 34; 42; 45; 49] par koksnes biomasas līdzdedzināšanu ar propāna

un butāna maisījumu ir pierādījuši, ka kombinētais degšanas process liesmas degšanas zonā nodrošina intensīvāku gaistošo savienojumu veidošanos un ātrāku gaistošo savienojumu uzliesmošanu degšanas procesa sākuma stadijā, kā arī pilnīgāku gaistošo savienojumu sadedzināšanu iekārtā, nodrošinot tīrāku un efektīvāku siltumenerģijas ražošanu, kā arī saražotās siltuma enerģijas pieaugumu iekārtā. Pētījumi [49–54] par magnētiskā lauka izmantošanu koksnes biomasas degšanas laikā apliecina, ka magnētiskais lauks intensificē paramagnētiskā skābekļa aksiālo masas pārneš lauka gradienta virzienā, uzlabojot biomasas gazifikāciju un gaistošo savienojumu veidošanos, kā arī samazinot aksiālo ātrumu, nodrošina ilgāku gaistošo savienojumu uzturēšanos degšanas zonā un to pilnīgāku sadedzināšanu.

1.6.1. Biomasas līdzdedzināšana ar fosilajiem kurināmajiem

Līdzdedzināšana jeb vienlaicīga kombinētā degšana ir divu vai vairāku kurināmā veidu sadedzināšana vienlaicīgi vienā tehnoloģiskajā iekārtā. Parasti atjaunīgo energoresursu – biomasu – dedzina vienlaicīgi ar fosilo kurināmo, piemēram, oglēm vai dabasgāzi. Pasaulē ir liela interese par biomasas un fosilā kurināmā līdzdedzināšanu, jo, aizstājot fosilos kurināmos ar AER, tiek palielināts AER īpatsvars kopējā energoresursu patēriņā un tiek samazinātas SEG emisijas [55; 56]. Atkarībā no izvēlētajā kurināmā veida un to procentuālās kombinācijas mainīsies arī līdzdedzināšanas rezultātā radušos videi kaitīgo emisiju sastāvs. Ne mazāk būtisks faktors līdzdedzināšanas izmantošanai ir nodrošināt stabilu un kontrolējamu siltuma ražošanu, sadedzinot dažāda sastāva, struktūras un mitruma koksni [9]. Mitruma koksnes (mitruma saturs līdz 60 %) sadedzināšanas gadījumā kombinētais degšanas process notiks ātrāk un efektīvāk.



1.12. att. Biomasas līdzdedzināšanas staciju skaits [57]

Apkopojot informāciju no Starptautiskas Enerģētikas aģentūras (IEA – International Energy Agency) datubāzes par biomasas līdzdedzināšanu [57], var secināt, ka pasaulē eksistē vairāk nekā 228 līdzdedzināšanas stacijas jaudas diapazonā 50–700 MW_e, vairāk nekā 100 no tām atrodas Eiropā: Somijā, Vācijā, Zviedrijā

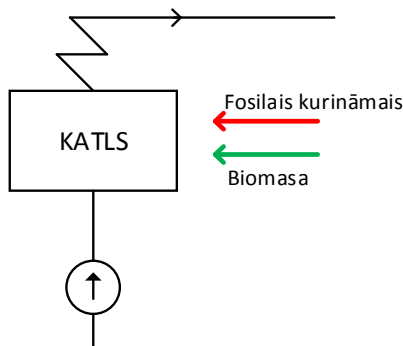
(1.12. att). Līdzdedzināšanas procesos izmanto dažāda veida atjaunīgo kurināmo: koksni, biomasas atkritumus, graudaugus un zāli. Biomasas īpatsvars mainās robežās no 1 līdz 20 %.

1.6.1.1. Līdzdedzināšanas tehnoloģiju veidi

Pastāv trīs līdzdedzināšanas pamattehnoloģijas, un katrai no tām ir pozitīvie un negatīvie aspekti:

- tiešā līdzdedzināšana;
- netiešā līdzdedzināšana;
- paralēlā līdzdedzināšana [56; 58].

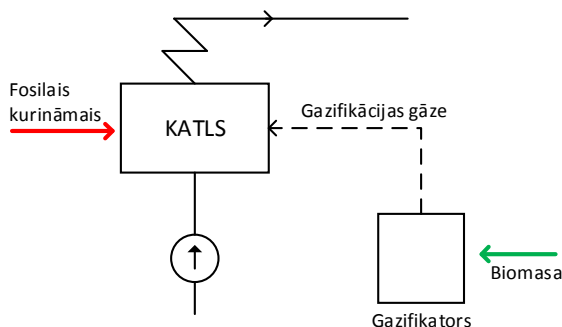
Tiešā līdzdedzināšana. Šī tehnoloģija paredz, ka biomasu un fosilo kurināmo sadedzina vienā kurtuvē (1.13. att.). Šo veidu izmanto visbiežāk, jo tas ļauj vienlaicīgi līdzdedzināt biomasu apmēram 3 % no saražotās enerģijas bez papildu investīcijām. Tomēr kā šīs tehnoloģijas trūkums jāmin tas, ka sadedzināmā biomasas daļa ir ļoti maza, kā arī ir vērojamas problēmas katlu apkalpošanā, ko izraisa pelni un virsmu korozija.



1.13. att. Tiešās līdzdedzināšanas shēma [56]

Tiešo līdzdedzināšanas tehnoloģiju izmanto Austrijā St. Andrā spēkstacijā (124 MW_e), kur putekļveida ogles līdzdedzina ar zāģskaidām, kuru īpatsvars ir 3 % [56].

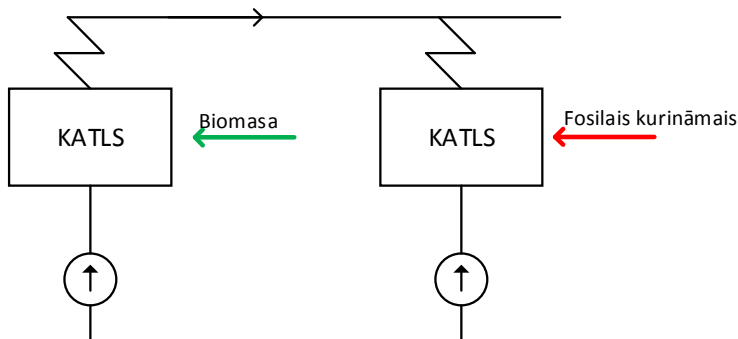
Netiešā līdzdedzināšana. 1.14. attēlā ir parādīta netiešās līdzdedzināšanas tehnoloģijas shēma.



1.14. att. Netiešās līdzdedzināšanas shēma [56]

Netiešās līdzdedzināšanas tehnoloģijas pamatā ir biomasas pārveidošana gāzē, ko tālāk sadedzina ar fosilo kurināmo. Izmantojot šādu tehnoloģiju, ir jāuzstāda biomasas gazifikators, lai cieto biomasu pārvērstu ģeneratora gāzē, kuru var sadedzināt ogļu katlu kurtuvēs. Kurināmajai gāzei, ko iegūst pēc biomasas gazifikācijas, ir raksturīga zema kaloritāte, kas ir būtiski atkarīga no mitruma satura biomasā [13]. Saražoto kurināmo gāzi pirms padeves degšanas kamerā ir jāattīra, lai samazinātu degšanas produktu ietekmi uz ģeneratora gāzes kvalitāti un katla darbināšanu. Šīs tehnoloģijas priekšrocība ir tā, ka gāzes sagatavošana un attīrīšana notiek atsevišķi, kas dod iespēju izmantot lielāku biomasas kurināmo daudzveidību, ļauj katliem darboties arī tad, kad biomasas iekārtas darbojas nepareizi, degšanas procesā rodas mazāk emisiju, nekā tiešajā līdzdedzināšanā, kā arī ir iespēja atdalīt biomasas pelnus no ogļu pelniem. Šim veidam ir nopietni trūkumi – lieli kapitālieguldījumi un zema efektivitāte. Netiešās līdzdedzināšanas tehnoloģiju izmanto Austrijas spēkstacijā Zeltweg (137 MW_e) un Somijas Lāhti spēkstacijā (167 MW_e) [56; 58].

Paralēlā līdzdedzināšana. Šīs tehnoloģijas shēma ir parādīta 1.15. attēlā.



1.15. att. Paralēlās līdzdedzināšanas shēma [56]

Izmantojot paralēlās līdzdedzināšanas tehnoloģiju, biomasas un fosilā kurināmā dedzināšana notiek atsevišķās kurtuvēs, kuras savienotas ar tvaika vadu sistēmu. Šāda sistēma nodrošina to, ka kurināmie nesajaucas un katram no tiem var ieregulēt optimālus darbināšanas apstākļus, biomasas daļa var būt liela, kā arī šī sistēma dod iespēju atdalīt biomasas pelnus no fosilā kurināmā pelniem. Šādu tehnoloģiju izmanto Dānijā, Ensted spēkstacijā, kur elektriskā jauda ir 660 MW_e.

1.6.1.2. Līdzdedzināšanas priekšrocības un trūkumi

Kā jau iepriekš minēts, biomasu var līdzdedzināt ar dažādiem kurināmajiem, bet visizplatītākie līdzdedzināšanas piemēri ir:

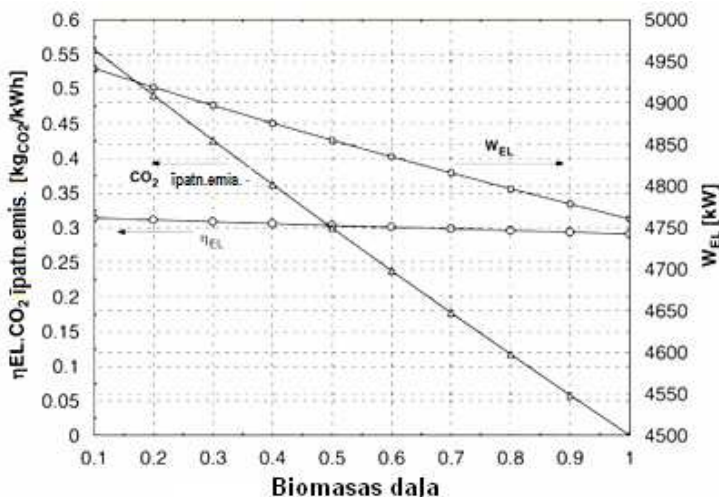
- akmeņogļu un biomasas līdzdedzināšana [55; 58; 59];
- dabasgāzes un biomasas sintēzes gāzes līdzdedzināšana [60–62].

Biomasas un ogļu līdzdedzināšanas priekšrocība ir CO₂, NO_x un SO_x emisiju samazinājums. Al Mansurs un Zuvala [56] pētījumā ir aprēķinājuši, ka gadījumā, ja visās ogļu elektrostacijās biomasu līdzdedzinātu ar fosilo kurināmo un biomasas īpatsvars būtu 5 % no saražotās enerģijas, tad CO₂ samazinājums varētu veidot 300 Mt/gadā. Tomēr biomasas un ogļu līdzdedzināšanas procesam ir vairākas tehniskas problēmas: malšanas un resursu pievadīšanas problēmas, palielināts izdedžu daudzums, korozijas un nosēdumu problēmas, kā arī ogļu sadegšanas siltums ir

augstāks nekā biomasai, tāpēc, vienlaicīgi dedzinot ogles ar biomasu, ir iespējama jaudas un efektivitātes samazināšanās [63; 64].

Biomasas gazifikācijas rezultātā iegūto gāzi ir iespējams līdzdedzināt ar dabasgāzi. Dabasgāzes un biomasas kombinētā degšanas procesa laikā samazinās siltumnīcefektu izraisošās CO₂ emisijas. Biomasas un dabasgāzes līdzdedzināšanas gadījumā galvenās problēmas ir saistītas ar gazifikācijas gāzes attīrīšanu (no cietajām daļiņām, darvas, slāpekļa, sēra un sārmu metālu savienojumiem) līdz vajadzīgajai kvalitātei [16; 60; 61]. Biomasu cietā veidā var līdzdedzināt arī ar dabasgāzi, bet tādu piemēru ir ļoti maz. Dānijā 2002. gadā dabasgāzes koģenerācijas staciju pārveidoja, un tagad dabasgāzi līdzdedzina ar koksnes šķeldu, kuras mitrums svārstās diapazonā no 20 % līdz 60 % [65]. Šajā gadījumā dabasgāzes un slapjas koksnes vienlaicīga dedzināšana nodrošina ātrāku biomasas žāvēšanu un efektīvāku sadegšanu.

1.16. attēlā ir parādīts, kā mainās elektriskā efektivitāte (η_{el}), jauda (W_{el}) un CO₂ emisijas atkarībā no biomasas daļas līdzdedzināšanas procesā. Attēls ilustrē tendenci visiem lielumiem samazināties, palielinoties biomasas daļai. Var redzēt, ka emisiju apjoms krītas straujāk, nekā efektivitāte un jauda. Palielinot biomasas daļu, samazinās elektriskā jauda un efektivitāte, vienlaikus būtiski samazinās CO₂ emisijas.

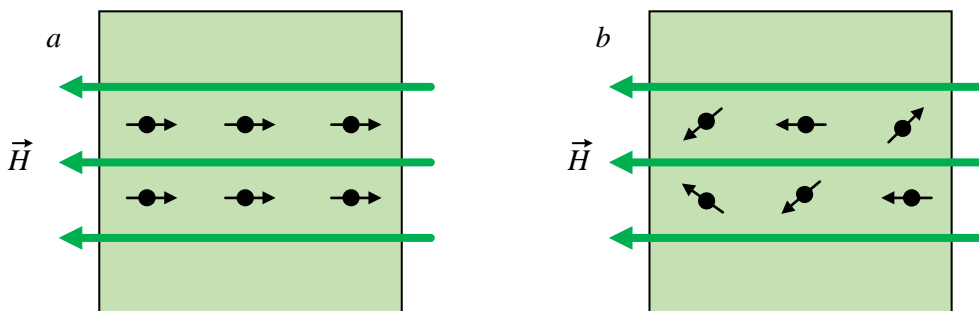


1.16. att. Elektriskās efektivitātes η_{EL} , jaudas W_{EL} un CO₂ īpatnējo emisiju atkarība no biomasas daļas kurināmajā [61]

Lai saglabātu procesu efektivitāti un jaudu līmeni, kas ir bijis pirms biomasas piejaukšanas, vai tuvu šim līmenim, parasti nosaka optimālo biomasas daļu kopējā kurināmā bilancē. Dažādām iekārtām tā atšķiras atkarībā no iekārtas veida, darbināšanas režīma un piejaucamās biomasas [58; 60; 61]. Dažāda tipa elektrostacijās tā var būt no 0 % līdz 20 % putekļveida ogļu kameru kurtuvēs un no 80 % līdz 100 % verdošā slāņa kurtuvēs. Piemēram, Alholmens Kraft koģenerācijas stacija (550 MW_{th}) Somijā cirkulējošā verdošā slāņa kurtuvē dedzina 45 % dažāda veida koksnes atlikumu, 45 % kūdras un 10 % mazuta vai akmeņogļu [58].

1.6.2. Magnētiskā lauka izmantošana biomasas degšanas laikā

Kopš Maikls Faradejs atklāja elektromagnētisko lauku, pētniekiem parādījās liela interese par degšanas procesu kontroli ar ārējo spēku palīdzību – elektriskajiem un magnētiskajiem spēkiem, kas ietekmē liesmas uzvedību [66]. Eksperimentālie pētījumi ir pierādījuši, ka elektriskais spēks F_{el} , kas darbojas uz liesmas pozitīvajiem joniem ar blīvumu n_i un lādiņu eZ_i ($F_{el} = n_i e Z_i E$, kur E – elektriskā lauka intensitāte), nodrošina elektriski uzlabotu liesmas daļiņu masas pārnese lauka virzienā. Šo fenomenu sauc par jonu vēju, kas ierosina liesmas sastāva izmaiņas un reakciju ātrumu ar tiešo ietekmi uz liesmas formu un izmēru, kā arī ietekmē siltumenerģijas ražošanas ātrumu un degšanas efektivitāti [66–69]. Magnētisko lauku ir iespējams izmantot arī degšanas procesa kontrolei. Atkarībā no magnētiskā momenta veidošanās, ievietojot dažādas vielas ārējā magnētiskā laukā, tās var iedalīt trīs grupās: diamagnētiķos, paramagnētiķos un feromagnētiķos [70] (1.17. att.).



1.17. att. Magnētiskā lauka mijiedarbība ar dažāda tipa vielām [70]
a – diamagnētiķi, b – paramagnētiķi

Diamagnētiskām vielām atoma (molekulas) magnētiskais moments (M) ir vienāds ar nulli, relatīvā magnētiskā caurlaidība $\mu_0 < 1$ un magnētiskā uzņēmība $\chi_v < 0$. Ārējā magnētiskajā laukā šiem atomiem rodas magnētiskais moments, kas vienmēr vērsts pretī ārējam laukam (1.17. a att.). Diamagnētiķi ir lielākā daļa vielu: ogļūdeņraža gāzes, daudzi metāli (Mg, Hg, Zn, Cu, Ag, Au) u. c.

Pretēji diamagnētiķiem, paramagnētiķu atomiem vienmēr piemīt magnētiskais moments, relatīvā magnētiskā caurlaidība $\mu_0 > 1$ un magnētiskā uzņēmība $\chi_v > 0$. Ārējais magnētiskais lauks paramagnētiķa atomus pagriež tā, ka to magnētiskie momenti orientējas galvenokārt lauka virzienā (1.17. b att.). Pilnīgu orientāciju kavē atomu termiskā kustība. Kirī likums nosaka, ka paramagnētisko vielu magnētiskā uzņēmība ir atkarīga no temperatūras un tā aprakstāma ar vienādojumu:

$$\chi_v = \frac{C}{T}, \quad (1.16)$$

kur

C – Kirī konstante konkrētām vielām;

T – absolūtā temperatūra [70].

Paramagnētiķi ir O_2 , NO, sārmu un sārmzemju materiāli (Li, Na, K, Ca, Ba) un daži metāli (Al, Pt, Pu).

Ņemot vērā paramagnētisko un diamagnētisko vielu īpašības, magnētiskā lauka gradients var ietekmēt liesmas uzvedību, jo paramagnētiskais skābeklis tiek virzīts magnētiskā lauka spēka palielināšanās virzienā un liesmas diamagnētiskās daļiņas (CO, H₂, O, H, N₂, CO₂, H₂O u. c.) rada magnētiskā lauka vājas pulsācijas, tieši ietekmējot degšanas apstākļus. Ārējā nehomogēnā magnētiskā lauka un liesmas mijiedarbības procesā uz gaisa un kurināmā maisījuma plūsmu iedarbojas magnētiskais spēks, ko nosaka magnētiskā indukcija un tās gradients [71]:

$$F_{mag} = \frac{1}{2} \frac{\chi_v}{\mu_0} B \frac{dB}{dz}, \quad (1.17)$$

kur

χ_v – gāzes daļiņu magnētiskā uzņēmība, m³/kg;

μ_0 – vakuuma magnētiskā caurlaidība, N/m;

B – magnētiskā lauka indukcija, T;

dB/dz – magnētiskais gradients, T/m.

Magnētiskais spēks intensificē paramagnētiskā skābekļa pārnese magnētiskā lauka indukcijas pieauguma virzienā un diamagnētisko ogļūdeņražu pārnese pretējā virzienā. Tas ir tāpēc, ka paramagnētiskā skābekļa magnētiskā uzņēmība ($\chi_v \approx 2 \cdot 10^{-6}$) ir lielāka par diamagnētiķu uzņēmību, kas ir negatīvs lielums ($\chi_v \approx -0,5 \cdot 10^{-8} \dots -0,2 \cdot 10^{-8}$). Turklāt magnētiskā lauka iedarbību uz liesmas dinamiku var novērot, ja magnētiskā spēka lielums ir samērojams ar plūsmas dinamisko spiedienu $f_m \approx \rho v^2$ un atbilst nosacījumam $v_{ax} \leq 0,2$ m/s. Tas nozīmē, ka magnētiskā lauka ietekme uz degšanas procesu var būt novērota pie maziem plūsmas ātrumiem [71].

Daudz teorētisko un eksperimentālu pētījumu par magnētiskā lauka ietekmi uz degšanas procesu tika veikti Japānā, piedāvājot jaunu iespēju degšanas procesa kontrolei [72; 73]. Vakajama [74] ir pētījis metāna difūzijas liesmas magnētiskajā laukā. Pētījuma rezultātā tika ievērots, ka magnētiskā lauka samazināšana gar liesmu izmaina liesmas formu, to pagarinot un izstiepjot, savukārt magnētiskā lauka palielināšana padara liesmu īsāku un plātāku. Šo parādību izskaidro ar paramagnētiskā skābekļa un liesmas diamagnētiķu daļiņu īpašībām. Vakajama [75] ir pētījis arī magnētiskā lauka gradienta ietekmi uz daļēji sajauktām un difūzijas liesmām.

Difūzo liesmu pētījums [76] mikrogravitācijas apstākļos apliecina, ka magnētiskā spēka izraisītā paramagnētiskā skābekļa pārnese lauka virzienā ir analoga pārnesei, kuru nosaka gravitācijas spēki, būtiski mainot difūzās liesmas formu un garumu, kā arī mērķtiecīgi mainot degšanas reakcijas ātrumu un liesmas veidošanos. Liesmas garums samazinās, vertikāli samazinoties magnētiskajam laukam. Magnētiskais lauks palielina gaisa padevi liesmas pamatā un gar liesmas malām, tā samazinot liesmas garumu. Vertikāli palielinoties magnētiskajam laukam, liesma izstiepjjas.

Jamada u. c. [77] veica magnētiskā lauka ietekmes uz OH radikāļiem H₂/O₂ difūzijas liesmā matemātisko modelēšanu, rēķinot gāzes dinamikas un magnētisma vienādojumus. No modelēšanas rezultātiem secināts, ka magnētiskā lauka gradients izraisa OH blīvuma sadalījuma izmaiņas liesmā. Tas ir saistīts ar to, ka skābeklim masas blīvums un magnētiskā uzņēmība ir lielākā liesmas perifēriskajā zonā. Jamada u. c. [78] turpināja savu pētījumu, papildinot to ar eksperimentiem. Izmantojot aksiālo degli, kas novietots starp patstāvīga magnēta poliēm, tika mērīts OH radikāļu

sadalījums. OH radiālā pārvietošana liesmas centrālās ass virzienā, ko izraisīja magnētiskais lauks, sakrita ar modelēšanas rezultātiem.

Beikers u. c. [79] ir pētījuši lamināro difūzijas liesmu magnētiskajā laukā, kas augšupejoši samazinājās. Magnētiskā lauka samazināšana ietekmēja liesmas augstuma samazinājumu, ierobežojot liesmas pievienošanas magnētam, palielināja liesmas intensitāti un plūsmas ātrumu, kurā liesma izdzisa.

Jāatzīmē, ka magnētiskā lauka un liesmas mijiedarbības efekti galvenokārt ir pētīti difūzām liesmām un praktiski nav veikti pētījumi liesmas virpuļplūsmās, kur komponentu sajaukšanās ir būtiski saistīta ar recirkulācijas plūsmu veidošanos degšanas zonā. Pētījumi [80; 81], kas veikti, liesmas virpuļplūsmām mijiedarbojoties ar ārējiem elektriskajiem spēkiem, ir apliecinājuši, ka recirkulācijas plūsmu veidošanos un komponentu sajaukšanos liesmas virpuļplūsmās var kontrolēt, mainot elektriskā lauka potenciālu un intensificējot lādēto daļiņu pārnese lauka virzienā.

1.7. Literatūras apskata kopsavilkums

1. Viens no Eiropas Komisijas un Padomes Direktīvas 2009/28/EK mērķiem ir līdz 2020. gadam panākt 20 % AER īpatsvaru kopējā ES energopatēriņā. Katrai ES dalībvalstij ir uzstādīts individuālais mērķis: Latvija ir uzstādījusi vienu no visaugstākajiem mērķiem – 40 %. Pēc EUROSTAT datubāzes datiem 2011. gadā ES AER īpatsvars kopējā energoresursu patēriņā bija 13 %, un tas katru gadu pieaug. Salīdzinot ar 2004. gada datiem, šis rādītājs ir pieaudzis par 65 %. Savukārt Latvijas AER īpatsvars kopējā energoresursu patēriņā 2011. gadā bija 33,1 %, un tam nav novērota pieauguma tendence, piemēram, 2004. gadā šis rādītājs bija 32,8 %, 2007. gadā – 29,6 %. Maksimālais Latvijas AER īpatsvars, kas bija vērojams no 2004. līdz 2011. gadam, ir 34,2 %.
2. Koksnes biomasu ir plaši pieejams energoresurss, tai ir nepieciešama minimāla apstrāde, un sadedzināšanas tehnoloģijas ir relatīvi vienkāršas. Salīdzinot ar fosilā kurināmā sadedzināšanu, kuras laikā veidojas siltumnīcefekta gāzes, koksnes biomasu ir CO₂ neitrāls kurināmais, jo tiek uzskatīts, ka koksnes biomasu augšanas laikā piesaista tādu pašu CO₂ daudzumu, kāds izdalās produkta sadedzināšanas laikā. Neskatoties uz šādu koksnes biomasu priekšrocību, Latvijā vairāk par 50 % koksnes patērē mājāsaimniecības, bet katlu mājās un koģenerācijas stacijās koksnes biomasu īpatsvars ir 15 %, dodot priekšroku dabasgāzei (ap 80 %).
3. Pasaulē pieaug interese par biomasu un fosilā kurināmā vienlaicīgu sadegšanu jeb līdzdedzināšanu. Aizstājot fosilo kurināmo ar biomasu, ir iespējams sasniegt vairākus mērķus: palielināt AER īpatsvaru kopējā energoresursu patēriņā, samazināt energoatkarību no fosilajiem kurināmajiem, kuru krājumi pārsvarā ir koncentrēti dažādās valstīs un samazināt SEG emisiju izplūdi atmosfērā. Biomasu īpatsvars šādā degšanas procesā atkarībā no izmantotās tehnoloģijas svārstās no 1 līdz 20 %, jo, palielinot biomasu daļu, samazinās elektriskā jauda un efektivitāte. Ņemot vērā, ka Latvijā ir pietiekami liels kurināmās koksnes izmantošanas potenciāls, savukārt tās izmantošana pārveidošanas sektorā ir nepietiekama (tikai 15 %), tāpēc promocijas darba ietvaros ir piedāvāts līdzdedzināt koksnes granulas ar propāna/butāna padevi, ar mērķi izpētīt līdzdedzināšanas ietekmi uz emisiju veidošanos, efektivitāti un saražoto siltumenerģijas daudzumu.

