

Antons Kolmičkovs

ELEKTRISKĀ LAUKA IETEKME UZ GRANULĒTAS BIOMASAS DEGŠANU VIRPUĻPLŪSMĀ

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultāte

Mehānikas un mašīnbūves institūts

Antons Kolmičkovs

Doktora studiju programmas „Inženiertehnika, mehānika un mašīnbūve” doktorants

**ELEKTRISKĀ LAUKA IETEKME UZ
GRANULĒTAS BIOMASAS DEGŠANU
VIRPUĻPLŪSMĀ**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji:

Dr. sc. ing.

INESA BARMINA

Dr. sc. ing.

SERGEJS VOSTRIKOVS

RTU Izdevniecība

Rīga 2022

Kolmičkovs A. Elektriskā lauka ietekme uz granulētas biomasas degšanu virpuļplūsmā. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2022. – 50 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-04” 2021. gada 19. oktobra lēmumu, protokols Nr. 47.

Vāka attēla autors Antons Kolmičkovs.

Darbs izstrādāts Latvijas Universitātes Fizikas institūta Siltuma un masas pārnese laboratorijā un Rīgas Tehniskā universitātes Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultāte Mehānikas un mašīnbūves institūta Siltumenerģētisko sistēmu katedrā.

Promocijas darbs izstrādāts ar ERAF fonda atbalstu projektos “Granulētas biomasas degšanas procesu dinamikas regulēšana un uzlabošana elektrisko spēku laukā” 2DP/2.1.1.1.0/APIA/VIAA/004 un “Biomasas kombinēto degšanas procesu pētījumi un elektrodinamiskā vadība ekoloģiski tīrai un efektīvai enerģijas ražošanai” SAM 1.1.1.1/16/A/004.

NATIONAL
DEVELOPMENT
PLAN 2020



EUROPEAN UNION
European Regional
Development Fund

I N V E S T I N G I N Y O U R F U T U R E

<https://doi.org/10.7250/9789934227264>

ISBN 978-9934-22-726-4 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2022. gada 4. februārī plkst. 14.30 Rīgas Tehniskās universitātes Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultātē, Ķīpsalas ielā 6B, 521. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors, vadošais pētnieks, *Dr. sc. ing.* Vitālijs Beresņevičs,
Rīgas Tehniskā universitāte

Vadošais pētnieks *Ph. D. Dmitri Neshumayev*,
Tallinas Tehniskā universitāte, Igaunija

Pētnieks *Ph. D. Michal Špiláček*,
Brno Tehnoloģiskā universitāte, Čehija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Antons Kolmičkovs (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 63 attēli, 18 tabulu, 118 formulu, 12 pielikumu, kopā 177 lappuses. Literatūras sarakstā ir 277 nosaukumi.

ANOTĀCIJA

Atslēgas vārdi: degšana, biomasas, kviešu salmi, skujkoku koksne, kūdra, elektriskais lauks, elektrodinamiskā kontrole

Promocijas darbā pētīts salmu, koksnes un kūdras granulētās biomasas termiskās sadalīšanas process, gāzveida produktu liesmas virpuļplūsmas dinamika un to kontrole ar ārējo līdzstrāvas elektrisko lauku (*Electric Field-Driven Flame Dynamics*) efektīvākai siltuma enerģijas ražošanai ar samazinātu emisijas gāzes veidošanos. Darba aktualitāte saistīta ar Eiropas Komisijas 2030. gadam definētiem mērķiem enerģētikas nozarē un atbilst Latvijas *RIS3* attīstības stratēģijai enerģētikā, ietverot energoefektivitātes paaugstināšanu, biokurināmā diversifikāciju, CO₂ neitrālas enerģijas izmantošanu, kā arī viedas tehnoloģijas izstrādi videi draudzīgas enerģijas iegūšanai no Latvijas vietējiem energoresursiem. Pētījuma zinātnisko novitāti nosaka ārējā elektriskā lauka, dažādas izcelsmes biomasas un gaisa virpuļplūsmas apvienotā izmantošana siltuma ražošanai un degmaisījuma komponentu efektīvākai samaisīšanai granulētā cietā kurināmā degšanas procesā.