4. Lai ietekmētu degšanas procesu, ir iespējams izmantot magnētisko lauku. Šis fenomens ir saistīts ar to, ka magnētiskais spēks intensificē paramagnētiskā skābekļa pārnesei magnētiskā lauka indukcijas pieauguma virzienā, uzlabojot biomasas gazifikāciju un gaistošo savienojumu veidošanos, kā arī samazinot aksiālo ātrumu, nodrošina ilgāku gaistošo savienojumu uzturēšanos degšanas zonā un to pilnīgāku sadedzināšanu. Apkopojot informāciju par magnētiskā lauka ietekmi, secināts, ka magnētiskā lauka un liesmas mijiedarbības efekti galvenokārt ir pētīti difūzām liesmām un praktiski nav veikti pētījumi liesmas virpuļplūsmās, kur komponentu sajaukšanās ir būtiski saistīta ar recirkulācijas plūsmu veidošanos degšanas zonā. Ņemot vērā šo faktu, promocijas darba ietvaros ir pētīta magnētiskā lauka ietekme uz virpuļplūsmas dinamiku, dedzinot koksnes granulas ar propāna/butāna padevi un bez tās, kā arī magnētiskā lauka ietekme uz emisiju veidošanos, efektivitāti un saražoto siltumenerģijas daudzumu.

2. EKSPERIMENTĀLĀ IEKĀRTA UN MĒRĪŠANAS METODIKA

Promocijas darba ietvaros tika veikti eksperimentālie pētījumi par koksnes biomasas ar dažādu mitruma saturu līdzdedzināšanu ar propāna un butāna maisījumu un par magnētiskā lauka ietekmi uz degšanas procesu. Visi eksperimenti veikti Latvijas Universitātes Fizikas institūta Siltuma un masas pārnesei akreditētā laboratorijā, kur tika izveidota speciāla eksperimentālā iekārta. Eksperimentu laikā tika veikti kompleksi liesmas parametru mērījumi, kas ietver degšanas zonas temperatūras mērījumus dažādās degšanas procesa attīstības stadijās, degšanas produktu sastāva mērījumus (O_2 , H_2 , CO_2 , CO , NO_x), degšanas procesa efektivitātes (η) un gaisa patēriņa koeficienta (α) mērījumus, kā arī lokālos liesmas ātruma mērījumus.

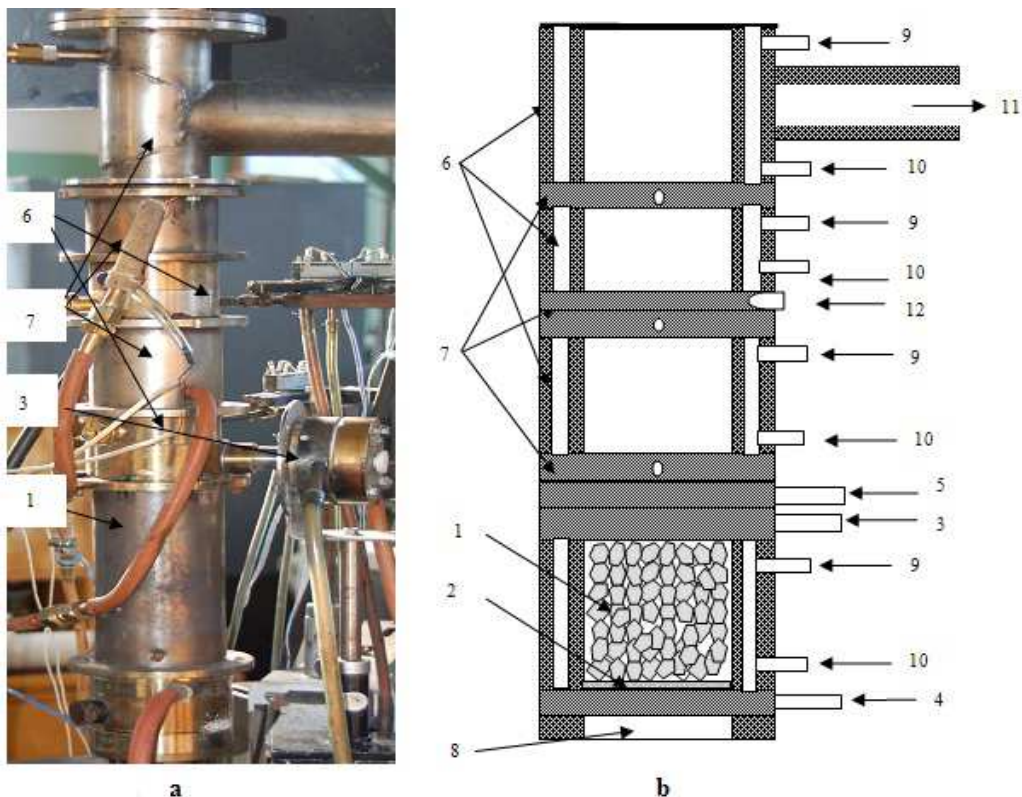
Šajā nodaļā ir aprakstīta eksperimentālā iekārta un katras eksperimentu sērijas (līdzdedzināšanas un magnētiskā lauka izmantošanas) izejvielu raksturojums, kā arī aprakstīta mērīšanas metodika.

2.1. Eksperimentālas iekārtas apraksts

Lai nodrošinātu efektīvākas un tīrākas koksnes granulu sadedzināšanas eksperimentālos pētījumus, līdzdedzinot to ar fosilo gāzes kurināmo un izmantojot magnētisko lauku, Fizikas institūta Siltuma un masas pārnesei laboratorijā speciāli tika izveidota eksperimentālā iekārta, kas paredzēta koksnes biomasas un propāna/butāna kombinētai dedzināšanai. Ņemot vērā, ka promocijas darba ietvaros veiktas divas eksperimentu sērijas, kurās iekārtas konfigurācija atšķiras, tāpēc tās ir aprakstītas atsevišķi 2.1.1. un 2.1.2. apakšnodaļā.

2.1.1. Eksperimentālā iekārta koksnes granulu un propāna/butāna līdzdedzināšanai

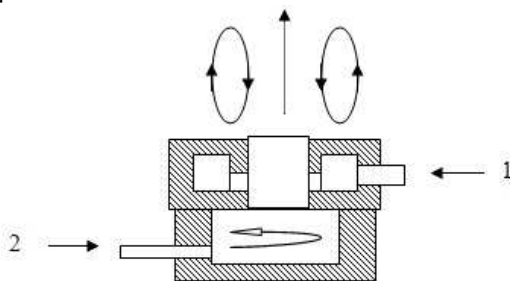
Eksperimentālās iekārtas fotogrāfija un shēma ir redzamas 2.1. attēlā. Iekārtas galvenās sastāvdaļas ir koksnes biomasas gazifikators (1), kurā var ievietot koksnes granulas ar maksimālo svaru 500 g, propāna/butāna/gaisa deglis (3), kā arī dzesējamā kanāla sekcijas (6), kurās notiek gaistošo savienojumu veidošanās, uzliesmošana un sadegšana. Šis kanāls ir veidots no 3 dzesējamajām sekcijām ar dzesējoša ūdens pievadi (9) un izvadi (10). Koksnes gazifikācijas nodrošināšanai un pilnīgai gaistošo vielu sadegšanai gazifikatora pamatnē (4) un tā augšējā daļā (5), virs koksnes biomasas 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.



2.1. att. Eksperimentālās iekārtas fotogrāfija (a) un shēma (b)

1 – koknes biomasas gazifikators; 2 – tērauda siets; 3 – propāna/ butāna/gaisa deglis; 4 – primārā gaisa padeve; 5 – sekundārā gaisa padeve; 6 – dzesējamā kanāla sekcijas; 7 – atveres diagnostikas zondēm; 8 – pelnu savākšanas tvertne; 9 – dzesējošā ūdens pievade; 10 – dzesējošā ūdens izvade; 11 – atvere dūmgāzu sastāva diagnostikai; 12 – atvere liesmas starojuma mērīšanai

Propāna/butāna/gaisa liesma veidojas, sajaucoties radiālajai propāna/butāna plūsmai un tangenciālajai gaisa plūsmai degļa kanālā, kura diametrs ir 20 mm (2.2. att.). Propāna/butāna maisījumu ievada degļa kanālā caur sešām radiālām atverēm (katras atveres diametrs ir 0,3 mm), kas atrodas kanāla sienā. Tangenciālā gaisa plūsma veidojas, ievadot gaisu caur astoņām tangenciālām atverēm degļa pamatnē, kuru diametrs ir 3 mm [82].

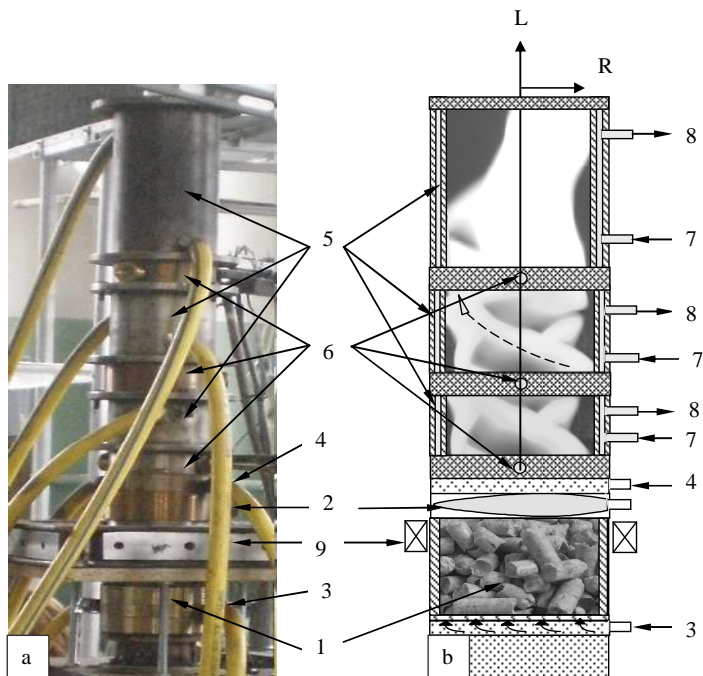


2.2. att. Propāna/butāna/gaisa degļa shematiskais zīmējums
1 – radiālā propāna, butāna padeve; 2 – tangenciālā gaisa padeve

Eksperimentālās iekārtas kopējais garums (L) ir 1600 mm. Gazifikatora augstums ir 240 mm, un tā diametrs ir 60 mm, bet izmantoto trīs dzesējamo sekciju kopējais garums ir 500 mm (100 mm, 75 mm un 325 mm).

2.1.2. Eksperimentālā iekārta ar pastāvīgo magnētu

Eksperimentālā pētījuma par magnētiskā lauka ietekmi uz degšanas procesu nodrošināšanai tika izmantota speciāli izveidota iekārta, kuras fotogrāfija un shēma ir redzamas 2.3. attēlā.



2.3. att. Eksperimentālās iekārtas fotogrāfija (a) un skice (b)

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

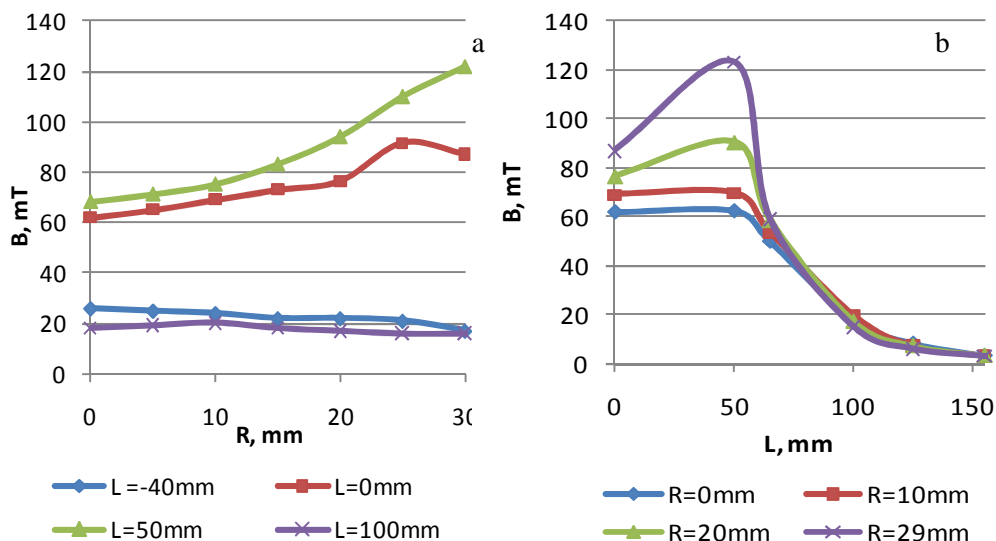
Līdzīgi iekārtai, kur tika pētīta koksnes granulu līdzdedzināšana ar propāna/butāna maisījumu, šī eksperimentālā iekārta, kas nodrošina eksperimentālo pētījumu par magnētiskā lauka ietekmi uz degšanas procesu, sastāv no koksnes biomasas gazifikatora (1), primārā gaisa padeves (3) – zem koksnes granulu slāņa, sekundārā gaisa padeves (4) – virs propāna/gaisa degļa (2) un dzesējamā kanāla sekcijām (5). Degšanas kameras diametrs ir 60 mm, bet kopējais garums ir 700 mm. Diagnostikas zonžu atveres ir paredzētas temperatūras, emisiju sastāva un ātruma mērījumiem.

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 pārnesei virzienā uz granulu slāņa virsmu, nodrošinot pilnīgāku gaistošo savienojumu un gaisa sajaukšanos degšanas procesa sākuma stadijā. Eksperimentos izmantotais magnēts ir parādīts 2.4. attēlā.



2.4. att. Eksperimentos izmantotais pastāvīgais magnēts

2.5. attēlā ir parādīts magnētiskā lauka indukcijas radiālais un aksiālais sadalījums kanālā, kas nodrošina skābekļa pārneši aksiālajā un radiālajā virzienā. 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 [83].



2.5. att. Magnētiskā lauka indukcijas radiālais (a) un aksiālais (b) sadalījums
L – attālums no poliem, R – sadegšanas kameras rādiuss

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. Magnētiskā lauka indukcijas sadalījums kanālā tika mērīts ar teslametru.

Magnētiskā lauka ietekmes pētījumi tika veikti, gan dedzinot tikai koksnes granulas bez propāna/butāna padeves, gan līdzdedzināšanas gadījumam.

2.2. Izejvielu raksturojošie parametri

Visos eksperimentos koksnes granulas tika dedzinātas vienlaicīgi ar propāna/butāna maisījumu un bez tās.

2.2.1. Koksnes granulas

Izmantoto koksnes granulu diametrs ir 7,5 mm, bet to garums mainās no 5 līdz 20 mm. Granulas ir izgatavotas no sausas koksnes (zāģskaidas un frēzskaidas). Tās ir presētas bez papildu saistvielām. 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 %. 2.1 tabulā ir parādīts, kā mitruma saturs koksnes biomasā ietekmē tās darba sastāvu un zemāko sadegšanas siltumu.

2.1 tabula

Koksnes biomasas darba masas sastāvs un zemākais sadegšanas siltums atkarībā no mitruma satura

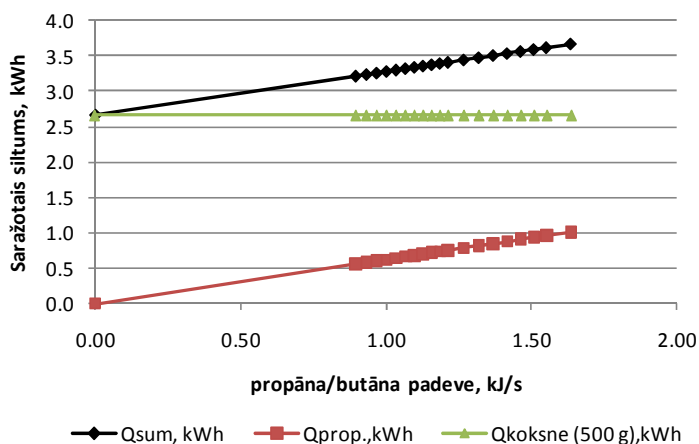
	W = 8 %	W = 15 %	W = 20 %	W = 25 %
C ^d , kg	46,45	42,92	40,39	37,87
H ^d , kg	5,56	5,13	4,83	4,53
O ^d , kg	38,53	35,6	33,5	31,41
N ^d , kg	0,55	0,5	0,48	0,45
A ^d , kg	0,92	0,85	0,8	0,75
Q ^d _z , MJ/kg	17,32	15,99	15,05	14,11

Eksperimentos tika dedzināts diskrēts koksnes granulu daudzums: līdzdedzināšanas eksperimentos tika dedzināti 500 g, bet eksperimentos, kur tika izmantots patstāvīgais magnēts, – 320 g.

2.2.2. Propāna/butāna maisījums

Eksperimentu laikā tika dedzināts propāna/butāna maisījums, kas iekārtā tika padots kopā ar gaisu.

Gāzes kurināmā siltumspēja ir 108,46 MJ/m³. Eksperimentu laikā propāna/butāna maisījuma padeve tika mainīta robežās no 0 līdz 1,55 kJ/s.



2.6. att. Saražotā siltuma daudzuma izmaiņas kombinētā degšanas procesā atkarībā no propāna/butāna padeves

Kopējais saražotais siltuma daudzums eksperimenta laikā bija atkarīgs no propāna/butāna padeves (2.6. att.). Eksperimentos izmantotās maksimālās propāna/butāna padeves (1,55 kJ/s) gadījumā kombinētā degšanas procesā kopējais saražotais siltuma daudzums bija 3,62 kWh.

2.2.3. Gaisa padeve

Pilnīgai koksnes granulu un gāzes sadedzināšanai ir jānodrošina pietiekama gaisa padeve gazifikatorā. Gaisa padeve iekārtā tika sadalīta trīs plūsmās, nodrošinot:

- gaisa padevi propāna/butāna deglī;
- primārā gaisa padevi gazifikatora pamatnē;
- sekundārā gaisa padevi virs granulu slāņa.

Eksperimentālajā iekārtā gāzes un gaisa patēriņš tika kontrolēts, izmantojot iepriekš graduētus difmanometrus. Lai aprēķinātu propāna/butāna un gaisa patēriņu, izmantojot difmanometru rādījumus mm (ΔH), tika izmantotas formulas, kas iegūtas difmanometru graduēšanas procesā:

$$Q_{prop.} = 0,064\sqrt{\Delta H} \text{ (l/min)} \quad (2.1)$$

$$Q_{gais- prop.} = 0,54\sqrt{\Delta H} \text{ (l/min)}, \quad (2.2)$$

kur

ΔH – ūdens stabiņa augstums (mm) atbilstošajā difmanometrā [82].

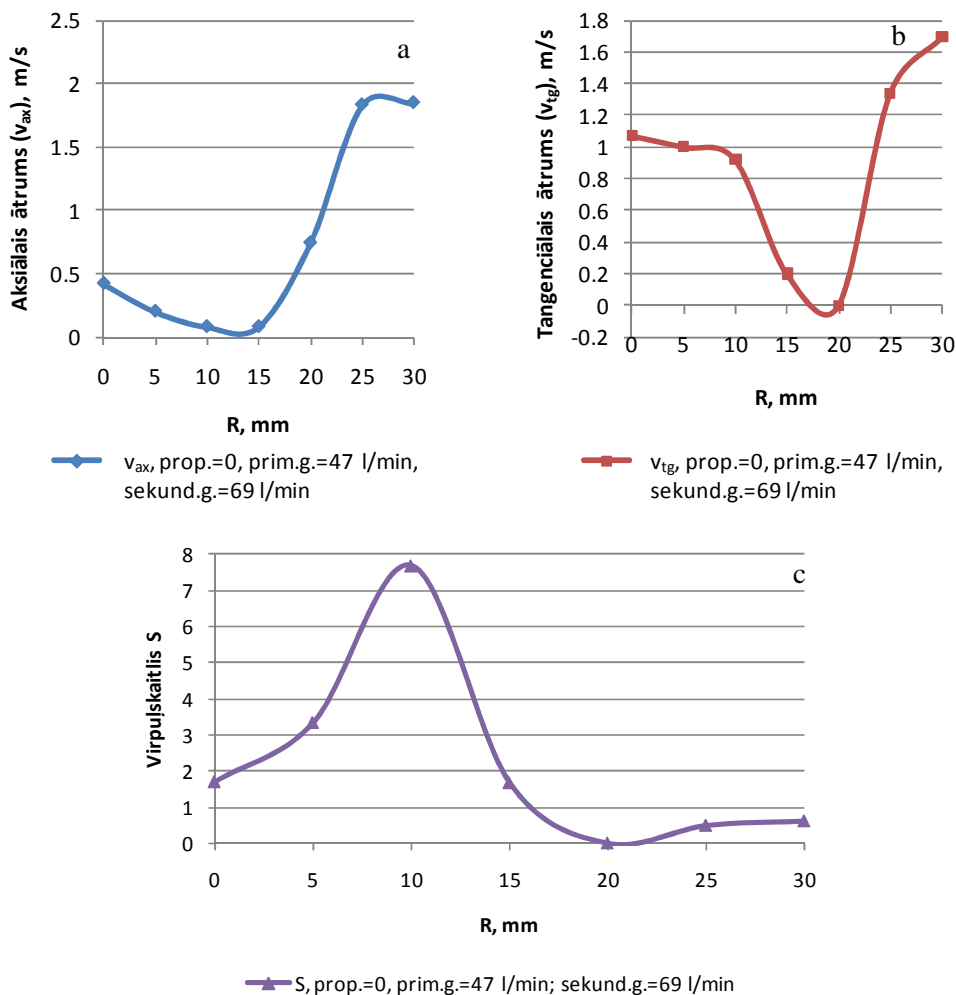
Primārā un sekundārā gaisa padeve gazifikatorā tika regulēta un kontrolēta ar caurteces ventiļu un rotametra palīdzību. Lai aprēķinātu gaisa padevi l/min, izmantojot rotametra iedaļu rādījumus, tika veikta rotametra graduēšana, pēc kuras tika iegūta formula:

$$y = 0,809x + 22,58, \quad (2.3)$$

kur

x – rotametra iedaļu rādījumi.

Primārā gaisa padeve eksperimentos bija 47 l/min. Tas tika padots zem granulu slāņa un ir domāts koksnes granulu gazifikācijas ierosināšanai. Sekundārā gaisa padeve bija 69 l/min un 71 l/min attiecīgi līdzdedzināšanā un izmantojot magnētisko lauku. Sekundāro gaisu padeva virs koksnes granulu slāņa un propāna/butāna padeves degļa, lai nodrošinātu pilnīgu gaistošo vielu sadegšanu. Sekundāro gaisu padeva tangenciāli caur divām atverēm, kuru diametrs ir 5 mm, tā nodrošinot virpuļplūsmas veidošanos, kas būtiski ietekmē gaistošo savienojumu sajaukšanos ar gaisa virpuļplūsmu, kā arī liesmas formu, izmēru, stabilitāti un degšanas procesa intensitāti [35]. Pie šādas sekundārā gaisa padeves virpuļskaitlis S , kas ir aprēķināms pēc formulas (1.12) (1.4 apakšnodaļā „Gaisa padeve”), degšanas procesa laikā bija lielāks par 0,6 vērtību, veidojot izteiktu recirkulācijas zonu liesmas centrālajā daļā – $R < 20$ mm. (2.7. att.).



2.7. att. Aksijlais (a), tangenciālais (b) ātrums virs koksnes granulu slāņa un virpuļskaitlis (c) pie dotajām gaisa padevēm

Teorētiski nepieciešamais gaisa patēriņš koksnes biomasas stehiometriskai sadedzināšanai ($\alpha = 1$) tika novērtēts, izmantojot formulu:

$$V^0 = 0,0889C^d + 0,265H^d - 0,033O^d, \quad (2.4)$$

kur

C^d – oglekļa saturs darba masā;

H^d – ūdeņraža saturs darba masā;

O^d – skābekļa saturs darba masā [24].

2.2 tabulā ir apkopoti aprēķinu rezultāti par teorētisko gaisa tilpumu, kas nepieciešams koksnes pilnīgai sadegšanai, ņemot vērā koksnes granulu dažādo mitruma saturu.

2.2 tabula

Teorētiskais gaisa tilpums V^0 pilnīgai koksnes granulu sadedzināšanai ($\alpha = 1$)

Koksnes biomasas mitrums	0 %	8 %	15 %	20 %	25 %
$V^0, \text{m}^3/\text{kg}$	4,69	4,32	3,99	3,76	3,52

No 2.2 tabulas datiem ir redzams, ka absolūti sausai koksnei teorētiski nepieciešamais ($\alpha = 1$) gaisa patēriņš pilnīgai sadegšanai ir $4,69 \text{ m}^3/\text{kg}$. Šis rādītājs samazinās, palielinoties mitruma saturam koksnē. Tomēr pilnīgai koksnes granulu sadedzināšanai ir jānodrošina gaisa padeves pārsvars gazifikatorā. Tas nozīmē, ka gaisa patēriņa koeficientam (α) ir jābūt lielākam par 1. Gaisa patēriņa koeficientu aprēķina, attiecinot faktisko gaisa tilpumu V_g pret teorētiski nepieciešamo:

$$\alpha = \frac{V_g}{V^0} \quad (2.5)$$

Kā jau iepriekš minēts, propāna/butāna maisījums iekārtā tika padots kopā ar gaisu, kura daudzums tika noregulēts tā, lai nodrošinātu stehiometriskos apstākļus ($\alpha = 1$). Teorētiskais gaisa tilpums gāzes kurināmā pilnīgai sadedzināšanai ($\alpha = 1$) aprēķināms pēc formulas:

$$V^0 = 0,0476 \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n \quad (2.6)$$

Eksperimentu laikā propāna (C_3H_8) daļa gāzes maisījumā bija 50 % un butāna (C_4H_{10}) daļa arī 50 %. Pēc (2.6) formulas tika aprēķināts, ka, ja $\alpha = 1$, pilnīgai gāzes sadedzināšanai ir nepieciešami $27,37 \text{ m}^3/\text{m}^3$ gaisa. Kā redzams no iegūtajiem rezultātiem, gāzes maisījuma sadedzināšanai ir neieciešams aptuveni 7 reizes vairāk gaisa, salīdzinot ar absolūti sausas koksnes sadedzināšanu.

2.3 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

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

2.3. Mērījumu instrumenti

Eksperimentu laikā tika veikti lokālie temperatūras, degšanas produktu sastāva un efektivitātes mērījumi, kā arī liesmas dinamisko ātrumu mērījumi. Speciāli šim nolūkam iekārtā bija paredzētas trīs diagnostikas atveres (2.1., 2.3. att.), kuru izvietojumu bija iespējams mainīt atkarībā no eksperimenta mērķa un uzdevuma.



2.8. att. Izmantojamie mērinstrumenti
a – Pt/Pt-Rh termopāri; b – analizators TESTO 350-M/XL, 454

Lokālie liesmas temperatūras mērījumi tika veikti, izmantojot Pt/Pt-Rh (10 %) termopārus (2.8. a att.), kas nodrošina temperatūras mērījumus līdz 1600–1700 K. Termopāri tika izveidoti, izmantojot Pt un Pt-Rh % stieples, kuru diametrs ir 0,2 mm. Termopāru stieples tika ievietotas divkanālu fajansa caurulītē, kas nodrošina šo stiepli savstarpējo izolāciju. Stieplu gali tika savienoti, veidojot punktveida kontaktmetinājumu, ko izmanto temperatūras mērījumiem. Termopāri tika ievadīti degšanas zonā caur atverēm diagnostikas sekcijās. Ar mikrometra palīdzību termopārus bija iespējams pārvietot pa liesmas rādiusu, nodrošinot lokālos temperatūras mērījumus dažādās degšanas zonās.

Degšanas produktu temperatūra, sastāvs un degšanas procesa efektivitāte tika mērīti ar gāzes analizatoru TESTO 350-XL (2.8. b att.), un datu apstrādei tika izmantota datorprogramma TESTO 350-M/XL. Degšanas procesa kontrolei tika mērīti O₂, CO₂ (%), CO, NO, NO₂, NO_x (ppm), gaisa patēriņa koeficients (%), kā arī degšanas procesa efektivitāte (%).

Liesmas dinamiskā ātruma mērījumi (tangenciālā un aksiālā ātruma mērījumi) tika veikti ar Pito caurulīti, izmantojot TESTO 454 programmatūru.

2.4. Mērīšanas metodika

Eksperimentālo mērījumu datu apstrādei tika izmantota datu savākšanas un apstrādes plate ar datorprogrammu PC-20. Ar šīs plates palīdzību tika reģistrēti un apstrādāti lokālo liesmas temperatūru un ūdens temperatūras mērījumu rezultāti dzesējamajās kanāla sekcijās.

Vienlaicīgai mērīšanas rezultātu reģistrēšanai iespējams izmantot 13 kanālus:

- datu apstrādes plates 1. kanāls tika izmantots liesmas spektrālā starojuma mērījumiem redzamā un ultravioletā spektra rajonā (200–600 nm). Eksperimentu laikā liesmas starojums netika mērīts;

- datu apstrādes 2. un 3. kanāls tika izmantots lokāliem liesmas temperatūras mērījumiem. Signāls no Pt/Pt-Rh (10 %) termopāriem tika padots uz analogiem pastiprinātājiem F-8025C, no kuriem pārveidotais signāls voltos (V) tālāk tika padots uz datu apstrādes plati. Precīziem temperatūras mērījumiem liesmā termopāri tika graduēti, izmantojot fiksētas temperatūras – kūstošā ledus temperatūru 0 °C un vārošā ūdens temperatūru 100 °C. Graduēšanas rezultātā tika fiksēti signāli (V), kas atbilst termopāra signāla lielumam milivoltos (mV) pie 0 °C un 100 °C. Līdz ar to graduēšanas rezultātā bija iegūtas formulas, kas raksturo konkrētā termopāra fiksētā mērījuma pāreju no mērījumiem V uz mV. Tālākai pārejai no signāla mērījumiem mV uz liesmas temperatūras aprēķiniem (K) tika izmantotas standarta termopāru graduēšanas līknes $T(K) = f(T(mV))$ [82];
- datu apstrādes 4., 5., 7. un 8. kanāls tika izmantots termopāru koordināšu fiksācijai liesmā;
- datu apstrādes 9.–12. kanāls tika izmantots dzesējamā ūdens temperatūras mērījumiem, izmantojot signālu, kas tika fiksēts ar termosensoriem;
- datu apstrādes 13. kanāls tika izmantots integrālā liesmas starojuma mērījumiem, izmantojot fotodiodes. Signāls no fotodiodes ar analogā pastiprinātāja palīdzību tika pārveidots voltos, kas tālāk tika reģistrēts, izmantojot datu apstrādes plati [82].

2.5. Eksperimentālo pētījumu apraksts

Eksperimentālo pētījuma laikā LU Fizikas institūtā tika veikts liels eksperimentu skaits, kuru laikā tika izpētītas 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 kinētiskie mērījumi ($T = f(t)$), degšanas produktu temperatūras un sastāva (O_2 , CO_2 , CO , NO_x) kinētiskie un lokālie mērījumi, kā arī liesmas tangenciālā un aksiālā ātruma radiālā sadalījuma mērījumi dažādās degšanas procesa attīstības stadijās. Tika veikti arī saražotā siltuma daudzuma mērījumi dzesējamajās sekcijās, novērtējot arī kopējā saražotā siltuma daudzumu dažādās degšanas procesa attīstības stadijās.

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.

2.4 tabula

Mērinstrumentu izvietoējums virs propāna/butāna/gaisa degļa

	Līdzdedzināšana	Magnētiskais lauks
Pirmais termopāris	157 mm	55 mm
Otrais termopāris	187 mm	380 mm
Dūmgāzu analizators, Pito caurulīte	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, kas veidojās laika posmā no 500. līdz 1600. sekundei. 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. Koksnes granulu slānī ievadītā gāzes liesma nodrošināja granulu sasilšanu un termisko sadalīšanos, ierosinot gaistošo savienojumu (C_xH_y un CO) uzliesmošanu un pilnīgu sadedzināšanu.

3. 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.

3.1. Datorprogrammas PC-20 datu apstrāde

Lokālo liesmas temperatūru mērījumi ar termopāriem Pt/Pt-Rh (10 %) uz datu apstrādes plates tika fiksēti voltos (V). Pārejai no V uz mV tika izmantoti vienādojumi, kurus ieguva termopāru graduēšanas procesā:

$$\begin{aligned}t_1(mV) &= 2,2365V_1 + 0,1883 \\t_2(mV) &= 2,2603V_2 + 0,102\end{aligned}\quad (3.1)$$

Tālākai pārejai no temperatūras mērījumiem mV uz kelviniem (K) tika izmantotas Pt-Pt/Rh% termopāru standarta graduēšanas tabulas, iegūstot formulu temperatūras aprēķiniem:

$$T(K) = -1,448x^2 + 117,16x + 273, \quad (3.2)$$

kur

x – temperatūra, mV.

Arī dzesējošā ūdens temperatūras izmaiņas tika reģistrētas, izmantojot datu apstrādes plati, ar signāliem (V), kas tika iegūti no dzesējošā ūdens plūsmā ievietotiem termosensoriem. Siltuma plūsma no katras dzesējamā kanāla sekcijas tika aprēķināta šādi:

$$q = c_i \times m \times \Delta t, \quad (3.3)$$

kur

c_i – ūdens īpatnējā siltumietilpība, J/(kg·°C);

m – ūdens masas caurplūde, kg/sek.;

Δt – ūdens temperatūras izmaiņas, °C.

Pirms eksperimenta sākuma tika izmērīts katra dzesējamā kanāla ūdens patēriņš (l/s), kas tālāk tika izmantots saražotā siltuma daudzuma mērījumiem katrā sekcijā. Kopējais saražotā siltuma daudzums degšanas procesā tika aprēķināts, summējot saražotā siltuma daudzumu sekcijās.

Dati uz datu apstrādes plates tika reģistrēti katru sekundi. Apstrādājot temperatūras (K) un siltuma jaudas (J/s) mērījumus kanālā dažādās degšanas procesa attīstības stadijās, ik pēc 30 sekundēm tika aprēķināti šo parametru vidējie lielumi.

3.2. Gāzes analizatora datu apstrāde

Gāzes analizators TESTO 350-XL mēra šādus parametrus: O₂, CO, NO_x. Pārējos parametrus – CO₂, efektivitāti un gaisa patēriņa koeficientu – gāzes analizators aprēķina atkarībā no eksperimentos izmantotā kurināmā. Šo parametru aprēķinam tika izmantotas šādas formulas:

$$CO_2 = CO_{2\max} \cdot \frac{21 - O_2}{21}, \quad (3.4)$$

kur

$CO_{2\max}$ ir atkarīgs no kurināmā veida (aprēķins ir parādīts 3.3. apakšnodaļā).

$$zudumi = \left(\frac{A}{21 - O_2} + B \right) \cdot (T_{dg} - T_a) + C, \quad (3.5)$$

kur

A, B, C – kurināmā specifiskie faktori (tabulas dati). Koksnei: A = 0,6175, B = 0,0025, C = 8,14;

T_{dg} – dūmgāzes temperatūra (°C), ko mēra gāzes analizators;

T_a – apkārtējās vides temperatūra [84].

Efektivitāti aprēķina, ņemot vērā zudumus:

$$\eta = 100 - zudumi \quad (3.6)$$

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 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 °C, spiediens 1013 mba). Lai salīdzinātu dažādos eksperimentos iegūtos datus, tika veikts mērīto emisiju pārrēķins uz atsaucis apstākļiem – izmantojot skābekļa saturu dūmgāzēs atsaucis 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:

$$CO(mg / nm^3) = CO(ppm) \times 1,25 \times \left[\frac{21 - O_{2ref.}}{(21 - O_{2mer.})} \right] \quad (3.7)$$

$$NO_x(mg / nm^3) = NO_x(ppm) \times 2,05 \times \left[\frac{21 - O_{2ref.}}{(21 - O_{2mer.})} \right] \quad (3.8)$$

3.3. 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:

$$CO_{2\max} = \frac{21}{1 + \beta} \quad (3.9)$$

$$\beta = 2.37 \frac{H^d - 0,125O^d}{C^d + 0,375S^d}, \quad (3.10)$$

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.

Eksperimentu laikā tika dedzinātas koksnes granulas ar dažādu mitruma saturu: 8 %, 15 %, 20 % un 25 %. Ņemot vērā formulas (3.9–3.10) un koksnes granulu degošās masas sastāvu, tika aprēķinātas maksimālās CO_2 emisijas dažādam koksnes granulu mitruma saturam. Šie dati ir apkopoti 3.1 tabulā.

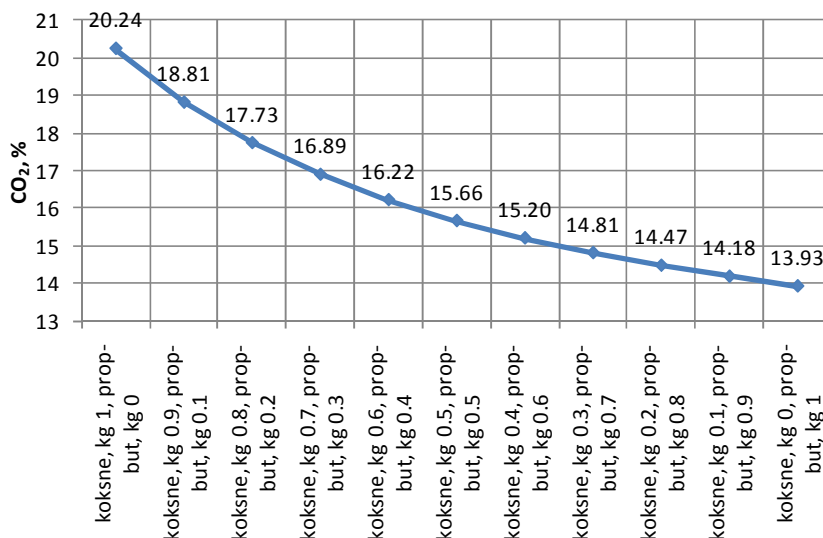
3.1 tabula

Koksnes biomasas maksimālās CO_2 emisijas

	W = 8 %	W = 15 %	W = 20 %	W = 25 %
C^d , kg	46,45	42,92	40,39	37,87
H^d , kg	5,56	5,13	4,83	4,53
O^d , kg	38,53	35,6	33,5	31,41
β	0,0378	0,0378	0,0378	0,0378
CO_{2max}	20,24	20,24	20,24	20,24

Kā redzams 3.1 tabulā, dedzinot 1 kg koksnes granulu, maksimālais CO_2 daudzums ir 20,24 % neatkarīgi no mitruma satura.

Eksperimentos koksnes granulas tika dedzinātas ar propāna (C_3H_8) un butāna (C_4H_{10}) maisījumu. Dedzinot tikai gāzes kurināmo (1 kg), maksimālais CO_2 emisiju apjoms ir 13,93 %. Ņemot vērā, ka eksperimentos koksnes granulas tika dedzinātas vienlaicīgi ar propāna/butāna maisījumu, mainot to padevi, tāpēc tika aprēķināts, kā mainīsies maksimālais CO_2 emisiju daudzums atkarībā no divu kurināmo attiecības. Rezultāts ir parādīts 3.1. attēlā.



3.1. att. Maksimālais CO_2 emisiju daudzums, dedzinot koksnes granulas un propāna/butāna maisījumu

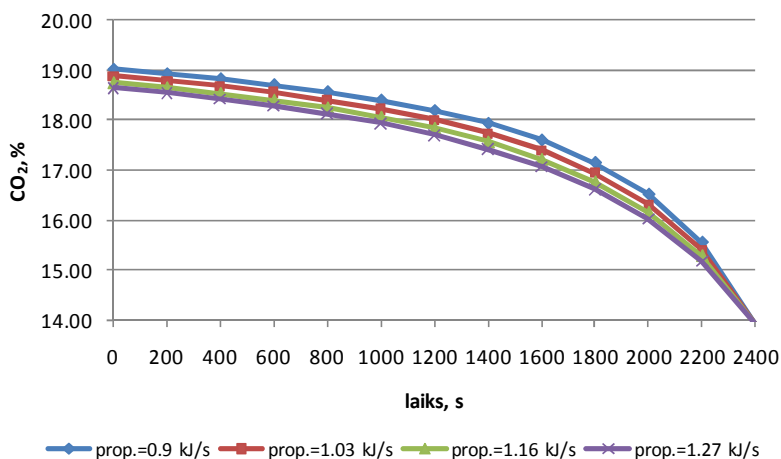
Kā jau iepriekš minēts, eksperimentu laikā tika dedzināts diskrets koksnes granulu daudzums (500 g vai 320 g atkarībā no eksperimenta), kas tika iebērts eksperimenta sākumā, un vairs netika papildināts. Degšanas laikā, samazinoties koksnes granulu daudzumam, samazinājās arī oglekļa, skābekļa un ūdeņraža daudzums, tāpēc samazinājās arī maksimālais CO₂ emisiju daudzums. Tajā pašā laikā propāna/butāna maisījuma padeve eksperimenta laikā palika nemainīga, tāpēc maksimālais CO₂ emisiju daudzums propāna/butāna maisījumam palika nemainīgs (3.2 tabula).

3.2 tabula
Maksimālais CO₂ emisiju daudzums dažādos posmos, dedzinot koksnes granulas (500 g) ar propāna/butāna padevi (prop. = 0,9 kJ/s)

	0 s	1000 s	2000 s	2400 s
C koksne, kg	0,2272	0,1325	0,0379	0,0
C gāze, kg	0,0375	0,0375	0,0375	0,0375
C kopā, kg	0,2647	0,17	0,0753	0,0375
H koksne, kg	0,0272	0,0159	0,0045	0,0
H gāze, kg	0,008	0,008	0,008	0,008
H kopā, kg	0,0352	0,0239	0,0126	0,008
O ₂ koksne	0,1884	0,1099	0,0314	0,0
Koksnes granulu masa, kg	0,500	0,292	0,046	0,0
Gāzes masa, kg	0,0455	0,0455	0,0455	0,0455
β	0,1043	0,1414	0,2716	0,5079
CO_{2max}	19,02	18,3987	16,5147	13,93

3.2 tabulā ir apkopoti aprēķina rezultāti, kas parāda, kā mainās maksimālais CO₂ emisiju daudzums dažādos eksperimenta posmos, dedzinot 500 g koksnes granulu ar propāna/butāna padevi 0,9 kJ/s. Koksnes granulu izmaiņas tika aprēķinātas, izmantojot lineāro vienādojumu, pieņemot, ka 500 g sadeg vidēji 40 minūšu laikā:

$$y = 0,5 - 0,000208x \quad (3.11)$$



3.2. att. Maksimālā CO₂ emisiju daudzuma izmaiņas atkarībā no laika un propāna/butāna padeves

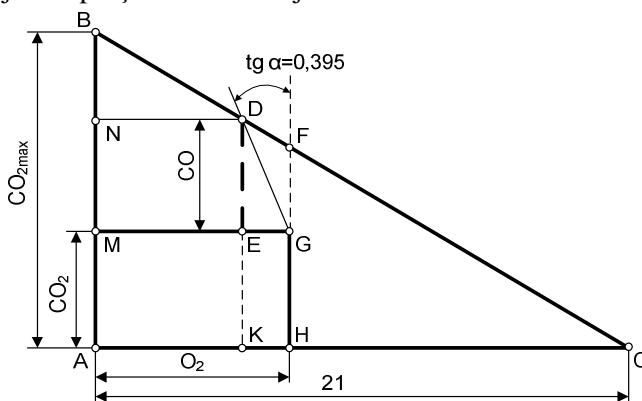
3.2. attēlā ir apkopoti rezultāti, kas parāda, kā mainās maksimālais CO₂ emisiju daudzums eksperimentu laikā pie dažādām propāna/butāna padevēm.

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 CO₂ emisiju daudzums neatkarīgi no gāzes maisījuma padeves (kJ/s) sasniedza 13,93 %.

3.4. Degšanas kontroles diagrammas izmantošana

Karjakina diagrammu jeb degšanas kontroles diagrammu lieto ķīmiski nepilnīgas sadegšanas analīzei. Karjakina diagrammu zīmē kā vienkāršu taisnleņķa trīsstūri, kura viena katete ir katram kurināmajam raksturīgais maksimālais CO₂ saturs, bet otra katete tajā pašā mērogā – divdesmit vienība – maksimālais O₂ saturs (3.3. att.). Ar Karjakina kontroles diagrammu ir iespējams pārbaudīt divus būtiskus aspektus:

1. vai eksperimentos iegūtie dati ir korekti: ja nomērītās CO₂ emisijas atradīsies virs taisnās līnijas (nogrieznis BC), tas nozīmēs, ka ir kļūda eksperimentos, jo veidojas vairāk CO₂ emisiju, nekā maksimāli ir iespējams;
2. ja CO₂ emisiju iegūtie rezultāti atradīsies zem taisnās līnijas, tas nozīmēs, ka kurināmais sadeg ķīmiski nepilnīgi un, izmantojot Karjakina diagrammu, ir iespējams aprēķināt CO emisijas.



3.3. att. Karjakina diagramma ķīmiski nepilnīgai sadegšanai

Diagramma saista O₂ saturu sausajās dūmgāzēs (nogrieznis AH = MG), CO₂ saturu sausajās dūmgāzēs (nogrieznis AM = HG) un CO saturu sausajās dūmgāzēs (nogrieznis DE). Karjakina diagramma ļauj noteikt vienu no trijiem lielumiem – CO₂, O₂ un CO, ja doti divi pārējie.

Ja dots CO₂ un O₂ saturs dūmgāzēs, ir iespējams aprēķināt CO emisijas (nogrieznis DE). Nogriezni DE iegūst, atliekot no punkta G nogriezni GD, kurš ar taisni FH veido leņķi DGF = α tā, ka $\text{tg} \alpha = 0,395$. No līdzīgiem trīsstūriem NBD un ABC iegūst:

$$\frac{NB}{AB} = \frac{ND}{AC} \text{ jeb } \frac{NB}{CO_{2\max}} = \frac{ND}{21} \Rightarrow NB = \frac{ND \cdot CO_{2\max}}{21} \quad (3.12)$$

$$ND = AH - EG = O_2 - DEtg\alpha = O_2 - COtg\alpha \quad (3.13)$$

Ieliekot (3.13) vienādojumu (3.12) vienādojumā, iegūst:

$$NB = \frac{(O_2 - COtg\alpha) \cdot CO_{2\max}}{21} \quad (3.14)$$

No otras puses:

$$AB = AM + MN + NB \Rightarrow CO_{2\max} = CO_2 + CO + \frac{(O_2 - COtg\alpha)CO_{2\max}}{21} \quad (3.15)$$

No šī vienādojuma iegūst izteiksmi CO aprēķināšanai:

$$CO = \frac{CO_{2\max}(21 - O_2) - 21CO_2}{21 - CO_{2\max}tg\alpha} \quad (3.16)$$

Ja dots O_2 (nogrieznis AH) un CO (nogrieznis ED) saturs dūmgāzēs, tad CO_2 saturs dūmgāzēs (nogrieznis GH) iegūstams šādi – no trīsstūriem ABC un KDC iegūst:

$$\frac{AB}{AC} = \frac{KD}{KC} \text{ jeb } \frac{CO_{2\max}}{21} = \frac{KE + CO}{KC} = \frac{KE + CO}{KH + HC} = \frac{KE + CO}{KH + (21 - O_2)} \quad (3.17)$$

Nogrieznis $KH = EG = EDtg\alpha = COtg\alpha$, jo leņķi DGF un GDE ir vienādi. Tad nogrieznis KE, kas reprezentē CO_2 saturu dūmgāzēs, ir vienāds:

$$CO_2 = \frac{CO_{2\max}}{21} (COtg\alpha + 21 - O_2) - CO \quad (3.18)$$

Ja dots CO_2 (nogrieznis AM = HG) un CO (nogrieznis DE) saturs dūmgāzēs, tad O_2 saturs dūmgāzēs (nogrieznis AH) iegūstams šādi – no trīsstūriem ABC un KDC iegūst:

$$\frac{AB}{AC} = \frac{KD}{KC} \Rightarrow KC = \frac{AC \cdot KD}{AB} = \frac{21(CO_2 + CO)}{CO_{2\max}} \quad (3.19)$$

$$AH = O_2 = AC - HC = AC - (KC - KH) \quad (3.20)$$

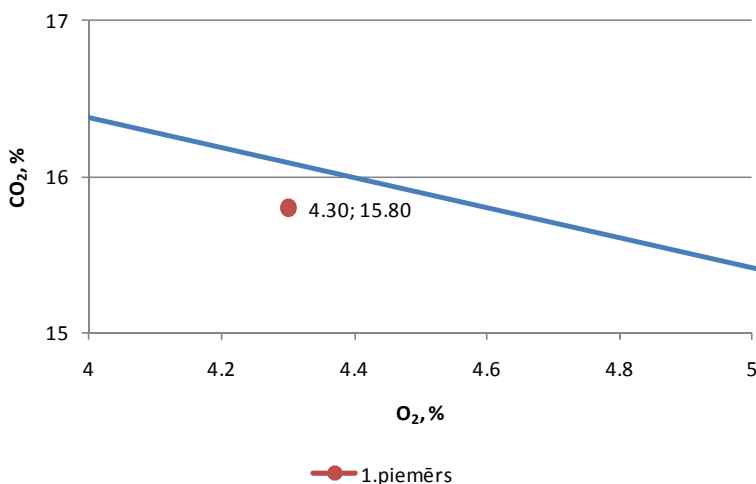
Nogriezni AH, kas reprezentē O_2 saturu dūmgāzēs, aprēķina šādi:

$$O_2 = 21 - \left(\frac{21(CO_2 + CO)}{CO_{2\max}} - COtg\alpha \right) \quad (3.21)$$

Zemāk ir parādīti piemēri Karjakina diagrammas lietošanai, par pamatu ņemot eksperimentālos datus.