Mērķa sasniegšanai eksperimentāli izvērtēta elektriskā lauka ietekme uz granulētas kviešu salmu, skujkoku koksnes biomasas un kūdras termiskās sadalīšanas procesu, gāzveida produktu veidošanās kinētiku, šo gāzveida vielu degšanas kinētiku un dinamiku virpuļplūsmā, izvērtējot ārējā elektriskā lauka ietekmi uz liesmas temperatūras, plūsmas ātruma un degmaisījuma sastāva izmaiņām, kā arī uz siltuma daudzumu, kas izdalās biomasas termiskās sadalīšanas un gāzveida vielu degšanas procesā. Promocijas darbā apkopoti pētījumi, kas veikti Latvijas Universitātes Fizikas institūtā Eiropas Reģionālās attīstības fondu līdzfinansētos projektos, pētījumu rezultātus publicējot periodiskajos izdevumos, kas ietverti starptautiski citējamu žurnālu datubāzēs. Publikāciju (kopsummā 16) mērķis bija izpētīt, aprobēt un validēt eksperimentāli iegūtos rezultātus un iegūt starptautisko atzinumu par paveikto darbu.

Promocijas darba ievadā definēti darba mērķi, uzdevumi, izvērtēta darba aktualitāte, zinātniskā novitāte, tā praktiskā nozīme, kā arī ir sniegts īss pārskats par promocijas darba autora zinātnisko pētījumu rezultātu publicēšanu starptautiski citējamajos izdevumos un prezentēšanu dažāda līmeņa starptautiskās zinātniskās konferencēs. Darba pirmajā nodaļā apkopota informācija par granulētas biomasas termiskās sadalīšanas procesiem, gāzveida produktu degšanas kinētiku, jonu veidošanas mehānismiem, liesmas virpuļplūsmas dinamikas veidošanos un tās izmaiņām elektriskajā lauka iedarbībā. Otrajā nodaļā aprakstīta eksperimentālo pētījumu metodoloģija un mērījumu metodika, kas izmantota eksperimentālajos pētījumos. Dažādas izcelsmes biomasas termiskās sadalīšanās un sadegšanas procesu izpētes rezultāti apkopoti trešajā nodaļā, inženiertehniskais aprēķins kopā ar aprobācijas rezultātiem – ceturtajā nodaļā. Iegūtie secinājumi ar priekšlikumiem tehnoloģiju tālākai attīstībai apkopoti darba noslēgumā.