Koksnes dedzināšanas gadījumā $CO_{2\max} = 20,236\%$. Eksperimentā iegūts, ka $CO_2 = 15,8\%$ un $O_2 = 4,3\%$ (3.4. att.). Tad, izmantojot formulu (3.16), iegūts:

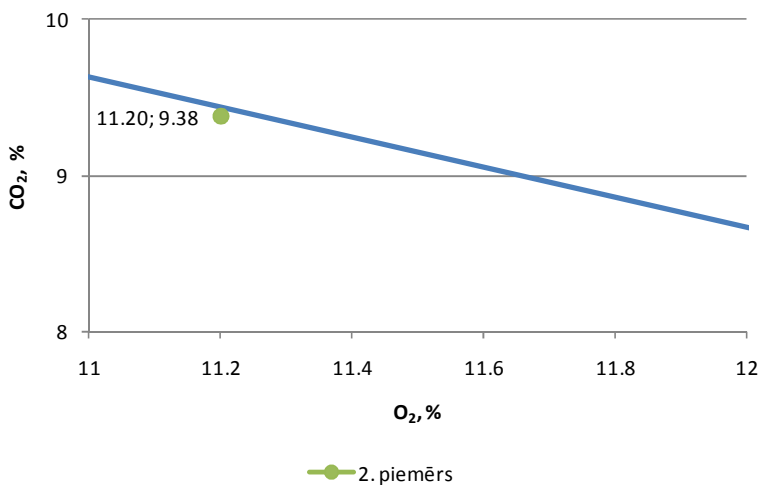
$$CO = \frac{CO_{2\max}(21 - O_2) - 21CO_2}{21 - CO_{2\max}tg\alpha} = \frac{20,236 \cdot (21 - 4,3) - 21 \cdot 15,8}{21 - 20,236 \cdot 0,395} = 0,47\%$$



3.4. att. Karjākina diagramma eksperimentam CO₂ = 15,8 % un O₂ = 4,3 % (CO = 0,47 %)

Eksperimentā iegūts, ka CO = 0,1 % un O₂ = 11,2 %. CO₂ saturu aprēķina, izmantojot (3.18) formulu:

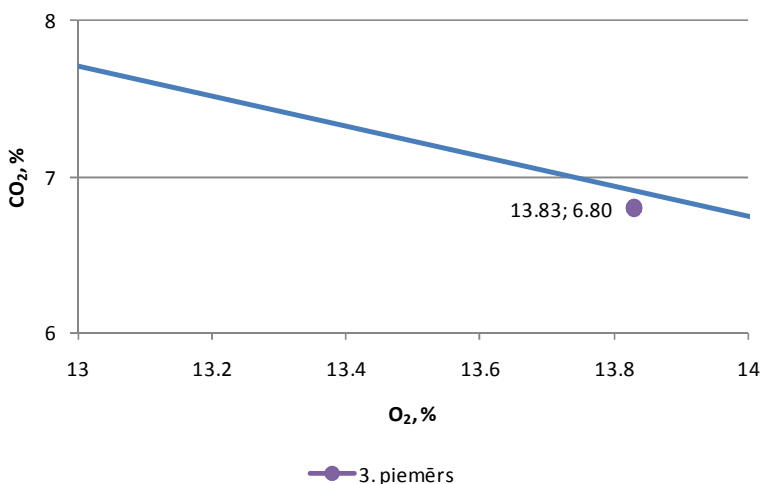
$$CO_2 = \frac{CO_{2\max}}{21} (COtg\alpha + 21 - O_2) - CO = \frac{20,236}{21} (0,1 \cdot 0,395 + 21 - 11,2) - 0,1 = 9,38 \%$$



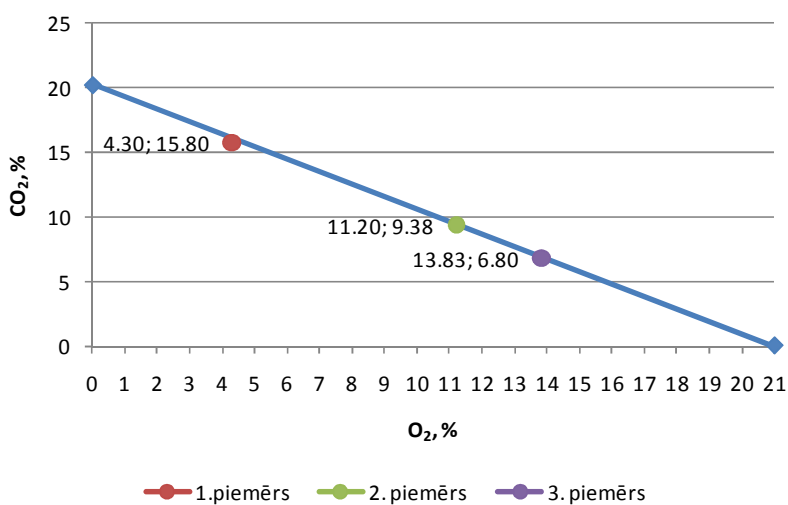
3.5. att. Karjākina diagramma eksperimentam CO = 0,1 % un O₂ = 11,2 % (CO₂ = 9,38 %)

Eksperimentā iegūts, ka CO = 0,17 % un CO₂ = 6,8 %. Tad O₂ saturs aprēķina, izmantojot (3.21) formulu:

$$O_2 = 21 - \left(\frac{21(CO_2 + CO)}{CO_{2\max}} - COtg\alpha \right) = 21 - \left(\frac{21(6,8 + 0,17)}{20,236} - 0,17 \cdot 0,395 \right) = 13,83 \%$$



3.6. att. Karjākina diagramma eksperimentam CO = 0,17 % un CO₂ = 6,8 % (O₂ = 13,83 %)

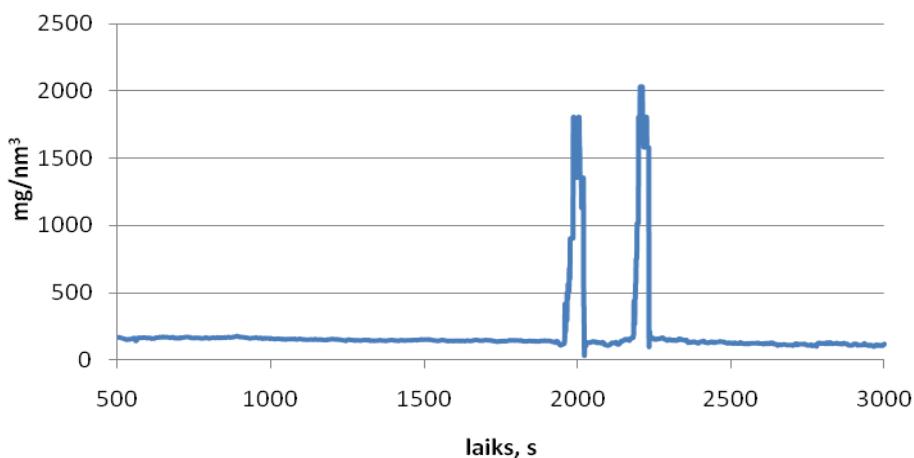


3.7. att. Karjākina diagramma

Visos gadījumos punkti ar dotajiem un iegūtajiem parametriem atrodas Karjākina diagrammas trīsstūrī (3.7. att.), kas nozīmē, ka mērījumi izdarīti pareizi.

3.5. Rupju kļūdu noteikšana un izņemšana

Apstrādājot eksperimentālos datus, tika secināts, ka slāpekļa oksīda emisijām parādās pīķi, kas ievērojami atšķiras no pārējiem datiem. Viens no piemēriem ir parādīts 3.8. attēlā.



— NO_x (mg/nm³), koksne (W=8%), prop.=0,9 kJ/s

3.8. att. NO_x emisijas pirms apstrādes

Kā redzams attēlā, aptuveni 1900. un 2200. sekundē NO_x sasniedz maksimālo vērtību 2029 mg/nm³, kas vairāk nekā desmit reizes pārsniedz eksperimenta vidējos datus. Tas liecina, ka šie pīķi var būt rupjas kļūdas. Lai noteiktu, vai šīs vērtības ir kļūdas, aprēķina relatīvo novirzi (R_i) ar šādu formulu:

$$R_i = \frac{|y_i - y_{vid.}|}{S_y \left(\frac{m-1}{m} \right)^{1/2}}, \quad (3.22)$$

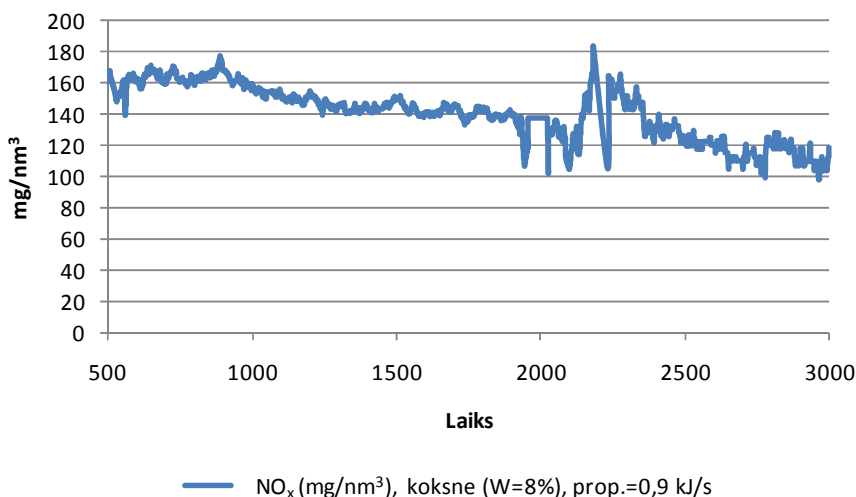
kur

m – novērojumu skaits;

S_y – vidējā kvadrātiskā novirze, kuru aprēķina, izmantojot dispersiju S_y^2 [85].

$$S_y^2 = \frac{(y_1 - y_{vid.})^2 + (y_2 - y_{vid.})^2 + \dots + (y_m - y_{vid.})^2}{m-1} \quad (3.23)$$

Aprēķinātais kritērijs R_i ir jāsalīdzina ar tabulas rādītāju R_a pie brīvības pakāpes $p = 0,05$, un, ja $R_i > R_a$, tad šis rezultāts būs jāizņem no turpmākās analīzes. Ņemot vērā, ka katra eksperimenta vidējas novērojumu skaits ir vairāk par 2 tūkstošiem, tad $R_a = 1,94$. Relatīvā novirze ir jāpārreķina tik reizes, mainot novērojumu skaitu, kamēr $R_i \leq R_a$. Pēc datu apstrādes NO_x emisijas, kas ir parādītas 3.9. attēlā, izskatīsies šādi:



3.9. att. NO_x emisijas pēc apstrādes

3.9. attēlā ir redzams, ka pēc datu apstrādes maksimālā NO_x emisiju vērtība konkrētajā eksperimentā ir 183 mg/nm³ (2029 mg/nm³ vietā). Šāda veida datu apstrāde tika veikta visiem eksperimentiem: koksnes granulām ar mitruma saturu 8, 15, 20 un 25 %, pie dažādas propāna/butāna padeves.

3.6. 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.

Korelācija ir neatkarīgo un atkarīgo mainīgo lielumu savstarpējās saites ciešums, kuru vērtē ar korelācijas koeficienta palīdzību. Viena faktora matemātiskā modeļa gadījumā tā aplēsēm izmanto Pīrsona izteiksmi:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - x)(y_i - y)}{(m-1)S_x \cdot S_y}, \quad (3.24)$$

kur

x_i, y_i – neatkarīgie un tiem atbilstošie atkarīgo lielumu pāri;

x, y – neatkarīgo un atkarīgo lielumu vidējās aritmētiskās vērtības;

S_x, S_y – lielumu izlases dispersijas.

Daudzfaktoru korelācijas gadījumā lieto daudzfaktoru korelācijas koeficientu R , kas nav statistiski interpretējams, tomēr to nosaka un izmanto kā netiešu regresijas vienādojuma rādītāju. Ar korelācijas koeficientu palīdzību vērtē, cik precīzi ir korelācijas ciešumu raksturojošie matemātiskie modeļi. Datu statistiskās apstrādes datorprogrammās parasti rēķina korelācijas koeficienta kvadrātu R^2 .

Regresijas vienādojumu izmanto, lai prognozētu rezultatīvās pazīmes vērtības. Regresijas vienādojumu nosaka ar empīrisku datu palīdzību un tajā vērtē koeficienta nozīmību.

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + bx = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i, \quad (3.25)$$

kur

y – atkarīgais mainīgais lielums;

b_0 – regresijas brīvais loceklis;

$b_1 \dots b_n$ – regresijas koeficienti;

$x_1 \dots x_n$ – neatkarīgie mainīgie lielumi.

Analizējot regresijas vienādojumu, ir jānovērtē vienādojuma koeficientu b_0, b_n būtiskums. Koeficienta būtiskuma novērtēšanai izmanto t kritēriju, kuram ir Stjūdentā sadalījums ar f brīvības pakāpēm. Brīvības pakāpi f nosaka šādi [85–87]:

$$f = m - (n + 1), \quad (3.26)$$

kur

m – empīriskās datu kopas apjoms;

n – neatkarīgo mainīgo skaits regresijas vienādojumā.

Iegūto t kritēriju katram koeficientam salīdzina ar vērtību t_{tab} , kas atrodas Stjūdentā sadalījuma tabulās, atbilstoši nozīmības pakāpei $p = 0,05$ un f brīvības pakāpēm. Ja vērtējamajam koeficientam ir spēkā noteiktums $|t| > t_{tab}$, tad tas ir būtisks un atstājams regresijas vienādojumā. Pretējā gadījumā ir jāatsakās no šī saskaitāmā un analīze jāveic no jauna, līdz visi atstātie koeficienti ir statistiski nozīmīgi [85–87].

Iegūtais regresijas vienādojums jāvērtē ar dispersijas analīzes palīdzību, izmantojot Fišera kritēriju F . Šim nolūkam izskata atkarīgā mainīgā lielumu dispersijas attiecību pret atlikuma dispersiju [85]:

$$F(f_1, f_2) = \frac{S_y^2(f_1)}{S_{atl.}(f_2)}, \quad (3.27)$$

kur

$S_y^2(f_1)$ – atkarīgā mainīgā lieluma y dispersija;

$S_{atl.}(f_2)$ – atlikuma dispersija.

Atlikumu nosaka kā starpību starp atkarīgā mainīgā lielumu un regresijas vienādojumā aprēķināto vērtību ($y_i - y_i^{apr.}$). Brīvības pakāpes (f_1 un f_2) aprēķina šādi:

$$\begin{cases} f_1 = m - 1 \\ f_2 = m - n \end{cases} \quad (3.28)$$

Šāds vienādojums darbojas un apraksta analizējamos datus, ja ir spēkā sakarība $F > F_{tab}$. F_{tab} vērtību nosaka, izmantojot Fišera sadalījuma tabulas, atbilstoši nozīmības pakāpei $p = 0,05$ un brīvības pakāpēm f_1 un f_2 [85–87].

4. EKSPERIMENTĀLO PETĪJUMU REZULTĀTU ANALĪZE

Šajā nodaļā ir apkopoti eksperimentālie rezultāti no divu eksperimentu sērijām.

- a. Pirmā eksperimentālo pētījumu sērija ir saistīta ar koksnes granulu un propāna/butāna maisījuma līdzdedzināšanu, izvērtējot līdzdedzināšanas ietekmi uz emisiju veidošanos, efektivitāti un saražoto siltumenerģiju.
- b. 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.

Eksperimentālo pētījumu mērķis ir nodrošināt efektīvu un ekoloģiski tīru degšanas procesu.

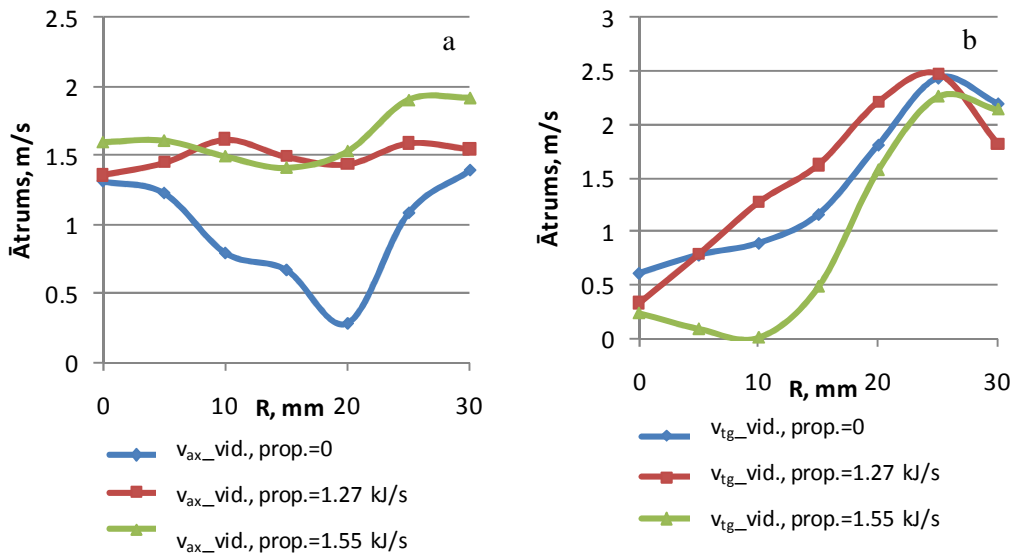
4.1. Koksnes granulu un gāzes līdzdedzināšanas izpētes rezultāti un to analīze

Veicot pētījumus par propāna/butāna līdzdedzināšanas ietekmi uz koksnes granulu degšanas procesa veidošanos, tika sadedzinātas koksnes granulas ar dažādu mitruma saturu: $W = 8\%$, 15% , 20% un 25% . Ņemot vērā, ka mitruma saturs palielināšanās koksnes biomasā samazina tās sadegšanas siltumu un saražotās enerģijas daudzumu, mitrās koksnes degšanas procesa nodrošināšanai tika izmantota propāna/butāna padeve degšanas kamerā, kas veicina ātrāku un pilnīgāku mitru koksnes granulu sasilšanu, žāvēšanu un termisko sadalīšanos ar ātrāku gaistošo savienojumu uzliesmošanu un sadegšanu. Šajos eksperimentos propāna/butāna padeve koksnes granulu slānī tika mainīta robežās no $0,9\text{ kJ/s}$ līdz $1,27\text{ kJ/s}$, nodrošinot $17\text{--}23\%$ no kopējā saražotās enerģijas daudzuma. Koksnes kurināmais eksperimenta laikā pakāpeniski sadega, bet propāna/butāna padeve palika nemainīga.

4.1.1. Ātrumu sadalījums biomasas un gāzes līdzdedzināšanā

Degšanas procesa dinamiku nosaka savstarpēji saistītu procesu veidošanās, kas ietver plūsmas dinamiku, siltuma un masas pārneses procesus un ķīmisko kinētiku. Pie šīs konkrētās iekārtas konfigurācijas plūsmas dinamikas veidošanās ir komplicēts process, kuru nosaka primārā un sekundārā gaisa padeve iekārtā, granulu slāņa augstuma izmaiņas degšanas procesā un degšanas procesa kinētikas izmaiņas dažādās degšanas procesa attīstības stadijās.

Liesmas aksiālā un tangenciālā ātruma sadalījuma veidošanās 155 mm augstumā no propāna/butāna degļa ($L/D \sim 2,6$) ir redzama 4.1. attēlā.

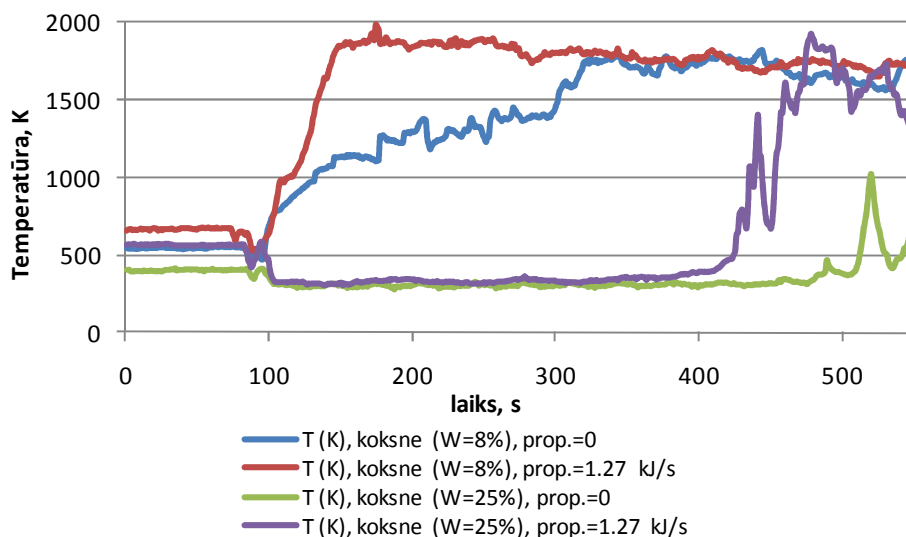


4.1. att. Propāna/butāna padeves ietekme uz aksiālā (a) un tangenciālā (b) ātruma profila veidošanos ($L/D \sim 2,6$)

Ja koksnes granulas tiek sadedzinātas bez propāna/butāna padeves degšanas zonā ($prop. = 0$), liesmas dinamiku ar konkrēto primārā un sekundārā gaisa padevi iekārtā nosaka centrālās recirkulācijas zonas veidošanās, kurā notiek primārās aksiālās un sekundārās gaisa virpuļplūsmas sajaukšanās. Šo plūsmu sajaukšanās būtiski ietekmē liesmas aksiālā ātruma sadalījuma veidošanos tās sākuma stadijā, kam raksturīga izteikta aksiālā ātruma (v_{ax}) samazināšanās virzienā no liesmas centra uz tās ārējo daļu, sasniedzot minimālo lielumu $R \sim 20$ mm attālumā no liesmas centra (R – kanāla rādiuss) (4.1. a att.). Strauja aksiālā ātruma palielināšanās vērojama pie $R > 20$ mm, ko nosaka gaisa virpuļplūsmas konvektīvā pārnese liesmas ārējā daļā. Liesmas tangenciālā ātruma (v_{tg}) sadalījuma veidošanos degšanas zonas pamatnē raksturo tangenciālā ātruma palielināšanās virzienā no liesmas centra uz tās ārējo daļu, sasniedzot maksimālo vērtību tuvu kanāla sienai ($r/R \sim 0,8$) (4.1. b att.) ar nelielu tangenciālā ātruma samazināšanos pie kanāla sienas $r/R > 0,8$. Eksperimentālie pētījumi apliecina, ka koksnes granulu un gāzes līdzdedzināšanas gadījumā izmainās līdzsvars starp liesmas aksiālo ātruma sadalījuma un recirkulācijas plūsmas veidošanos. Propāna/butāna padeve iekārtā izraisa izteiktu aksiālā ātruma palielināšanos liesmas centrālajā daļā un nelielu tangenciālā ātruma samazināšanos pie kanāla sienas ($r/R > 0,7$). Respektīvi, propāna/butāna padeve iekārtā izraisa vienmērīgāku aksiālā ātruma sadalījuma veidošanos degšanas zonas pamatnē.

4.1.2. Temperatūras un siltuma plūsmas izmaiņu analīze

2.1. attēlā (2.1.1. apakšnodaļā „Eksperimentālā iekārta koksnes granulu un propāna/butāna līdzdedzināšanai” redzamajā eksperimentālās iekārta konfigurācijā koksnes biomasas degšanas process sākas ar endotermiskiem koksnes biomasas silšanas, žāvēšanas un termiskās sadalīšanās procesiem, kuru ierosināšanai un uzturēšanai ir iespējams izmantot propāna/butāna padevi koksnes biomasā. Biomasas termiskā sadalīšanās ir saistīta ar gaistošo savienojumu (CO , H_2 , C_xH_y) veidošanos un tai sekojošiem eksotermiskiem gaistošo savienojumu uzliesmošanas un degšanas procesiem, kas veicina strauju degšanas zonas temperatūras palielināšanos līdz tās maksimālajai vērtībai – 1700–1980 K. Pētījumi ar dažāda mitruma koksnes granulām un dažādu propāna/butāna padevi iekārtā apliecina, ka biomasas termiskās sadalīšanās procesa sākuma stadijas ilgums ir būtiski atkarīgs no mitruma satura un propāna/butāna padeves koksnes biomasā.



4.2. att. Temperatūras izmaiņas degšanas procesa sākuma stadijā

Dedzinot koksnes biomasu ar mitruma saturu 8 % bez propāna/butāna padeves un ar propāna/butāna padevi biomasā, tika novērota ātrāka biomasas žūšana un gaistošo savienojumu uzliesmošana salīdzinājumā ar mitrās koksnes sadegšanu, ātrāk sasniedzot maksimālo degšanas zonas temperatūru (4.2. att.). Palielinoties mitruma saturam biomasā, 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.

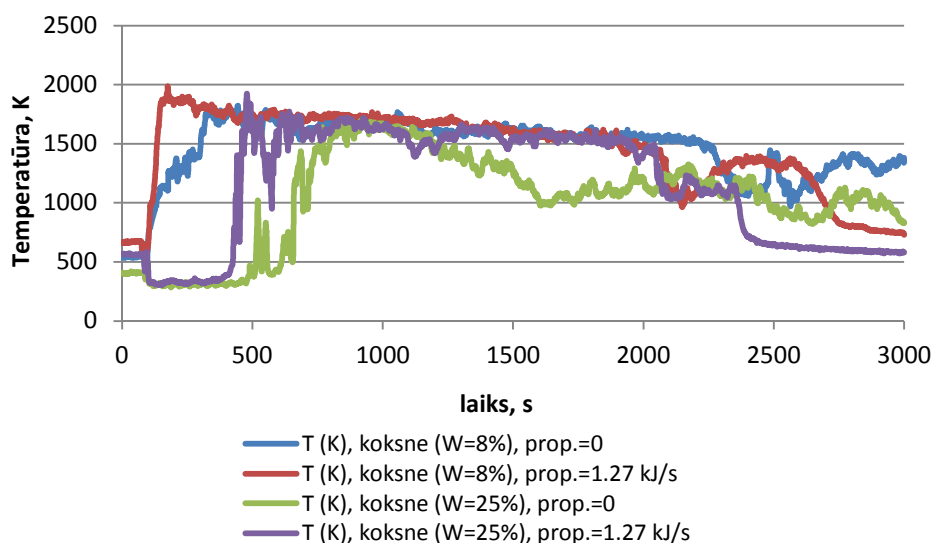
4.1 tabula

Propāna/butāna padeves ietekme uz vidējo un maksimālo temperatūru termiskās sadalīšanās procesa sākuma stadijā (0–550 s)

Koksnes biomasa	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
Vidējā temperatūra	1304 K	1535 K	355 K	626 K
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

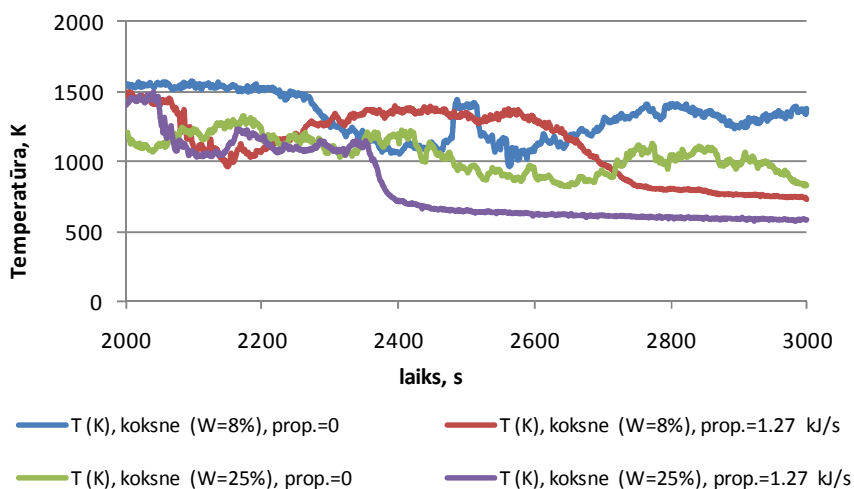
4.1 tabulā ir apkopoti dati par vidējās temperatūras izmaiņām termiskās sadalīšanās procesa sākuma stadijā, sadedzinot koksnes biomasu ar mitruma saturu 8 % un 25 % ar propāna/butāna padevi (1,27 kJ/s) un bez propāna/butāna padeves (0 kJ/s) biomasā, kā arī apkopoti dati par maksimālo temperatūru, kas tika sasniegta degšanas procesa sākuma stadijā. Visaugstākā vidējā temperatūra 1535 K tika novērota, līdzdedzinot koksnes biomasu (W = 8 %) ar propāna/butāna padevi, savukārt viszemākā temperatūra 355 K tika novērota, dedzinot mitro koksnes biomasu (W = 25 %) bez propāna/butāna padeves biomasā. Propāna/butāna padeve koksnes biomasā nodrošināja ātrāku gaistošo savienojumu veidošanos: līdzdedzinot koksnes biomasu ar mitrumu 8 % ar propāna/butāna padevi, maksimālā temperatūra tika sasniegta jau 175 sekundē pēc biomasas gazifikācijas procesa ierosināšanas, bet, sadedzinot koksnes granulas bez propāna/butāna padeves biomasā, maksimālā degšanas zonas temperatūra tika sasniegta tikai pēc 445 sekundēm. Savukārt mitrām granulām ar propāna/butāna padevi biomasā maksimālā temperatūra tika sasniegta 479 sekundē, bet, sadedzinot koksnes granulas bez propāna/butāna padeves biomasā, maksimālā degšanas zonas temperatūra tika sasniegta tikai pēc 875 sekundēm.



4.3. att. Temperatūras izmaiņas (K), dedzinot koksnes biomasu ar dažādu mitruma saturu, ar propāna/butāna padevi un bez tās

Stabils gaistošo savienojumu degšanas process atkarībā no mitruma satura koksnē veidojās laikā no 500. sekundes līdz 2000. sekundei. Gan degšanas zonas maksimālā, gan arī vidējā temperatūra samazinājās, palielinot mitruma saturu koksnes biomasā. Sadedzinot slapju koksnes biomasu ($W = 25\%$) bez propāna/butāna padeves, koksnes biomasas degšanas process ir nestabils, veidojot izteiktas temperatūras svārstības degšanas zonā (4.3. att.), bet vidējā degšanas zonas temperatūra samazinājās līdz 1246 K. Nodrošinot propāna/butāna padevi degšanas zonā, mitrās koksnes degšanas process stabilizējās un degšanas zonas temperatūra palielinājās līdz 1563 K. Degšanas zonas temperatūras pulsācijas samazinājās arī, ja tika samazināts mitruma saturs koksnē. Sadedzinot koksnes biomasu ar mitrumu līdz 8 %, vidējā degšanas zonas temperatūra bez propāna/butāna padeves degšanas zonā palielinājās līdz 1622 K un pieauga līdz 1650 K, ja tika nodrošināta propāna/butāna padeve 1,27 kJ/s (4.3. att.).

Propāna/butāna padeves ietekme uz mitras koksnes degšanas procesu vērojama arī degšanas procesa beigu stadijā ($t > 2000$ s), kad vērojama pakāpeniska degšanas zonas temperatūras samazināšanās ar pāreju no liesmveidīga koksnes degšanas procesa uz pāroģloto granulu gruzdēšanu (4.4. att.). Sadedzinot mitru koksnes biomasu bez propāna/butāna padeves iekārtā, degšanas procesa beigu stadijā gazifikatorā paliek aptuveni 25–30 g pāroģlotu granulu, kuras turpina lēni gruzdēt, nedaudz palielinot liesmas temperatūru eksperimenta beigās, kad granulu slānis pakāpeniski noslīd zem sekundārā gaisa padeves. Sadedzinot koksnes biomasu ar mazāku mitruma saturu ($W = 8\%$) un propāna/butāna padevi degšanas zonā, vērojama ātrāka temperatūras samazināšanās procesa beigu stadijā (4.4. att.), kas liecina, ka propāna/butāna padeve biomasā nodrošina ne tikai straujāku biomasas termisko sadalīšanos, bet arī gaistošo savienojumu ātrāku sadedzināšanu.



4.4. att. Temperatūras izmaiņas degšanas procesa beigu stadijā

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

$$T_{vid.} = 1715,23 - 27,15W + 117,83q, \quad (4.1)$$

kur

W – mitruma saturs koksnes biomasā, %;

q – propāna/butāna padeve, kJ/s.

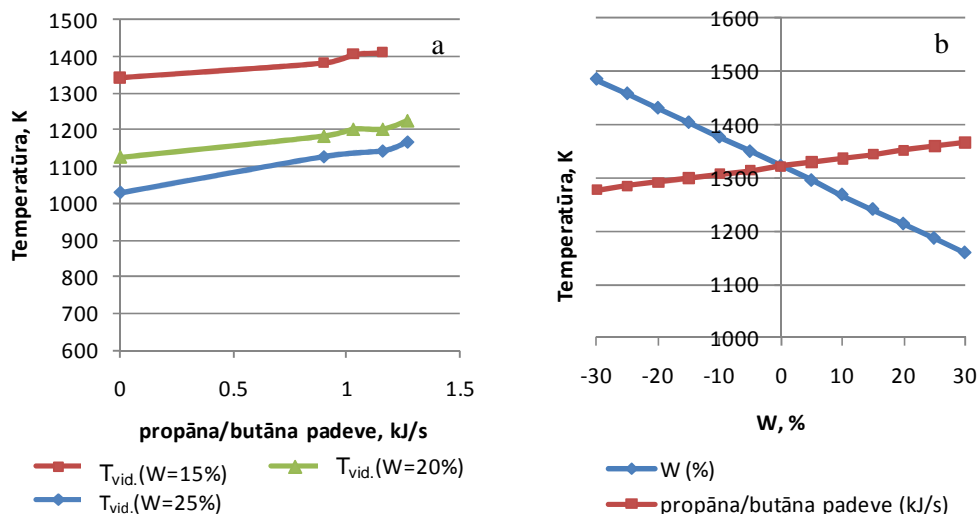
Empīriskajā vienādojumā (4.1) iegūto koeficientu statistiskais novērtējums ir parādīts 4.2 tabulā.

4.2 tabula

Empīriskā vienādojuma ($T_{vid.}$) koeficientu statistiskais novērtējums

Neatkarīgie mainīgie	Koeficienti	t statistika	P vērtība
b_0	1715,23	25,1	0,000
b_1	-27,15	-8,42	0,000
b_2	117,83	2,42	0,036

Datu apstrādē izvēlēts nozīmības līmenis $P = 0,05$, kas atbilst ticamības varbūtībai 0,95 un brīvības pakāpēm $f = 17$, kas tiks izmantots visos nākamajos regresijas vienādojumos. Stjudenta kritērijs t_{tab} no sadalījuma tabulām pie konkrētajiem parametriem (P un f vērtības) ir 2,10. Visos gadījumos ir spēkā sakarība $t > t_{tab}$, kas nozīmē, ka visi vienādojuma parametri (mitruma saturs koksnē un propāna/butāna padeve) ir būtiski un saglabājami vienādojumā. Iegūtā regresijas vienādojuma korelācijas koeficients $R = 0,94$. Vienādojuma (4.1) adekvātums ir pārbaudīts, izmantojot Fišera kritēriju, kura vērtība ir $F = 37,5$, bet Fišera kritērija tabulas vērtība ir $F_{tab} = 2,1$. Sakarība $F > F_{tab}$ ir spēkā, kas liecina, ka vienādojums (4.1) ir adekvāts un tā lietojums ir korekts.

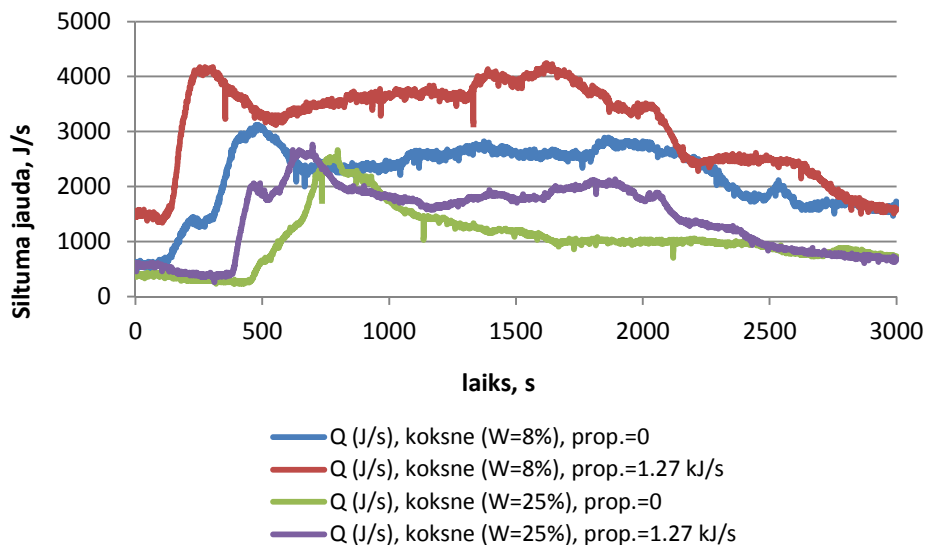


4.5. att. Mitruma saturs (%) un propāna/butāna padeves (kJ/s) ietekme uz vidējo temperatūru (a) un jutīguma analīze (b)

4.5. a attēlā ir redzams, kā mainās vidējā temperatūra atkarībā no mitruma daudzuma koksnē un no propāna/butāna padeves – palielinoties mitruma saturam

koksnes biomasā, vidējā temperatūra samazinās, bet, palielinot propāna/butāna padevi, vidējā temperatūra samazinās. Līdzīgs rezultāts ir redzams 4.5. b attēlā, kur ir parādīta jutīguma analīze, kas tika veikta, izmantojot iegūto empīrisko vienādojumu (4.1).

Eksperimentālo pētījumu rezultātā ir konstatēts, ka propāna/butāna padeve koksnes biomasas slānī nodrošina ne tikai augstākas temperatūras, bet arī saražotās siltumenerģijas pieaugumu. 4.6. attēlā ir parādītas iekārtas siltuma jaudas izmaiņas (J/s).



4.6. att. Siltuma izmaiņas pie dažādiem degšanas nosacījumiem

4.6. attēlā ir redzams, ka vairāk siltuma tika saražots, dedzinot koksnes biomasu ar mazāku mitruma saturu ($W = 8\%$) un propāna/butāna padevi iekārtā, ko nodrošina propāna un butāna maisījuma stehiometriskais degšanas process, bet iekārtas siltumražība būtiski samazinās, sadedzinot mitru koksnes biomasu ($W = 25\%$) bez propāna/butāna padeves iekārtā. Līdzīgi temperatūras kinētikai (4.3. att.), arī saražotā siltuma daudzuma kinētika degšanas procesa sākuma stadijā ir atkarīga no mitruma satura koksnē, kā arī no propāna/butāna padeves. Ja tiek sadedzināta sausa koksnes biomasas ar mitrumu līdz 8% , saražotais siltuma daudzums degšanas procesa sākuma stadijā strauji palielinās jau pēc 100. sekundes, savukārt, dedzinot koksnes biomasu ar mitrumu 25% , aptuveni līdz 400.–500. sekundeī vērojama neliela siltuma jaudas samazināšanās, ko nosaka endotermiskie koksnes silšanas un mitruma izdalīšanās procesi, un tikai pēc 400.–500. sekundes, kad vērojama gaistošo savienojumu uzliesmošana un tiek ierosināta to degšana, iekārtas siltuma jauda sāk strauji palielināties, sasniedzot maksimālo vērtību pēc 500. sekundes.

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

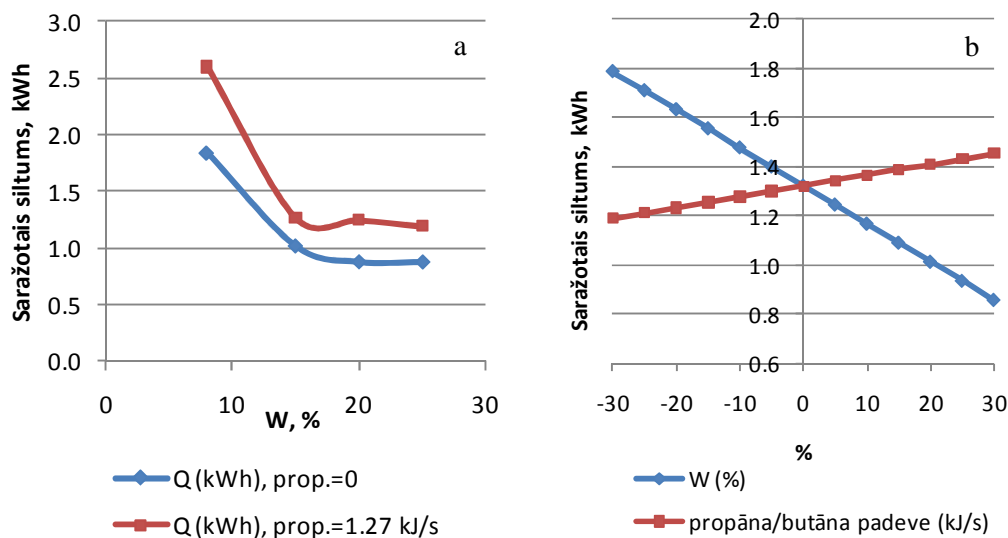
$$Q = 2,42 - 0,08W + 0,35q \quad (4.2)$$

Empīriskajā vienādojumā (4.2) iegūto koeficientu statistiskais novērtējums ir parādīts 4.3 tabulā.

Empīriskā vienādojuma ($Q_{\text{vid.}}$) koeficientu statistiskais novērtējums

Neatkarīgie mainīgie	Koeficienti	t statistika	P vērtība
b_0	2,42	10,38	0,000
b_1	-0,08	-6,81	0,000
b_2	0,35	2,31	0,035

Stjūdenta kritērijs t_{tab} no sadalījuma tabulām pie $P = 0,05$ un $f = 17$ vērtības ir 2,10. Visos gadījumos ir spēkā sakarība $t > t_{\text{tab}}$, kas nozīmē, ka visi vienādojuma parametri ir būtiski un saglabājami vienādojumā. Iegūtā empīriskā vienādojuma korelācijas koeficients $R = 0,88$. Vienādojuma (4.2) adekvātums ir pārbaudīts, izmantojot Fišera kritēriju, kura vērtība ir $F = 8,7$, bet Fišera kritērija tabulas vērtība ir $F_{\text{tab}} = 2,1$. Sakarība $F > F_{\text{tab}}$ ir spēkā, kas liecina, ka vienādojums (4.2) ir adekvāts un tā lietojums ir korekts.



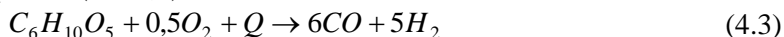
4.7. att. Saražotais siltums atkarībā no mitruma saturs koksnes biomasā un propāna/butāna padeves (a) un jutīguma analīze (b)

No 4.7. a, b attēla var secināt, ka biomasas mitruma palielināšanās samazina saražoto siltuma daudzumu, bet, padodot propānu/butānu degšanas zonas pamatnē, kopējais saražotais siltums palielinās vidēji par 25–30 %, salīdzinot ar saražotā siltuma daudzumu iekārtā, ko iegūst, sadedzinot sausu koksni bez propāna/butāna padeves.

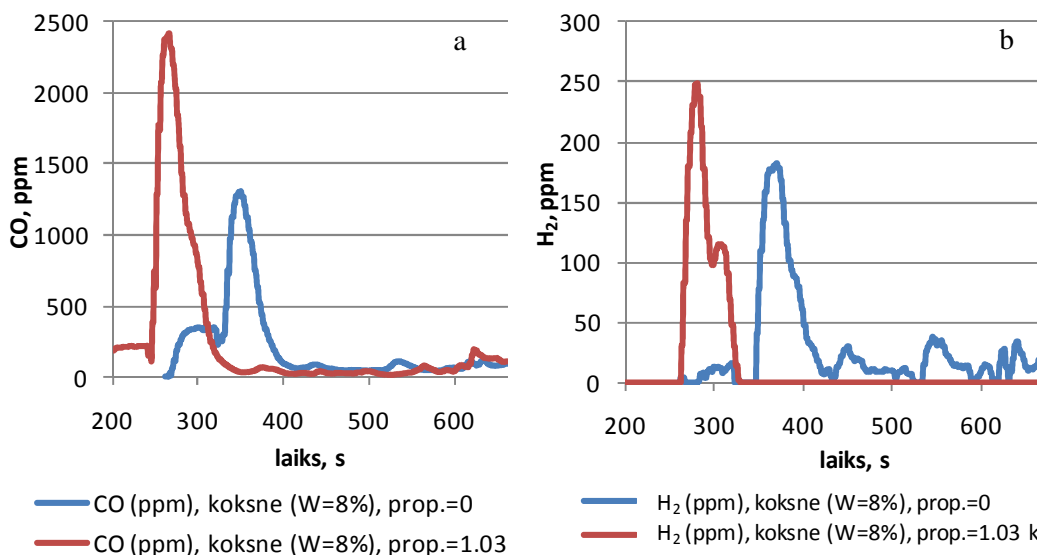
4.1.3. Degšanas produktu sastāva un efektivitātes analīze

Koksnes biomasā ir organiska viela, kuras galvenās sastāvdaļas ir hemiceluloze (22–25 %), celuloze (45–50 %) un lignīns (25–29 %) [17–19] un kuru termiskās sadalīšanās ātrums ir atkarīgs no temperatūras. Termiski visnestabilākā ir hemiceluloze, kuras termiskā sadalīšanās, sildot koksnes biomasu, sākas jau 490 K un sasniedz maksimālo termiskās sadalīšanās ātrumu pie 540 K. Celulozes termiskās sadalīšanās maksimālā intensitāte ir vērojama 630 K, bet lignīna termiskās sadalīšanās

process notiek relatīvi plašā temperatūras diapazonā – no 450 K līdz 1170 K. Šo koksnes biomasas sastāvdaļu termiskās sadalīšanās procesu ierosināšanai iekārtā izmanto ārējo siltuma avotu (Q) – propāna un butāna liesmu, kas termiskās sadalīšanās procesa sākuma stadijā nodrošina galveno biomasas termiskās sadalīšanās produktu (CO , H_2) veidošanos. Biomasas termiskās sadalīšanās procesu (gazifikācija) parasti organizē ar primāro gaisa padevi, kas ir stipri zemāka par stehiometriskai degšanai nepieciešamo gaisa padevi ($\alpha < 0,5$):

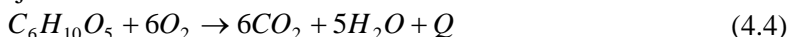


Eksperimentālo pētījumu rezultāti apliecina, ka ar konkrēto iekārtas konfigurāciju koksnes granulū termiskās sadalīšanās procesā CO masas koncentrācija gāzē sasniedz 2400–2500 ppm (4.8. a att.), bet H_2 koncentrācija – 250 ppm (4.8. b att.).



4.8. att. CO (a) un H_2 (b) emisiju veidošanās koksnes biomasas termiskās sadalīšanās procesa sākuma stadijā

Pēc gaistošo savienojumu plūsmas sajaukšanās ar sekundāro gaisu notiek gaistošo savienojumu uzliesmošana un degšana, kas notiek pie nosacījuma, ja degšanas zonā tiek nodrošināta stehiometriskā gaisa padeve vai gaisa padeves pārsvars ($\alpha \geq 1$), kuru raksturo vienādojums:

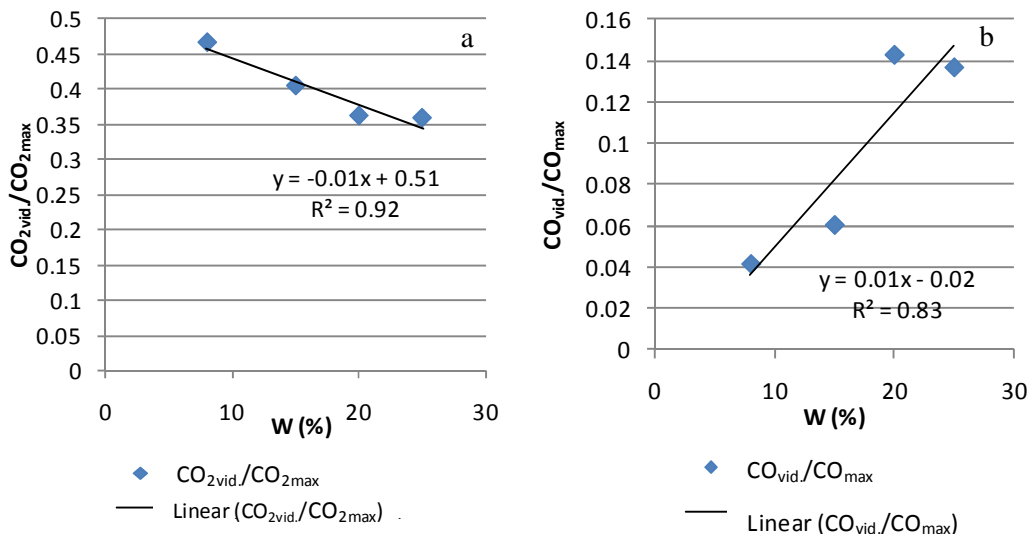


Atšķirībā no endotermiskā biomasas termiskās sadalīšanās procesa (4.3), kas veidojas 500–600 K, degšanas process ir eksotermisks un saistīts ar intensīvu ķīmiskās reakcijas (4.4) siltuma izdalīšanos, nodrošinot strauju degšanas zonas temperatūras pieaugumu līdz 1700–1900 K. No (4.4.) izriet, ka koksnes biomasas degšanas procesa galvenie produkti ir CO_2 un H_2O , kuru veidošanās ir saistīta ar vienlaicīgu gaistošo savienojumu (CO un H_2) koncentrācijas samazināšanos degšanas zonā un produktos.