SATURS

ANOTĀCIJA.....	4
Darba vispārējais raksturs.....	6
Pētījuma aktualitāte un vēsturiskais ieskats	6
Darba mērķis	7
Galvenie pētījuma uzdevumi	7
Darba zinātniskā novitāte.....	8
Darba praktiskā nozīmība	9
Izpētes metodika	9
Pētījuma diapazons un iegūto rezultātu lietojuma robežās	9
Hipotēze	10
Aizstāvēšanai izvirzītās tēzes.....	10
Darba struktūra un apjoms	10
Autora ieguldījums.....	11
Darba aprobācija	11
Attiecināmo zinātnisko publikāciju saraksts.....	11
1. Siltuma ražošanas procesu teorijas un esošo eksperimentālo pētījumu izvērtējums	13
1.1. Granulētās augu biomasas termiskās sadalīšanās īpašības.....	13
1.2. Liesmas kinētika un jonu veidošanās	14
1.3. Liesmas virpuļplūsmas struktūra.....	15
1.4. Elektriskā lauka mijiedarbība ar liesmu	17
1.5. Elektriskā tilpuma spēka ietekmes analītiskais izvērtējums.....	18
2. Eksperimentālās iekārtas izgatavošana, testēšanas metodoloģija un validācija	19
2.1. Eksperimentālās izpētes iekārtas apraksts.....	22
2.2. Tehnoloģiskā prototipa aprobācijas iekārtas apraksts	23
2.3. Mērījumu instrumenti un metodoloģija.....	24
3. Siltuma procesu eksperimentālie pētījumi	26
3.1. Salmu, koksnes un kūdras biomasas paraugu raksturojums.....	27
3.2. Granulētās biomasas degšanas bez elektriskā lauka raksturojums.....	28
3.3. Liesmas strāvas eksperimentālie pētījumi	31
3.4. Liesmas virpuļplūsmas izplešanās efekts	32
3.5. Plūsmas temperatūras izmaiņu efekts.....	34
3.6. Biomasas termiskās sadalīšanas intensifikācijas efekts	35
3.7. Uzlabotās siltuma pārnese efekts.....	37
3.8. Dūmgāzu kaitīgo emisiju samazināšanas efekts	39
4. Jaunās tehnoloģijas prototipa aprobācija un novērtējums ar rūpniecisko granulu degli	42
4.1. Tehnoloģijas ieviešanas inženierekonomiskais aprēķins	43
SECINĀJUMI	45
IZMANTOTĀ LITERATŪRA	46

DARBA VISPĀRĒJAIS RAKSTUROJUMS

Pētījuma aktualitāte un vēsturiskais ieskats

2019. gadā Eiropas Savienības komisija noteica enerģētikas politikas mērķus laika posmam līdz 2030. gadam: par 40 % samazināt siltumnīcefektu izraisošos CO₂ izmešus; līdz 32 % palielināt atjaunojamās energoresursus ES valstu enerģētikas bilanci; par 32 % palielināt energoefektivitāti, salīdzinot ar 1990. gada līmeni [1]. Aktuālāka kļūst arī fosilā kurināmā resursu izmantošanas ierobežošana un alternatīvo resursu ieviešana enerģētikas tirgū, t. i., biomasas. Sekojot “nulles izmešu” vadlīnijām, pieprasījums pēc kvalitatīvās koksnes biomasas enerģijas ražošanas strauji pieaug – laika posmā no 2013. gada līdz 2017. gadam tas ir audzis no 17 milj. līdz 24 milj. tonnu (*AEBIOM*), tomēr kurināmā ražošanas tempi ir mainījušies tikai no 14 milj. līdz 18 milj. tonnu [2].

Nemot vērā ES noteiktās emisiju kvotas, Latvijā mazas ražotnes un māsaimniecības sāk intensīvi lietot nelielas jaudas granulā degļus, izmantojot augsti kvalitatīvas koksnes skaidu granulas. Tomēr tirgū ir novērojama ražošanas recesija un aktīva koksnes biomasas importa attīstība [2]. Pieaugot pieprasījumam pēc augstas kvalitātes granulām, veidojas koksnes granulā deficīts tirgū, kā arī tiek aktualizēts jautājums par granulēto biokurināmo diversifikāciju. Izvērtējot šo alternatīvo resursu izmantošanas iespējas, īpaši tiek ieteikta lauksaimniecības biomasas (kviešu un rīsu salmu) izmantošana, kuras resursi sasniedz >1500 milj. tonnu gadā [3].

Tomēr zemas kvalitātes vai neapstrādātas biomasas izmantošana (ES valstīs līdz 45 % [2]) mazo māsaimniecību katlu iekārtās ir ierobežota. Izmantojot zemākas kvalitātes granulas, samazinās kurināmā siltumspēja, palielinās darvas nosēdumu veidošanās uz katlu sienām, pelnu veidošanās un stiklošanās [4]. Nekvalitatīva kurināmā izmantošana degšanas procesā saistīta arī ar destruktīvo [5] un korozijas izraisošo vielu [6] veidošanos, kas samazina iekārtas izmantošanas ilgumu un palielina apkopes/remonta izmaksas. Savukārt lauksaimniecības biomasas izmantošanu ierobežo fizikālo (ūdens saturs, blīvums un struktūra) un fizikāli ķīmisko raksturojošo parametru (degšanas siltumspēja, elementārais un ķīmiskais sastāvs, pelnu saturs) īpašību būtiska atšķirība un daudzveidība [7]. Šāda daudzveidība izraisa siltuma ražošanas procesu nestabilitāti un samazina rezultātu prognozējamību.