Propāna/butāna padeves un mitruma satura ietekme uz CO_2 un CO emisijām tika izvērtēta, attiecinot vidējās CO_2 un CO emisijas eksperimenta laikā pret to maksimālo vērtību. CO gadījumam tā bija maksimālā vērtība, kas tika sasniegta

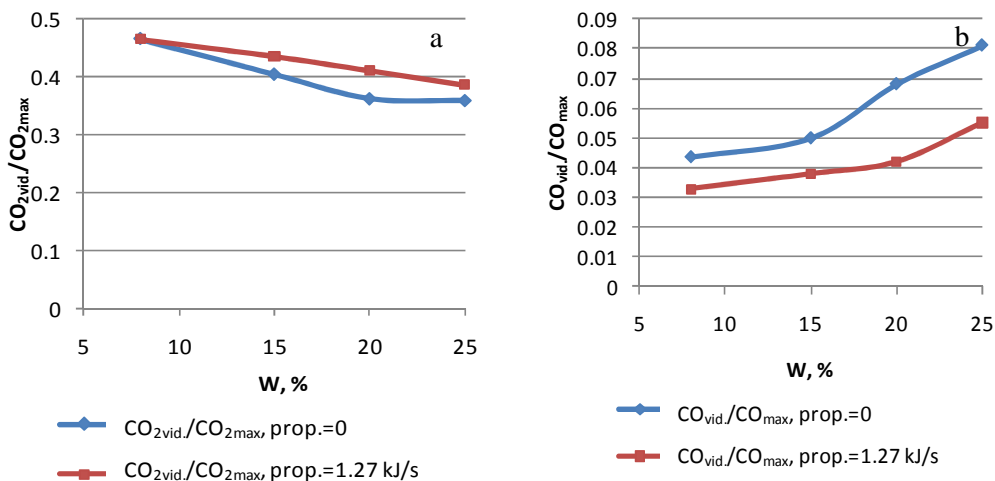
eksperimenta laikā, bet CO₂ maksimālais daudzums tika aprēķināts atkarībā no propāna/butāna padeves ātruma (kJ/s).

Degšanas produktu sastāva analīze apliecina, ka viens no faktoriem, kas ietekmē CO₂ emisiju veidošanos koksnes biomasas degšanas procesā un tā koncentrāciju produktos, ir mitruma saturs koksnes biomasā (4.9. att.)



4.9. att. CO_{2vid.}/CO_{2max} (a) un CO_{vid.}/CO_{max} (b) koksnes biomasas ar dažādu mitruma saturu dedzināšanai bez propāna/butāna padeves degšanas zonā}}

Kā izriet no 4.9. attēla, palielinoties mitruma saturam koksnes biomasā, samazinās CO₂ emisijas, bet palielinās CO emisiju daudzums. Iegūtos rezultātus var aprakstīt ar 4.9. attēlā redzamo lineāro korelāciju. Propāna/butāna padeve degšanas kamerā intensificē koksnes biomasas degšanas procesu, palielinot CO₂ koncentrāciju, bet samazinot CO koncentrāciju produktos (4.10. att.).



4.10. att. Propāna/butāna padeves ietekme uz relatīvajām CO_{2vid.}/CO_{2max} (a) un CO_{vid.}/CO_{max} (b) izmaiņām dažādā mitruma satura koksnes biomasas degšanas procesā}}

Kā redzams 4.10. attēlā, relatīvās $CO_{2vid.}/CO_{2max}$ un $CO_{vid.}/CO_{max}$ izmaiņas degšanas procesā ietekmē ne tikai mitruma saturs koksnes biomasā, bet arī propāna/butāna padeve iekārtā. Eksperimentālo pētījumu rezultāti apliecina, ka šīs korelācijas var aprakstīt, izmantojot empīriskos vienādojumus:

$$\frac{CO_{2vid.}}{CO_{2max}} = 0,49 - 0,01W + 0,03q \quad (4.5)$$

$$\frac{CO_{vid.}}{CO_{max}} = -0,001 + 0,006W + 0,039q \quad (4.6)$$

Empīriskajā vienādojumā (4.5) un (4.6) iegūto koeficientu statistiskais novērtējums ir parādīts 4.4 tabulā.

4.4 tabula

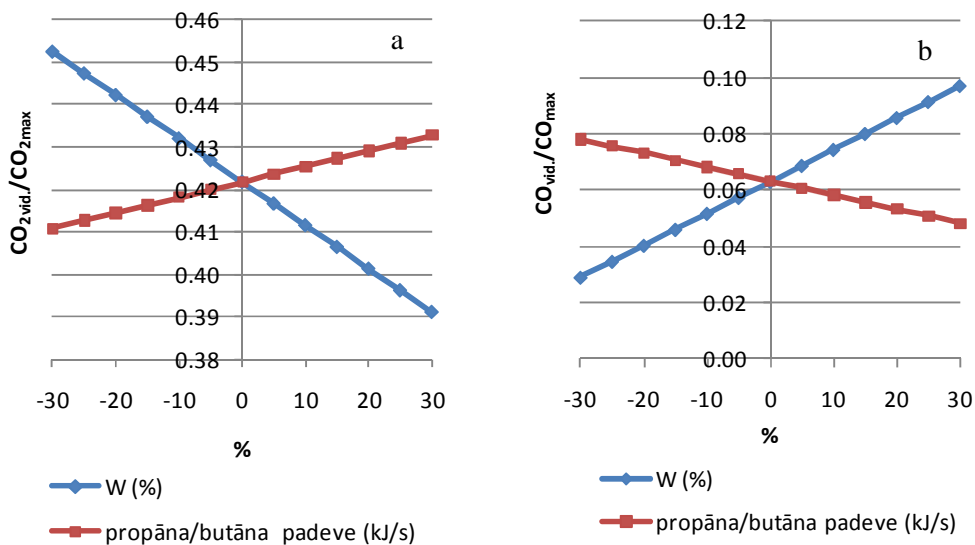
Empīrisko vienādojumu ($\frac{CO_{2vid.}}{CO_{2max}}$ un $\frac{CO_{vid.}}{CO_{max}}$) koeficientu statistiskais novērtējums

	Neatkarīgie mainīgie	Koeficienti	t statistika	P vērtība
$\frac{CO_{2vid.}}{CO_{2max}}$	b_0	0,49	26,43	0,000
	b_1	-0,01	-5,74	0,000
	b_2	0,03	2,5	0,026
	Neatkarīgie mainīgie	Koeficienti	t statistika	P vērtība
$\frac{CO_{vid.}}{CO_{max}}$	b_0	-0,001	10,38	0,004
	b_1	0,006	-6,81	0,008
	b_2	0,039	2,31	0,019

Visos gadījumos ir spēkā sakarība $t > t_{tab}$, ($t_{tab} = 2,10$), kas nozīmē, ka visi vienādojuma parametri ir būtiski un saglabājami vienādojumā. Iegūtā regresijas vienādojuma (4.5) korelācijas koeficients $R = 0,85$, bet vienādojuma (4.6) $R = 0,86$. Vienādojuma (4.5) Fišera kritērijs ir 18,99, vienādojuma (4.6) $F = 9,61$. Tas nozīmē, ka abi vienādojumi ir adekvāti un to lietojums ir korekts, jo ir spēkā $F > F_{tab}$.

Attiecinot $CO_{2vid.}$ pret CO_{2max} , relatīvā CO_2 koncentrācija produktos pieaug, palielinot propāna/butāna padevi, bet samazinās, palielinot mitruma saturu biomasā, savukārt CO emisiju relatīvais pieaugums liecina par nepilnīga degšanas procesa veidošanos.

Izmantojot (4.5) un (4.6) formulas relatīvo koncentrāciju $CO_{2vid.}/CO_{2max}$ un $CO_{vid.}/CO_{max}$ izmaiņām, tika veikta procesa jutīguma analīze (4.11. att.). Jutīguma analīze apliecina, ka mitruma saturs koksnes biomasā samazina rādītāju $CO_{2vid.}/CO_{2max}$, palielinot $CO_{vid.}/CO_{max}$, bet propāna/butāna padeve palielina $CO_{2vid.}/CO_{2max}$ rādītāju, samazinot $CO_{vid.}/CO_{max}$.



4.1.1. att. Jūtīguma analīze CO₂_{vid./CO₂max} (a) un CO_{vid./CO_{max}} (b)

Pilnīgai koksnes biomasas un gāzes maisījuma sadedzināšanai ir jānodrošina pietiekama gaisa padeves pārsvars ($\alpha \geq 1$). Visos eksperimentos, kad koksnes biomasas ar dažādu mitruma saturu tika dedzināta patstāvīgi vai ar propāna/butāna padevi iekārtā, gaisa padeve iekārtā netika mainīta – primārais gaiss tika padots ar ātrumu 47 l/min, bet sekundārais – ar ātrumu 69 l/min. Vidējais eksperimentu ilgums bija aptuveni 50 minūtes. Tas nozīmē, ka eksperimentu laikā tika padoti 5,8 m³ gaisa. Pārreķinot šo daudzumu normāliem apstākļiem ($t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$), kopējais iekārtā padotais gaisa daudzums ir 5,404 m³. Teorētiskais gaisa tilpums, kas ir nepieciešams cietā kurināmā (koksnes biomasas) pilnīgai sadedzināšanai, ir aprēķināms ar formulu (2.4) (sk. 2.2.3. apakšnodaļu „Gaisa padeve”). 4.5. tabulā ir apkopoti aprēķinu rezultāti, kas parāda, kā mainās teorētiskais gaisa tilpums atkarībā no mitruma satura koksnes biomasā, kā arī parādīts aprēķinātais gaisa patēriņa koeficients.

4.5 tabula

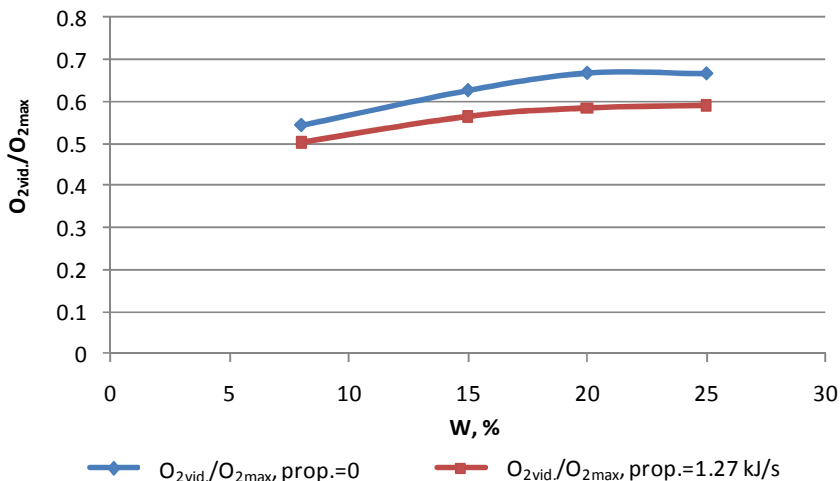
Teorētiskais gaisa tilpums pie dažāda mitruma satura koksnes biomasā un gaisa patēriņa koeficienti (α)

Koksnes biomasas mitruma saturs W ^d	8 %	15 %	20 %	25 %
Teorētiskais gaiss V ⁰ , m ³ *	2,16	1,99	1,88	1,76
Eksperimentos padotais gaiss, m ³	5,404	5,404	5,404	5,404
Gaisa patēriņa koeficients, α	2,5	2,71	2,88	3,07

* Teorētiskais gaisa tilpums, lai sadedzinātu 0,5 kg koksnes biomasas.

Kā redzams 4.5. tabulā, palielinoties mitruma saturam koksnes biomasā, samazinās teorētiski nepieciešamais gaisa tilpums pilnīgai kurināmā sadegšanai, savukārt eksperimentos tika padots vienāds gaisa daudzums neatkarīgi no mitruma satura koksnes biomasā. Šī iemesla dēļ gaisa patēriņa koeficients, palielinoties mitruma saturam koksnes biomasā no 8 % līdz 25 %, palielinās no 2,5 līdz 3,07 un koksnes

biomasas degšanas process veidojas pie izteiktas gaisa padeves pārsvara iekārtā, palielinot skābekļa tilpuma koncentrāciju produktos (4.12. att.), bet samazinot degšanas zonas temperatūru.



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

4.12. attēlā ir parādīts, kā mainās parametrs $O_{2vid.}/O_{2max}$ atkarībā no mitruma satura koksnes biomasā, dedzinot koksni bez propāna/butāna padeves iekārtā. Šajā gadījumā vidējā O_2 vērtība eksperimenta laikā tika attiecināta pret 21 (O_{2max}). Palielinoties mitruma saturam koksnē, rādītājs $O_{2vid.}/O_{2max}$ aug un palielinās vidējā O_2 koncentrācija produktos, kas apliecina, ka, palielinoties mitruma saturam biomasā, ir jāpadod mazāk gaisa pilnīgai kurināmā sadedzināšanai. Vienlaicīgi sadedzinot koksnes biomasu 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 (4.5. a att.), nodrošinot gaistošo savienojumu pilnīgāku sadedzināšanu (4.10. att.).

Eksperimentālo rezultātu analīze apliecina, ka koksnes biomasas mitruma satura un propāna/butāna padeves ietekmi uz relatīvajām $O_{2vid.}/O_{2max}$ tilpuma koncentrācijas izmaiņām tuvināti var raksturot, izmantojot empīrisko vienādojumu (4.7):

$$\frac{O_{2vid.}}{O_{2max}} = 0,52 + 0,01W - 0,06q \quad (4.7)$$

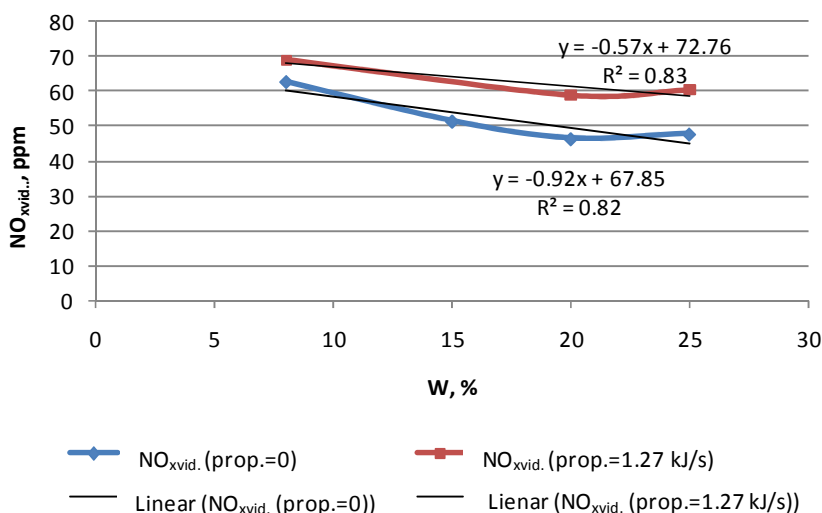
Empīriskajā vienādojumā (4.7) iegūto koeficientu statistiskais novērtējums ir parādīts 4.6 tabulā.

Regresijas vienādojuma ($\frac{O_{2vid.}}{O_{2max}}$) koeficientu statistiskais novērtējums

Neatkarīgie mainīgie	Koeficienti	t statistika	P vērtība
b_0	0,52	20,97	0,000
b_1	0,01	5,22	0,000
b_2	-0,06	-3,53	0,003

Stjudenta kritērijs t_{tab} no sadalījuma tabulām pie $P = 0,05$ un $f = 17$ vērtības ir 2,10. Visos gadījumos ir spēkā sakarība $t > t_{tab}$, kas nozīmē, ka visi vienādojuma parametri ir būtiski un saglabājami vienādojumā. Iegūtā empīriskā vienādojuma korelācijas koeficients $R = 0,84$. Vienādojuma (4.7) adekvātums ir pārbaudīts, izmantojot Fišera kritēriju, kura vērtība ir $F = 18,6$, bet Fišera kritērija tabulas vērtība ir $F_{tab} = 2,1$. Sakarība $F > F_{tab}$ ir spēkā, kas liecina, ka vienādojums (4.7) ir adekvāts un tā lietojums ir korekts.

NO_x emisijas degšanas procesā veidojas atbilstoši Zeldoviča mehānismam [50], kura veidošanos būtiski ietekmē degšanas zonas temperatūra, gaisa padeve iekārtā, kā arī slāpekļa saturs biomasā. Izmantojot eksperimentālo mērījumu rezultātus, ir konstatēts, ka degšanas zonas vidējā temperatūra samazinās, palielinoties mitruma saturam koksnes biomasā, bet palielinās, ja tiek nodrošināta propāna/butāna padeve iekārtā, ko apliecina arī rezultātu analīze, izmantojot empīrisko vienādojumu (4.1). Vienlaikus, palielinoties mitruma saturam koksnes biomasā, palielinās vidējā skābekļa koncentrācija produktos, kas nedaudz, aptuveni par 10 %, samazinās, ja tiek nodrošināta propāna/butāna padeve degšanas zonā. Ir jāatzīmē, ka, palielinoties mitruma saturam koksnes biomasā, mainās arī tās elementārais sastāvs un nedaudz samazinās slāpekļa saturs biomasā. Visu šo faktoru kopums būtiski ietekmē NO_x veidošanos degšanas zonā, ja palielinās mitruma saturs biomasā, izraisot NO_x koncentrācijas samazināšanos produktos (4.13. att.).



4.13. att. Propāna/butāna padeves un koksnes biomasas mitruma satura ietekme uz NO_x emisiju koncentrāciju produktos

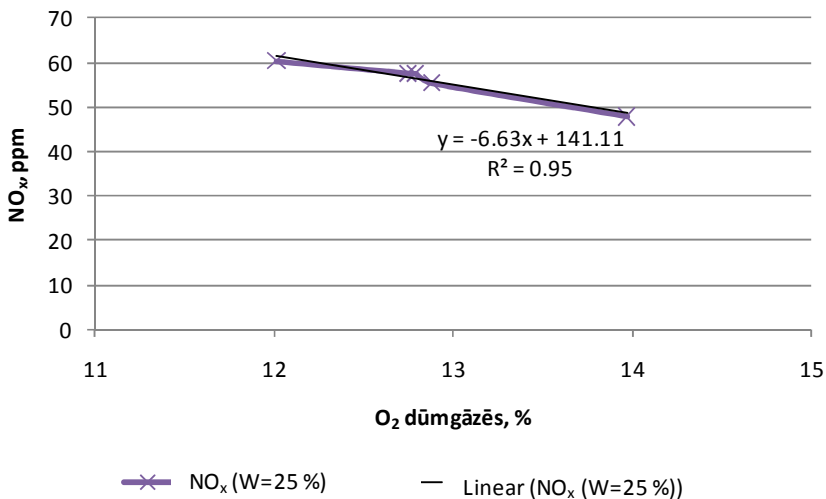
Rezultātu analīze apliecina, ka NO_x koncentrācijas izmaiņas produktos, palielinoties mitruma saturam biomasā, var raksturot, izmantojot lineāru aproksimāciju ar korelācijas koeficientu $R^2 = 0,82$, kas liecina par relatīvi nelielu NO_x koncentrācijas mērījumu rezultātu izkliedi:

$$y = -0,92W + 67,85 \quad (4.8)$$

Neliels ($\sim 20\%$) NO_x koncentrācijas pieaugums produktos ir vērojams, izmantojot propāna/butāna padevi degšanas zonā. Tomēr ir jāatzīmē, ka maksimālā NO_x koncentrācija produktos līdzdedzināšanas gadījumā nepārsniedz 70 ppm, ko nosaka nelielā slāpekļa koncentrācija koksnēs biomasā (0,18%), nodrošinot ekoloģiski tīru degšanas procesu. Arī līdzdedzināšanā ir vērojama NO_x koncentrācijas samazināšanās produktos, jo, palielinoties mitruma saturam koksnēs biomasā, palielinās gaisa padeves pārsvars, bet samazinās degšanas zonas temperatūra (4.3. att.), kuras samazināšanos nespēj kompensēt propāna/butāna padeve degšanas zonā, ja tās ātrums ir 1,27 kJ/s. NO_x koncentrācijas izmaiņas atkarībā no mitruma satura koksnē arī pie propāna/butāna padeves iekārtā var raksturot, izmantojot lineāro vienādojumu:

$$y = -0,57W + 72,76 \quad (4.9)$$

Respektīvi, palielinot mitruma saturu biomasā, tiek ierobežota NO_x emisiju veidošanās, ko izraisa degšanas zonas temperatūras izmaiņas (4.14. att.).



4.14. att. NO_x emisijas atkarībā no skābekļa daudzuma

No eksperimentālo mērījumu rezultātiem izriet, ka koksnēs biomasas mitruma satura un propāna/butāna padeves ietekmi uz relatīvajām $\text{NO}_{x\text{vid.}}/\text{NO}_{x\text{max}}$ izmaiņām ir iespējams aprakstīt, izmantojot vienādojumu (4.10). $\text{NO}_{x\text{vid.}}$ ir vidējā vērtība eksperimenta laikā, bet $\text{NO}_{x\text{max}}$ – maksimālā vērtība eksperimenta laikā.

$$\frac{\text{NO}_{x\text{vid.}}}{\text{NO}_{x\text{max}}} = 0,65 - 0,01W + 0,12q \quad (4.10)$$

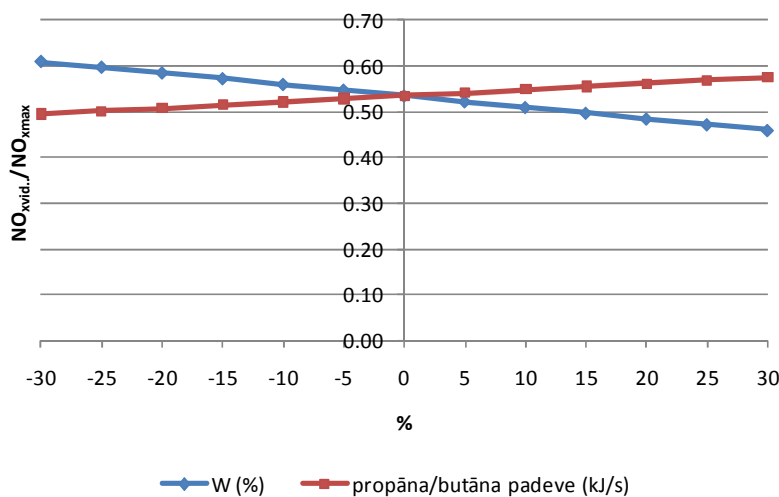
Empīriskajā vienādojumā (4.10) iegūto koeficientu statistiskais novērtējums ir parādīts 4.7 tabulā.

Regresijas vienādojuma ($\frac{NO_{xvid.}}{NO_{xmax}}$) koeficientu statistiskais novērtējums

Neatkarīgie mainīgie	Koeficienti	t statistika	P vērtība
b_0	0,65	16,11	0,000
b_1	-0,01	2,32	0,036
b_2	0,12	-6,39	0,000

Stjudenta kritērijs t_{tab} no sadalījuma tabulām pie $P = 0,05$ un $f = 17$ vērtības ir 2,10. Visos gadījumos ir spēkā sakarība $t > t_{tab}$, kas nozīmē, ka visi vienādojuma parametri ir būtiski un saglabājami vienādojumā. Iegūtā empīriskā vienādojuma korelācijas koeficients $R = 0,87$. Vienādojuma (4.10) adekvātums ir pārbaudīts, izmantojot Fišera kritēriju, kura vērtība ir $F = 22,49$, bet Fišera kritērija tabulas vērtība ir $F_{tab} = 2,1$. Sakarība $F > F_{tab}$ ir spēkā, kas liecina, ka vienādojums (4.10) ir adekvāts un tā lietojums ir korekts.

Veicot eksperimentālo rezultātu apstrādi, tika veikta arī $NO_{xvid.}/NO_{xmax}$ jutīguma analīze, kas parādīta 4.15. attēlā.

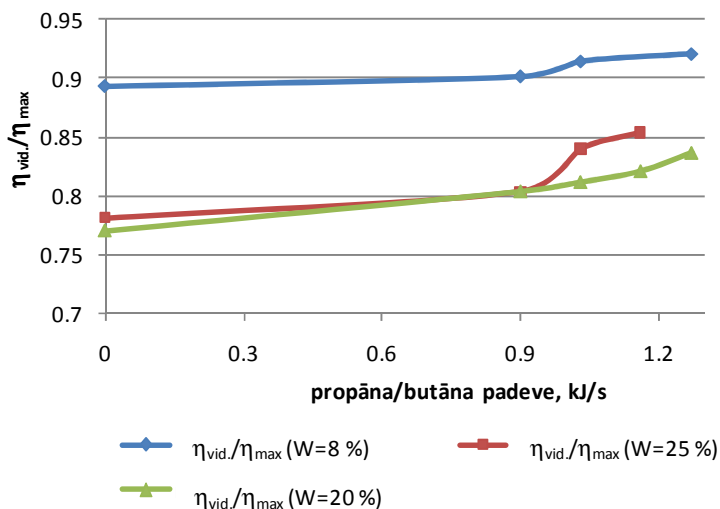


4.15. att. $NO_{xvid.}/NO_{xmax}$ jutīguma analīze

Papildus veiktās $NO_{xvid.}/NO_{xmax}$ izmaiņu jutīguma analīzes apliecina, ka, palielinoties mitruma saturam koksnes biomasā, attiecība samazinās, bet, palielinot propāna/butāna padevi iekārtā, relatīvā attiecība $NO_{xvid.}/NO_{xmax}$ palielinās.

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 biomasā ietekmē degšanas procesa efektivitāti (η), kas pieaug,

palielinot propāna/butāna padevi degšanas zonā, bet samazinās, palielinot mitruma saturu biomasā (4.16. att.).



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

Izvērtējot $\eta_{vid.}/\eta_{max}$, kas raksturo vidējās degšanas efektivitātes attiecību pret maksimālo efektivitāti, kas sasniegta eksperimenta laikā, ir konstatēts, ka augstāks $\eta_{vid.}/\eta_{max}$ rādītājs ir koksnes biomasai ar mazāku mitruma saturu ($W = 8\%$), bet propāna/butāna padeve degšanas zonā nodrošina degšanas procesa efektivitātes pieaugumu. Koksnes biomasas mitruma un propāna/butāna padeves ietekmi uz efektivitāti var aprakstīt, izmantojot lineāru vienādojumu:

$$\frac{\eta_{vid.}}{\eta_{max}} = 0,93 - 0,008W + 0,04q \quad (4.11)$$

Empīriskajā vienādojumā (4.11) iegūto koeficientu statistiskais novērtējums ir parādīts 4.8 tabulā.

4.8 tabula

Regresijas vienādojuma ($\frac{\eta_{vid.}}{\eta_{max}}$) koeficientu statistiskais novērtējums

Neatkarīgie mainīgie	Koeficienti	t statistika	P vērtība
b_0	0,93	44,77	0,000
b_1	-0,008	-6,99	0,000
b_2	0,04	3,34	0,007

Stjudenta kritērijs t_{tab} no sadalījuma tabulām pie $P = 0,05$ un $f = 17$ vērtības ir 2,10. Visos gadījumos ir spēkā sakarība $t > t_{tab}$, kas nozīmē, ka visi vienādojuma parametri ir būtiski un saglabājami vienādojumā. Iegūta empīriskā vienādojuma korelācijas koeficients $R = 0,92$ Vienādojuma (4.11) adekvātums ir pārbaudīts, izmantojot Fišera kritēriju, kura vērtība ir $F = 28,74$, bet Fišera kritērija tabulas vērtība

ir $F_{\text{tab}} = 2,1$. Sakarība $F > F_{\text{tab}}$ ir spēkā, kas liecina, ka vienādojums (4.11) ir adekvāts un tā lietojums ir korekts.

4.2. Magnētiskā lauka ietekmes uz degšanas procesu izpēte

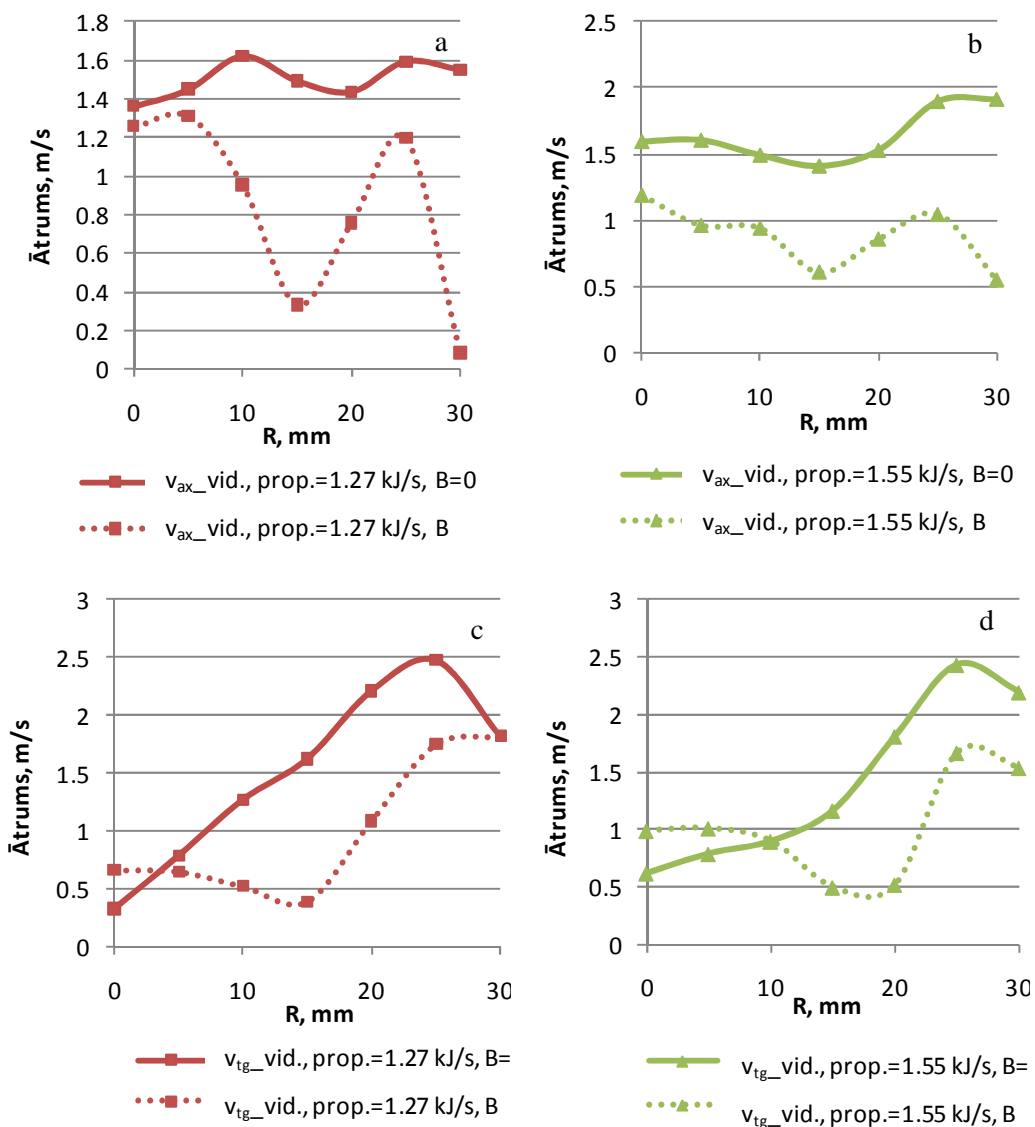
No iepriekš veikto pētījumu analīzes ir redzams, ka pastāv virkne faktoru, kas būtiski ietekmē degšanas procesa veidošanos un degšanas produktu sastāvu. Viens no veidiem, kā kontrolēt degšanas procesa veidošanos un degšanas produktu sastāvu, ir propāna/butāna padeve biomasā un līdzdedzināšana, intensificējot biomasas termisko sadalīšanos un gaistošo savienojumu sadedzināšanu. Iepriekš veiktie pētījumi ir apliecinājuši [32–36], 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.

Kā iepriekš jau bija minēts, 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, kuru izvērtēšana ir šī pētījuma mērķis. Izvērtējot magnētiskā spēka lielumu, ja magnētiskā lauka indukcija virs magnēta poliem maksimālo vērtību 100 mT sasniedz pie kanāla ārējās sienas, bet aksiālais magnētiskā lauka gradients $\frac{dB}{dL} \sim 1,2 \text{ T/m}$, ir konstatēts, ka magnētiskā lauka iedarbību uz liesmas dinamiku var novērot, ja šī spēka lielums ir samērojams ar plūsmas dinamisko spiedienu $f_m \approx \rho v^2$ un atbilst nosacījumam $v_{\text{ax}} \leq 0,2 \text{ m/s}$. Šī spēka lielums ir atkarīgs no brīvā skābekļa koncentrācijas liesmas virpuļplūsmā, sasniedzot maksimālo vērtību liesmas ārējā daļā, kur skābekļa koncentrācija sasniedz maksimālo vērtību.

4.2.1. Magnētiskā lauka ietekme uz degšanas procesa ātruma profiliem

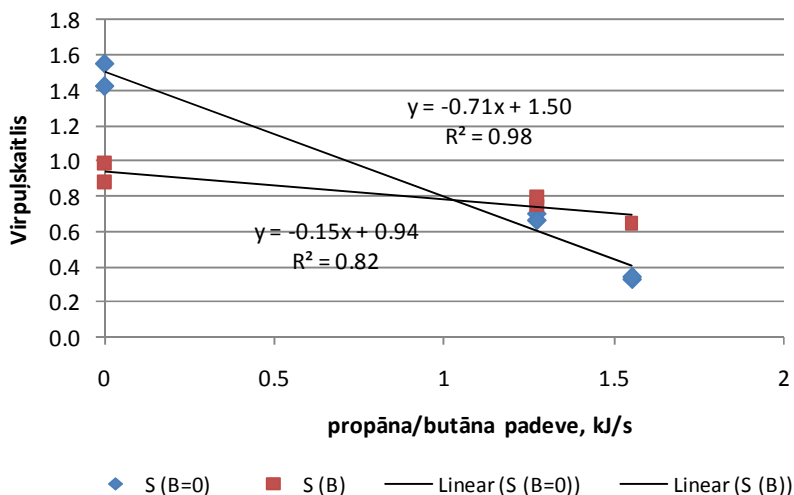
Magnētiskā lauka un liesmas mijiedarbība tika pētīta, salīdzinot koksnes granulu degšanas procesu bez propāna/butāna padeves iekārtā ($\text{prop.} = 0$), kā arī sadedzinot koksnes granulas ($W = 8 \%$) ar propāna/butāna padevi degšanas zonā, kuru nodrošina stehiometriskais propāna un butāna degšanas process gāzes deglī.

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.



4.17. att. Magnētiskā lauka ietekme uz liesmas aksiālā un tangenciālā ātruma sadalījumu veidošanos koksnes granulu degšanas procesā ar propāna/butāna padevi ($L/D \sim 2,6$)

Magnētiskā lauka gradienta izraisītā spēka un liesmas mijiedarbības rezultātā ir vērojamas virpuļplūsmas dinamikas izmaiņas ar izteiktu liesmas aksiālā un tangenciālā ātruma samazināšanos (4.17. att.). Pētījumu rezultāti apliecina, ka izteikta magnētiskā spēka iedarbība uz liesmas virpuļplūsmu ir vērojama liesmas ārējā daļā ($R = 20\text{--}25$ mm), kurā magnētiskā spēka lielums kļūst samērojams ar plūsmas dinamisko spiedienu ($\rho v^2/2$).



4.18. att. Magnētiskā lauka ietekme uz liesmas virpuļskaitļa izmaiņām pie dažādas propāna/butāna padeves degšanas zonā

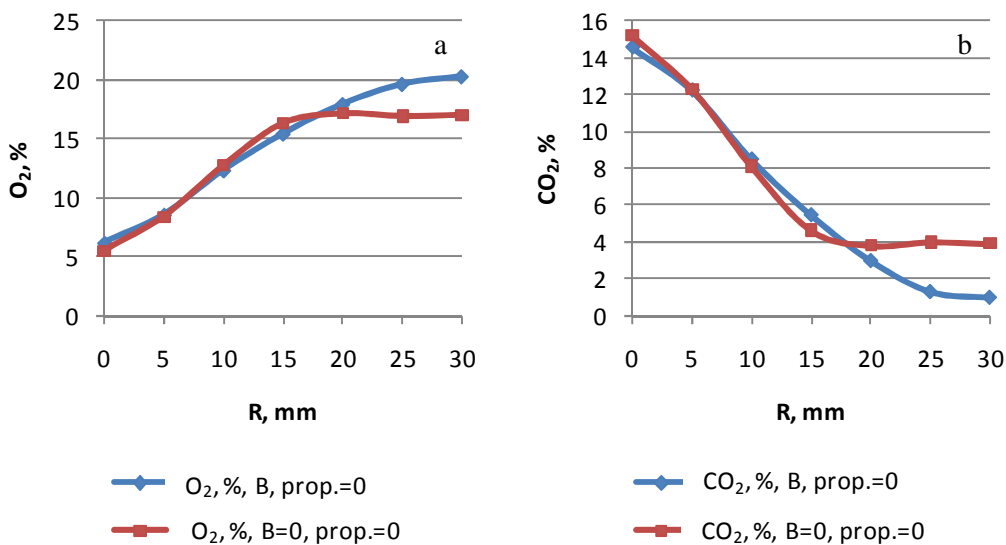
Propāna/butāna padeve degšanas zonā un magnētiskā lauka ietekme uz liesmas aksiālā un tangenciālā ātruma sadalījuma veidošanos ir saistīta ar liesmas virpuļskaitļa (S) izmaiņām, kas nosaka recirkulācijas zonas veidošanos un virpuļplūsmas intensitāti (4.18. att.). Kā izriet no eksperimentālo mērījumu rezultātiem, palielinot propāna/butāna padevi degšanas kamerā, liesmas virpuļskaitlis pakāpeniski samazinās. Respektīvi, propāna/butāna padeves izraisītais aksiālā ātruma pieaugums (4.1. att.) ierobežo recirkulācijas plūsmas veidošanos. No 4.18. attēla izriet, ka straujāka virpuļskaitļa samazināšanas notiek, ja uz liesmu neiedarbojas magnētiskais spēks (B = 0), bet magnētiskā spēka izraisītā aksiālā ātruma samazināšanās (4.17. a, b att.) sekmē virpuļskaitļa pieaugumu un recirkulācijas zonas veidošanos. Izvērtējot magnētiskā lauka ietekmi uz virpuļskaitli, ir konstatēts, ka magnētiskā lauka ietekme uz virpuļskaitļa izmaiņām ir samērā neliela, salīdzinot ar virpuļskaitļa izmaiņām, kuras nosaka propāna/butāna padeve degšanas zonā un kuras var aprakstīt ar vienādojumu:

$$S = 1,26 - 0,46q \quad (4.12)$$

Magnētiskā lauka ietekme uz virpuļplūsmas dinamiku pie dažādām propāna/butāna padevēm ir cieši saistīta ar koksnes gazifikācijas un degšanas procesu izmaiņām. Palielinot propāna/butāna padevi degšanas zonas pamatnē, tiek nodrošināta intensīvāka biomasas gazifikācija. Savukārt, ņemot vērā, ka magnētiskais spēks izraisa aksiālā un tangenciālā ātruma samazināšanos, var prognozēt, kas magnētiskā lauka un liesmas mijiedarbības procesā palielinās gaistošo savienojumu uzturēšanās ilgums degšanas zonā, nodrošinot pilnīgāku gaistošo savienojumu sadedzināšanu. Magnētiskā lauka ietekme uz degšanas zonas un degšanas produktu sastāva veidošanos ir pētīta un analizēta nākamajā apakšnodaļā.

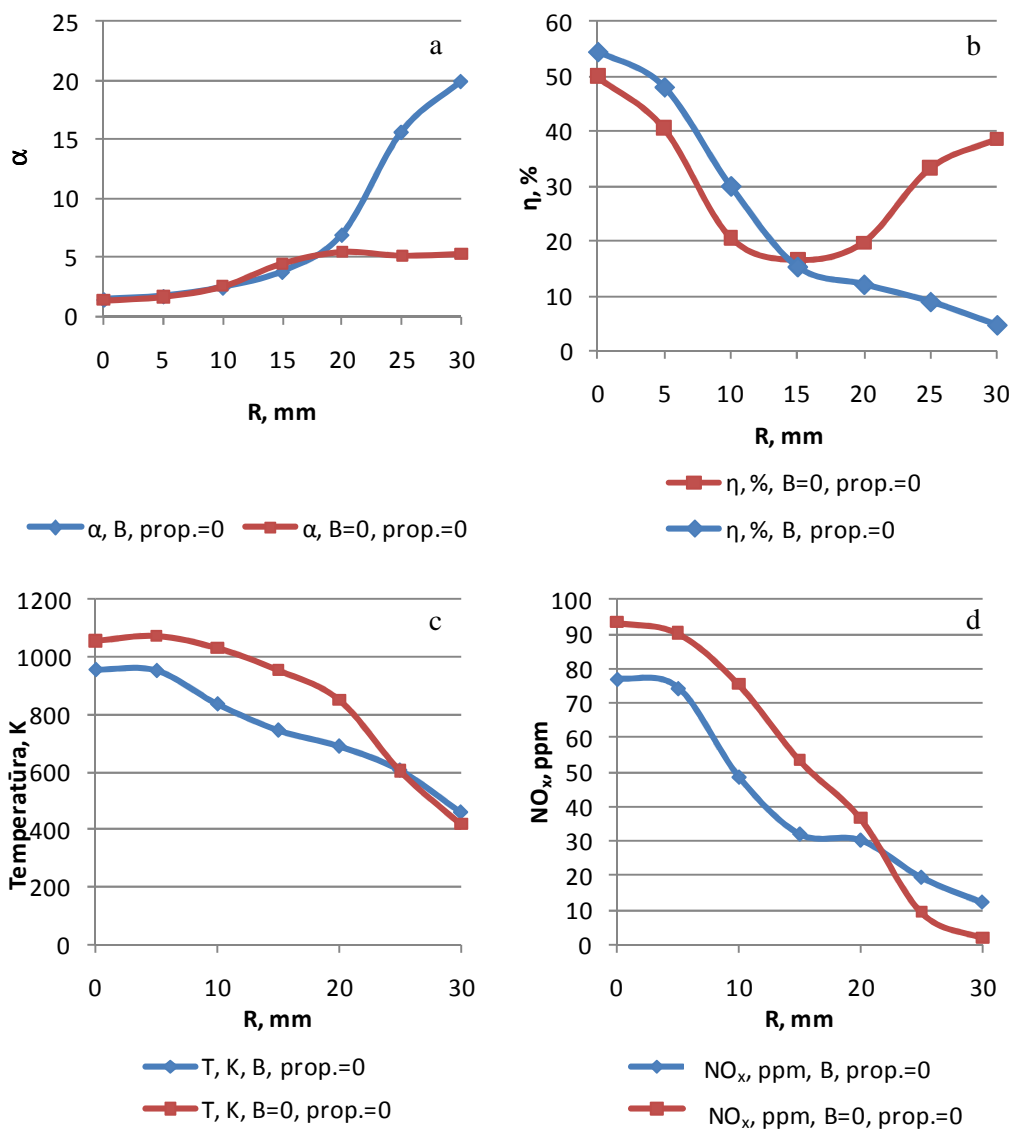
4.2.2. Magnētiskā lauka ietekme uz degšanas zonas veidošanos un degšanas produktu sastāvu

Liesmas dinamikas izmaiņas apliecina, ka magnētiskais spēks būtiski maina liesmas aksiālā un tangenciālā ātruma sadalījuma veidošanos degšanas zonas pamatnē, intensificējot savstarpēji saistīto paramagnētiskā skābekļa un siltuma pārnese virzienā uz biomasas slāņa virsmu. Lai noskaidrotu magnētiskā lauka ietekmi uz degšanas procesa izmaiņām, tika veikti degšanas zonas temperatūras un sastāva sadalījuma mērījumi, izvērtējot šo sadalījumu izmaiņas magnētiskā spēka iedarbības rezultātā, kad magnētiskais lauks veicina paramagnētisko liesmas komponentu (O_2 un NO_x) masas pārnese lauka gradienta virzienā un diamagnētisko liesmas komponentu (ogļūdeņraži) pārnese pretējā virzienā, izraisot būtiskas šo komponentu radiālā sadalījuma izmaiņas.



4.19. att. Skābekļa (a) un oglekļa dioksīda (b) vidējās tilpuma koncentrācijas radiālā sadalījuma izmaiņas liesmas un magnētiskā spēka mijiedarbības rezultātā

Veicot skābekļa tilpuma koncentrācijas radiālā sadalījuma izmaiņu mērījumus magnētiskajā laukā bez propāna/butāna padeves degšanas zonas pamatnē, ir konstatēts, ka magnētiskā spēka izraisītā paramagnētiskā skābekļa pārnese lauka gradienta virzienā izraisa skābekļa koncentrācijas pieaugumu liesmas ārējā daļā (4.19. a att.), ierobežojot CO_2 veidošanos (4.19. b att.). Pamatā tas ir izskaidrojams ar magnētiskā lauka izraisīto paramagnētiskā skābekļa pārnese virzienā uz liesmas ārējo daļu, samazinot degšanas zonas temperatūru (4.20. c att.) un degšanas procesa efektivitāti (4.20. b att.).



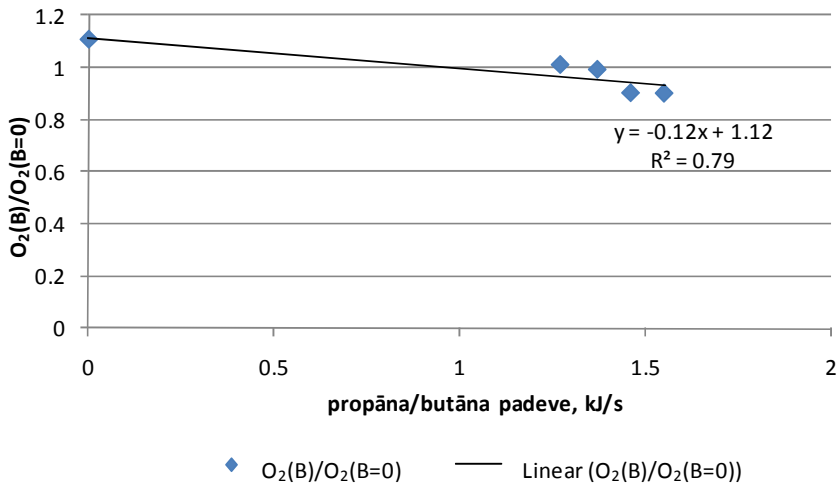
4.20. att. Gaisa patēriņa koeficienta (a), degšanas procesa efektivitātes (b), temperatūras (c) un NO_x (d) emisiju radiālā sadalījuma izmaiņas

Magnētiskā spēka izraisītā paramagnētiskā skābekļa pārnesē lauka gradienta virzienā, izraisot temperatūras samazinājumu degšanas zonas pamatnē, nodrošina NO_x emisiju samazinājumu, salīdzinot ar gadījumu, kad koksnes granulas tika dedzinātas, nelietojot magnētisko lauku.

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).

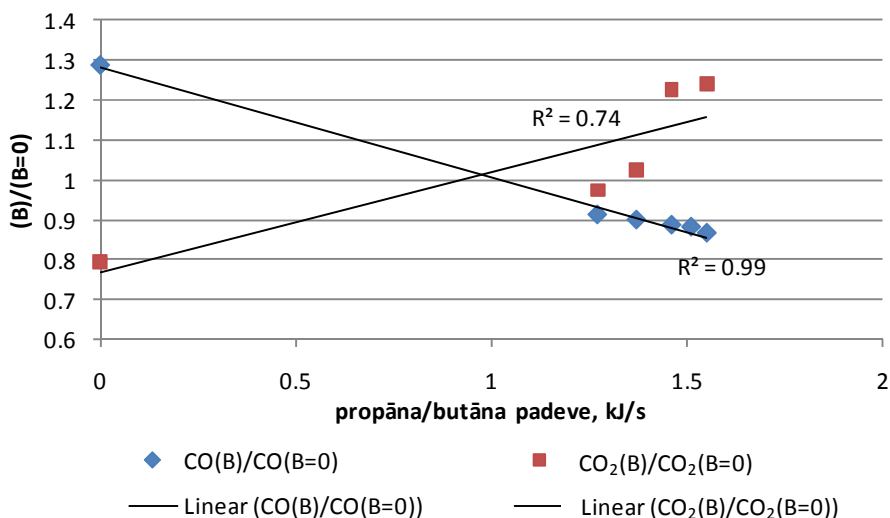
4.21. attēlā ir parādīts, kā mainās $O_2(B)/O_2(B=0)$ attiecība atkarībā no propāna/butāna padeves eksperimentu laikā.



4.21. att. Propāna/butāna padeves ietekme uz $O_2(B)/O_2(B=0)$

Kā redzams 4.21. attēlā, lielākas $O_2(B)/O_2(B=0)$ attiecības izmaiņas ir novērojamas, sadedzinot koksnes granulas bez gāzes maisījuma padeves, šī attiecība samazinās, ja palielinās propāna/butāna padeve degšanas zonas pamatnē. Sadedzinot koksnes granulas bez propāna/butāna padeves degšanas zonas pamatnē, $O_2(B)/O_2(B=0)$ 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, $O_2(B)/O_2(B=0)$ 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 uzsildīšana, nodrošinot karstākas siltuma plūsmas pārnesi uz granulu virsmu, tā uzlabojot koksnes biomasas gazifikāciju un nodrošinot intensīvāku gaistošo savienojumu veidošanos. Novērotās $O_2(B)/O_2(B=0)$ attiecības izmaiņas liecina, ka paramagnētiskā skābekļa pārnese lauka gradienta virzienā liesmas ārējā daļā izraisa temperatūras samazināšanos degšanas zonas pamatnē, kuru var novērst, izmantojot propāna/butāna padevi, kas nodrošina degšanas procesa intensifikāciju. $O_2(B)/O_2(B=0)$ attiecības izmaiņu analīze apliecina, ka šo izmaiņu atkarību no propāna/butāna padeves ātruma degšanas zonas pamatnē var aprakstīt ar lineāro vienādojumu, kas ir parādīts 4.21. attēlā.

$O_2(B)/O_2(B=0)$ attiecību sadalījums atkarībā no propāna/butāna padeves ietekmē $CO_2(B)/CO_2(B=0)$ attiecības izmaiņas, kas redzamas 4.22. attēlā.



4.22. att. Propāna/butāna padeves ietekme uz CO₂(B)/CO₂(B=0) un CO(B)/CO(B=0)

Pretēji skābekļa koncentrācijas izmaiņām, lielāka CO₂(B)/CO₂(B=0) attiecība koksnes granulu degšanas procesam ir novērota, palielinot propāna/butāna padevi degšanas zonas pamatnē, bet šī attiecība samazinās, ja koksnes granulas tiek dedzinātas bez propāna/butāna padeves degšanas zonas pamatnē. Respektīvi, 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. Ņemot vērā, ka CO₂ ir pilnīgas gaistošo savienojumu sadegšanas produkts, var secināt, ka, kombinējot propāna/butāna padevi degšanas zonas pamatnē ar magnētiskā spēka izraisītu paramagnētiskā skābekļa pārnesi, var nodrošināt pilnīgāku gaistošo savienojumu sadedzināšanu. Propāna/butāna padeves ietekme uz CO₂(B)/CO₂(B=0) ir aprakstāma ar lineāro vienādojumu:

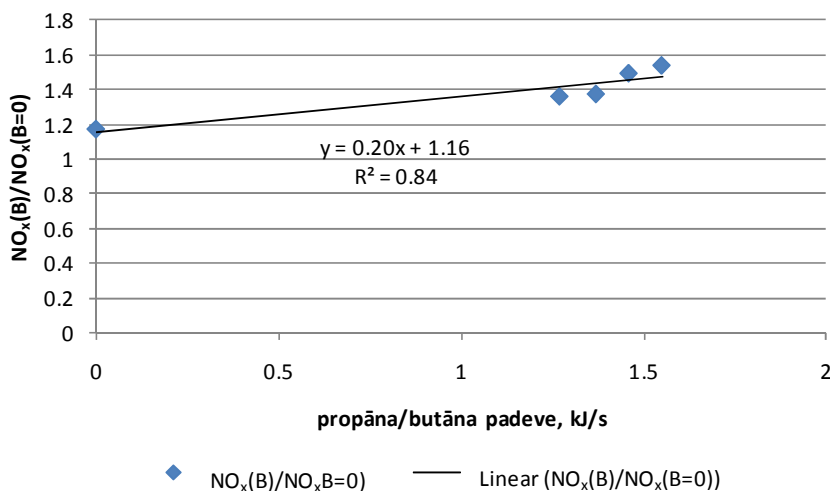
$$\frac{CO_2(B)}{CO_2(B=0)} = 0,25q + 0,77 \quad (4.13)$$

Oglekļa monoksīds ir gaistošo savienojumu nepilnīgas sadedzināšanas produkts. Sadedzinot kurināmo, ir svarīgi radīt tādus apstākļus, lai nodrošinātu pilnīgu gaistošo savienojumu sadedzināšanu, samazinot CO emisiju koncentrāciju produktos. 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 (4.22. 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 propāna/butāna 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:

$$\frac{CO(B)}{CO(B=0)} = -0,28q + 1,28 \quad (4.14)$$

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 4.23. attēlā.



4.23. att. Propāna/butāna padeves ietekme uz $NO_x(B)/NO_x(B=0)$

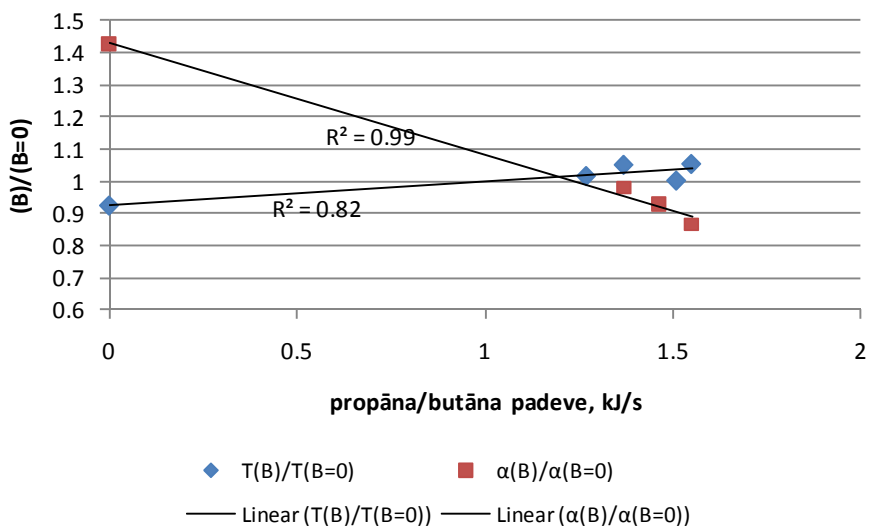
Kā redzams 4.23. attēlā, koksnes granulu degšanas procesā $NO_x(B)/NO_x(B=0)$ attiecības pieaugums vērojams, palielinot propāna/butāna padevi degšanas zonas pamatnē. Attēlā arī parādīts, ka visos gadījumos $NO_x(B)/NO_x(B=0)$ attiecība ir lielāka par 1, kas nozīmē, ka magnētiskā lauka izmantošana intensificē NO_x veidošanos ar lielāku NO_x emisiju izplūdi atmosfērā. Tas ir jāvērtē kā negatīvs lauka un liesmas mijiedarbības rezultāts, jo NO_x emisiju faktors ir 250 reizes lielāks, nekā CO_2 emisiju faktors. Tomēr jāatzīmē, ka maksimālais NO_x daudzums, kas rodas līdzdedzināšanas rezultātā, ir relatīvi neliels un nepārsniedz 140 mg/nm^3 .

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 izmaiņas, kas redzamas 4.24. attēlā.

$\alpha(B)/\alpha(B=0)$ attiecība samazinās, palielinot propāna/butāna padevi degšanas zonas pamatnē (līdzīgi $O_2(B)/O_2(B=0)$ attiecībai). Šī attiecība ir redzama 4.24. attēlā un aprakstāma ar lineāro vienādojumu:

$$\frac{\alpha(B)}{\alpha(B=0)} = 0,35q + 1,43 \quad (4.15)$$

4.24. attēlā ir redzams, ka $T(B)/T(B=0)$ attiecības izmaiņas ir atkarīgas no propāna/butāna padeves degšanas zonas pamatnē.

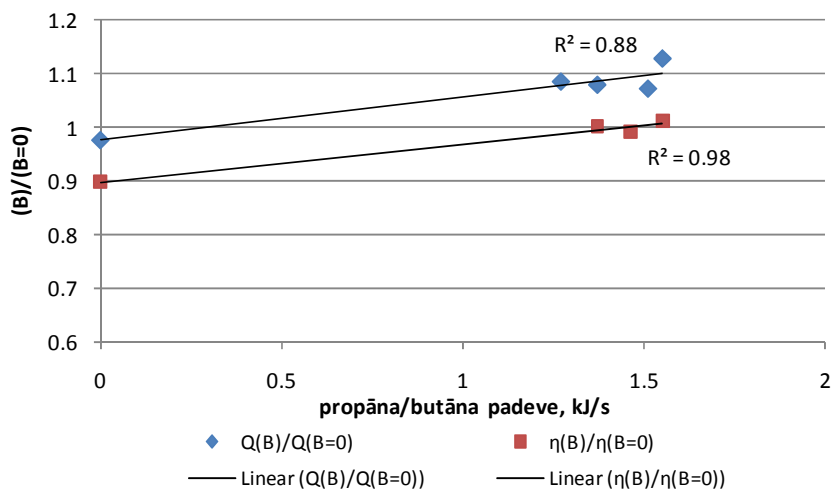


4.24. att. Propāna/butāna padeves ietekme uz $\alpha(B)/\alpha(B=0)$ un $T(B)/T(B=0)$

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:

$$\frac{T(B)}{T(B=0)} = 0,07q + 0,93 \quad (4.16)$$

Izvērtējot magnētiskā lauka un propāna/butāna padeves ietekmi uz degšanas procesa veidošanos, ir izvērtēta arī šo faktoru ietekme uz degšanas procesa efektivitāti un sarazoto siltumenerģiju. Rezultāti ir apkopoti 4.25. attēlā.



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

Kā izriet no 4.25. attēla, propāna/butāna padeves ietekme uz liesmas un magnētiskā lauka mijiedarbības procesu $\eta(B)/\eta(B=0)$ ir aprakstāma ar lineāro vienādojumu:

$$\frac{\eta(B)}{\eta(B=0)} = 0,07q + 0,90 \quad (4.17)$$

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.

Pabeidzot pētījumus par propāna/butāna padeves un magnētiskā lauka ietekmi uz koksnes biomasas gazifikāciju un gaistošo savienojumu sadedzināšanu, tika veikti pētījumi par magnētiskā lauka ietekmi uz saražotās siltuma enerģijas daudzumu iekārtā. 4.25 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. P propāna/butāna ietekme uz attiecību $Q(B)/Q(B=0)$ ir aprakstāma ar lineāro vienādojumu:

$$\frac{Q(B)}{Q(B=0)} = 0,08q + 0,98 \quad (4.18)$$

4.25. attēlā ir redzams, ka magnētiskā lauka un liesmas mijiedarbības rezultātā vērojams saražotā siltuma daudzuma pieaugums, kas palielinās, palielinot propāna/butāna padevi iekārtā. Tas vēlreiz apliecina faktu, ka, kombinējot magnētiskā lauka un liesmas mijiedarbības efektu, ko nosaka paramagnētiskā skābekļa pārnese lauka gradienta virzienā ar propāna/butāna padevi degšanas zonas pamatnē, var nodrošināt pilnīgāku gaistošo savienojumu sadedzināšanu ar saražotās siltuma enerģijas pieaugumu granulētās koksnes biomasas degšanas procesā.

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 satura koksnes granulas ar propānu/butānu, tika izdarīti vairāki secinājumi:
 - 2.1. koksnes granulu termiskās sadalīšanās procesa sākuma stadijas ilgums ir būtiski atkarīgs no mitruma satura 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 %, CO_{2vid}/CO_{2max} bija 0,47, bet CO_{vid}/CO_{max} – 0,04, savukārt dedzinot koksnes granulas ar mitruma saturu 25 %, CO₂ relatīvais lielums samazinājās par 23 %, bet CO relatīvais lielums palielinājās par 70 %. Dedzinot koksnes granulas ar mitruma saturu 25 % ar propāna/butāna padevi CO₂ 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 CO₂ 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 CO_2 veidošanos, samazinot degšanas zonas temperatūru un degšanas procesa efektivitāti;
- 3.3. attiecība $O_2(B)/O_2(B=0)$ 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 $CO_2(B)/CO_2(B=0)$ 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 pārnesi, 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 %.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA

1. Eiropas Parlaments un Eiropas Savienības Padome. Direktīva 2009/28/EK par atjaunojamo energoresursu izmantošanas veicināšanu. – Eiropas Savienības Oficiālais Vēstnesis, 2009. – 46 lpp.
2. Energy, Transport and Environment Indicators. – EUROSTAT European Commission. – 2012. – 240 p.
3. European Environment Agency: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/primary-energy-consumption-by-fuel-3/assessment> [25.04.13.]
4. Williams A., Jones J.M., Ma L., Pourkashanian M. Pollutants from the combustion of solid biomass fuels, Progress in Energy and Combustion Science // Progress in Energy and Combustion Science. – 2012. – Vol.38. – 113-137 p.
5. 2011 Annual Statistical Report on the contribution of Biomass to the Energy System in the EU-27. – AEBIOM – European Biomass Association. – 2011. – 108 p.
6. EUROSTAT datubāze: http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/statistics/search_database [05.05.13.]
7. LR Centrālās statistikas pārvaldes datu bāze par enerģētiku: <http://www.csb.gov.lv> [20.03.2013.]
8. Valsts meža dienests: <http://www.vmd.gov.lv/?sadala=2> [25.04.13.]
9. Arena U., Zaccariello L., Mastellone M. Gasification of natural and waste biomass in a pilot scale fluidized bed reactor // Combustion Science and Technology. – 2010. – Nr.182. – 625-639 p.
10. Vassilev S.V., Baxter D., Andersen L.K., Vassileva C.G. An overview of the chemical composition of biomass // Fuel. – 2010. – Vol.89. – 913-933 p.
11. Villeneuve J., Palacios J.H., Savoie P., Godbout S. A critical review of emission standards and regulations regarding biomass combustion in small scale units (<3MW) // Bioresource technology. – 2012. – Vol.111. – 1-11 p.
12. Cuiping L., Chuangzhi W. Chemical elemental characteristics of biomass fuels in China, // Biomass and Bioenergy. – 2004. – Nr.27. – 119-130 p.

13. Van Loo S., Koppejan J. The Handbook of Biomass Combustion & Co-firing. – UK: CPI Antony Rowe. – 2008. – 442 p.
14. Yang H., Yan R., Chen H. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis // Fuel. – 2007. – Nr.86. – 1781-1788 p.
15. Pasangulapati V., Ramachandriya K.D., Kumar A. Effects of cellulose, hemicellulose and lignin on thermochemical conversion characteristics of the selected biomass // Bioresource Technology. – 2012. – Nr.114. – 663–669 p.
16. Blumberga D., Veidenbergs I., Romagnoli F. Bioenerģijas tehnoloģijas. – Rīga: RTU Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts. – 2011. – 272 lpp.
17. Obernberger I., Brunner T., Barnthaler G. Chemical properties of solid biofuels – significance and impact // Biomass and Bioenergy. – 2006. – Nr.30. – 973-982 p.
18. Demibras A. Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals // Energy Conversion and Management. – 2001. – Nr.42. – 1357-1378 p.
19. Роддатис К.Ф. Котельные установки. – Москва: Энергия. – 1977. – 432 стр.
20. Делягин Г.Н. Теплогенерирующие установки. – Москва: Стройиздат. – 1986. – 559 стр.
21. Signal K.L., Langridge S., Zhou J.L. Release of polycyclic aromatic hydrocarbons, carbon monoxide and particulate matter from biomass combustion in a wood-fired boiler under varying boiler conditions // Atmospheric Environment. – 2008. – Vol.42. – 8863-8871 p.
22. Bhattacharya S.C., Albina D.O., Khaing A.M. Effect of selected parameters on performance and emission of biomass-fired cookstoves // Biomass and Bioenergy. – 2002. – Vol.23. – 387-398 p.
23. Yuntenwi E., MacCarty N., Still D., Ertel J. Laboratory study of the effect of moisture content on heat transfer and combustion efficiency of three biomass cook stoves // Energy Sustainable Development. – 2008. – Vol.XII(2) – 66-77 p.
24. Gedrovičs M. Nekustamā īpašuma pārvaldnieks. Teorētiskie un tehniskie aspekti – Rīga: Biznesa augstskola Turība. – 2002. – 288 lpp.
25. Shen D.K., Gu S., Luo K.H., Bridgwater A.V., Fang M.X., Kinetic Study on thermal decomposition of woods in oxidative environments // Fuel. – 2009. – Vol.88. – 1024-1030 p.

26. Nussbaumer T., Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction // *Energy&Fuels*. – 2003. – Vol.17. – 1510-1521 p.
27. Balat M. Gasification of Biomass to Produce Gaseous Products // *Energy Sources.-Part A*. – 2009. – Nr.31. – 516-526 p.
28. Balat M. Mechanisms of Thermochemical Biomass Conversion Processes. Part 2: Reactions of Gasification // *Energy Sources.-Part A*. – 2008. – Nr.30. – 636-648 p.
29. Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems. – USA: U.S. Government Printing Office, 1984. – 140 p.
30. Lickrastina A., Barmina I., Suzdalenko V., Zake M. Gasification of pelletized renewable fuel for clean energy production // *Fuel*. – 2011. – Nr.90. – 3352-3358 p.
31. Demibras A., Combustion characteristics of different biomass fuels // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2004. – Nr.30. – 219-230 p.
32. Померанцев В.В., Арефьев К.М., Ахмедов Д.Б. Основы практической теории горения. – Москва: Энергия. – 1973. – 311 стр.
33. Barmina I., Desņickis A., Meijere A., Zake M. Development of Biomass Co-firing Technology to Reduce Greenhouse Gaseous Emissions // *Advanced Combustion and Aerothermal Technologies: Environmental Protection and Pollution Reductions*. – 2006. – 1-10 p.
34. Zake M., Barmina I., Gedrovičs M., Desņickis A. Effective Technology of Wood and Gaseous Fuel Co-firing for Clean Energy Production // *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences* – 2007. – Nr.2. – 41-57p.
35. Гупта А., Лилли Д., Сайдер Н. Закрученные потоки. – Москва: Мир. – 1987. – 584 стр.
36. Linck M., Armani M. and Gupta A.K. Effect of swirl and fuel pulsation on flame dynamics, flame structure and droplet dynamics in swirl stabilized spray flames // *In proceedings of the 6th Annual ASME Power Conference*. – 2004. – Baltimore.
37. Huang Y., Yang V. Effect of swirl on combustion dynamics in a lean-premixed swirl-stabilized combustor // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2005. – Vol.30. – 1775-1782 p.

38. Palies P., Durox D., Schuller T., Candel S. The combined dynamics of swirled and turbulent premixed swirling flames // *Combustion and Flame*. – 2010. – Nr.157. – 1698-1717 p.
39. Syred N. A review of oscillation mechanisms and the role of the processing vortex core (PVC) in swirl combustion systems // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2006. – Nr.32. – 159-161 p.
40. Par recirkulācijas zonu. Physics of Swirling Flow: <http://www.personal.psu.edu/yxw145/physics%20of%20swirling%20flow.htm> [27.04.2013.]
41. Tang G., Yang Z., McGuirk, J.J. Large eddy simulation of isothermal confined swirling flow with recirculation // *Engineering Turbulence Modelling and Experiments*. – 2002. – Vol.5. – 875-901 p.
42. 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. – 3-15 p.
43. Barmina, I., Desnickis, A., Zake, M. The Effect of Combustion Dynamics on the Formation of Pollutant Emissions by Co-firing the Wood Biomass with Gaseous Fuel. // *Heat Transfer Research*. – 2008. – Vol.39., Nr.5. – 379-389 p.
44. Zhen H.S., Leung C.W., Cheung C.S. Thermal and emission characteristics of a turbulent swirling inverse diffusion flame // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2010. – Nr.53. – 902-909 p.
45. Barmina I., Gedrovičs M., Kriško V., Zaķe M. Co-Firing of The Renewable with Fossil Fuel for the Clean and Effective Heat Energy Production // *RTU zinātniskie raksti. 13. sēr., Vides un klimata tehnoloģijas*. – 2009. – 2. sēj. – 21-29 lpp.
46. Stubenberger G., Scharler R., Zahirovics S., Obernberger I. Experimental investigation of nitrogen species release from different solid biomass fuels as a basis for release models // *Fuel*. – 2008. – Nr.87(6) – 793-806 p.
47. Löffler G., Sieber R., Harasek M., Hofmauer H., Hauss R., Landauf J. NO_x formation in natural gas combustion – a new simplified reaction scheme for CFD calculations // *Fuel*. – 2006. – Nr.85. – 513-523 p.
48. Khan A.A., De Jong W., Jansens P.J., Spliethoff H. Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies // *Fuel*. – 2009. – Nr.90. – 21-50 p.

49. 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.
50. Barmina I., Buceniēks I., Gedrovičs M., Kriško V., Zaķe M. The Magnetic Field Effect on the Swirling Combustion of the Renewable Fuel // RTU zinātniskie raksti. 13. sēr., Vides un klimata tehnoloģijas. – 2009. – 3. sēj. – 11-18 lpp.
51. Barmina I., Zake M., Kriško V., Gedrovičs M. Modification of Wood Pellets and Propane Co-firing in a Magnetic Field // RTU zinātniskie raksti. 13. sēr., Vides un klimata tehnoloģijas. – 2010. – 4. sēj. – 16-21 lpp.
52. 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.
53. Suzdalenko V., Zake M., Barmina I., Gedrovičs M. The Effect of Varying Magnetic Gradient on Combustion Dynamic // RTU zinātniskie raksti. 13. sēr., Vides un klimata tehnoloģijas. – 2011. – 6. sēj. – 100-105 lpp.
54. Barmina I., Lickrastina A., Suzdalenko V., Zake M. Gradient magnetic field promotion of pelletized biomass combustion // Magnetohydrodynamics. – 2012. – Vol.48. – 351-360 p.
55. Berndes G., Hansson J., Egeskog A., Johnsson F. Strategies for 2nd generation biofuels in EU – Co-firing to stimulate feedstock supply development and process integration to improve energy efficiency and economic competitiveness // Biomass and Bioenergy. 2010. – Nr.34. – 227-236 p.
56. Al-Mansour F., Zuwala J. An evaluation of biomass co-firing in Europe // Biomass and Bioenergy. – 2010. – Vol.34. – 620-629 p.
57. IEA datubāze par biomasas līdzdedzināšanas tehnoloģijām: <http://www.ieabcc.nl/database/cofiring.php> [30.04.2013.]
58. Blumberga D., Ozoliņa L., Rošā M. Līdzsadedzināšana – no izpētes līdz pielietojumam: Tehnoloģiju un biomasas piegādes prasmju veicināšana Centrālās un Austrumeiropas valstīs. – Rīga, COFITECK projekts, 2009. – 72 lpp.
59. Basu P., Butler J., Leon M. A. [Biomass co-firing options on the emission reduction and electricity generation costs in coal-fired power plants](#) // Renewable Energy. – 2011. – Nr.36. – 282-288 p.

60. Marbe A., Harvey S., Berntsson T. Technical, environmental and economic analysis of co-firing of gasified biofuel in a natural gas combined cycle (NGCC) combined heat and power (CHP) plant // *Energy*. – 2006. – Nr.31. – 1614 – 1631 p.
61. Fiaschi D., Carta R. CO₂ abatement by co-firing of natural gas and biomass-derived gas in a gas turbine // *Energy*. – 2007. – Nr.32. – 549-567 p.
62. Rodrigues M., Faaij A., Walter A. Co-firing natural gas and biomass gas in biomass integrated gasification/combined cycle systems // *Energy*. – 2003. – Nr.28. – 1115 – 1131 p.
63. Savolainen K. [Co-firing of biomass in coal-fired utility boilers](#) // *Applied Energy*. – 2003. – Nr.74. – 369-381 p.
64. Biomass Co-firing with coal at Lakeland Utilities // Final Report to The United States Department Of Energy. – 1997.-1998.
65. DONG Energy:
<http://www.dongenergy.com/SiteCollectionDocuments/NEW%20Corporate/PDF/Engineering/48.pdf> [30.04.13.]
66. Faraday M. On the Diamagnetic Conditions of Flames and Gases // *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. – 1847. – Vol.31. – 401-421 p.
67. Strayer B.A., Dunn-Rankin D. Dynamic Response of a Non-Premixed Flame to Electric Field Forcing // University of California. – 2001.
68. Won S.H., Cha M.S., Park C.S., Chung C.H. Effect of electric fields on reattachment and propagation speed of tribrachial flames in laminar co flow jets // *Proceedings of Combustion Institute*. – 2007. – Vol.31. – 963-970 p.
69. Zaķe M., Barmina I., Turlajs D., Lubāne M., Krūmiņa A. Swirling Flame. Part 2. Electric Field Effect on the Soot Formation and Greenhouse Emissions // *Magnetohydrodynamics*. – 2004. – Vol.40. – 183-202 p.
70. Dūmiņš I. Elektrība un magnētisms. Lekciju konspekts: <https://moodle.rtu.lv/public/file.php/43145/lekciju%20konspekti/14.pdf> [28.04.2013.]
71. Swaminathan S. Effects of Magnetic Field on Micro Flames // A thesis for the degree of Master of Science in Mechanical Engineering. Louisiana State University.– 2005. – 117 p.

72. Aoki T. Radical Emissions and Anomalous Reverse Flames Appearing in Upward-Increasing Magnetic Fields // Japanese Journal of Applied Physics. – 1990. – Vol.29. – 181-190 p.
73. Tanaka H., Yoshida K., Kimura M., Shoji H., Saima A., Hgaki M. Experimental Study of Diffusion and Stabilization on Diffusion Flames in Magnetic Field // Proceedings of ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting Symposia. – 2003. – Vol.2. – 91-98 p.
74. Wakayama N.I. Behavior of Gas Flow under Gradient Magnetic Fields // Journal of Applied Physics. – 1991. – Vol.69. (4) – 2734-2736 p.
75. Wakayama N.I. Magnetic promotion of combustion on diffusion flames // Combustion and Flame. – 1993. – Vol.93. – 207-214 p.
76. Wakayama N.I., Ito H., Kurada Y., Fujita O., Ito K. Magnetic support of combustion in diffusion flames under microgravity // Combustion and Flame. – 1996. – Nr.107. – 189-192 p.
77. Yamada E., Shinoda M., Yamashita H., Kitagawa K. Numerical analysis of H₂/O₂ diffusion flame in vertical or horizontal gradient magnetic field // Combustion Science Technology. – 2002. – Nr.174. – 131 p.
78. Yamada E., Shinoda M., Yamashita H., Kitagawa K. Experimental and numerical analyses of magnetic effect on OH radical distribution in a hydrogen-oxygen diffusion flame // Combustion Flame. – 2003. – Nr.135. – 365-379 p.
79. Baker J., Calvert M.E. A study of the characteristics of slotted laminar jet diffusion flames in the presence of non-uniform magnetic fields // Combustion and Flame. – 2003. – Vol.133. – 345-357 p.
80. Barmina I., Desnickis A., Zake M. The Influence of Electric Field on the Development of the Swirling Flame Velocity Field and Combustion Characteristics // Proceedings of 5-BHTC. Sankt-Petersburg. – 2007. – 480-486 p.
81. Barmina I., Desņickis A., Meijere A., Zake M. Active electric control of emissions from the combustion // Springer. NATO publishing. – 2007. – 405-412 p.
82. Koksnes biomasas vietējo resursu racionālā izmantošana siltuma ražošanai kombinētā koksnes un gāzveida kurināmā kombinētā degšanas procesā // LU Fizikas institūts Siltuma un masas pārnese laboratorija, ERAF projekts, Rīga, 2006.

83. Dundurs J. Darba aizsardzības prasības nodarbināto aizsardzībai pret elektromagnētiskā lauka radīto risku darba vidē. – Rīga: Jelgavas tipogrāfija. – 2006. – 50 lpp.
84. Testo 350 M/XL Short Operation Instruction Manual, www.testo.com [20.02.2013.]
85. Грачёв Ю. Математические методы планирования экспериментов. – Москва: Московская типография №6. – 1978. – 199 стр.
86. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – Москва: Наука. – 1976. – 278 стр.
87. Veidenbergs I., Blumberga A. Ēku energopatēriņa regresijas modelis // Proceedings of International Scientific Conference “Power and Electrical Engineering”. – Riga, Latvia, October 11 – 13, 2001. – 125–130 p.