Lai nodrošinātu stabilākus degšanas un gazifikācijas procesus, izmantojot dažādas izcelsmes biomasas, pakāpeniski attīstās biomasu pārstrādes metodes (granulēšana, briketēšana), kas palīdz kontrolēt sadedzināmās biomasas blīvumu, paredzēt elementāro sastāvu un siltumspēju [8]. Tiek veikta biomasas priekšapstrāde, kas paver iespējas samazināt mitruma saturu biomasā un intensificēt gaistošo vielu veidošanos, to uzliesmošanu un degšanu [9].

Paralēli pētījumiem, kas saistīti ar biomasas degvielu raksturojošo parametru uzlabošanu, veikti pētījumi, kas saistīti ar degšanas procesu raksturojošo parametru uzlabošanu un stabilizāciju. Gāzes kurināmā degšanas procesu stabilizācijai aktīvi izmanto virpuļplūsmas. Klasiskā virpuļplūsma tiek veidota kanālā, izmantojot kanāla centrā ievietotas gaisa virpuļplūsmas padeves sprauslas, tomēr, ja gaisa azimutālā plūsma tiek padota pie degļa pamata, virzienā uz centru, novēro citu liesmas virpuļviesuļa struktūru: ar izteiktu kontrakciju liesmas pamatā un nelielu izplešanos

liesmas centrālā daļā [10]. Virpuļplūsmu sāk lietot arī mazas jaudas granulu degļos [11], tomēr tās ieviešanu ierobežo rūpīga aerodinamiskā simulācija degšanas kamerā. Aerodinamiskā režīma neievērošana izraisa vairākus nelabvēlīgus efektus, t. s. neizreagēto vielu noplūšanu no reakcijas zonas ar granulu virsmu pastiprinātu dzesēšanu [12], [13] liesmas plūsmas kontrakcijas un iztiepšanās dēļ.

20. gadsimta pētījumi par liesmas elektrisko dabu [14], [15] un liesmas “jonu vēju” [16] devuši impulsu pētījumu attīstībai par liesmas un elektriskā lauka mijiedarbībām, kā arī degšanas parametru kontroles virzienā [17]–[20]. Konstatēts, ka elektriskā lauka un liesmas mijiedarbības efektu izmantošana (ierosinātā siltuma un masas pārnese lauka virzienā) dod iespēju kontrolēt liesmas stabilitāti, garumu [21], formu [22], degšanas un siltuma ražošanas procesu efektivitāti un emisiju sastāvu [23], [24]. Tomēr elektriskā lauka radītie efekti ir ļoti atkarīgi no lādēto daļiņu dabas (elektroni, joni, to mijiedarbības produkti [15] [14]), to daudzuma un lādiņa sadalījuma liesmā [25], kas savukārt ir atkarīgs no degvielas tipa, degšanas apstākļiem un degšanas kinētikas [26], [27]. Patlaban nav vienotas degšanas kinētikas un jonu veidošanas simulācijas modeļa, jo skaitliskie rezultāti ir ļoti atkarīgi no degšanas apstākļiem, kinētikas parametriem un reakcijas virziena [28], tāpēc eksperimentālie pētījumi, kuru mērķis ir liesmas un elektrisko lauku mijiedarbības efektu praktiskā izmantošana, turpinās arī mūsdienās.

Promocijas darba pētījuma aktualitāte aptver efektīvāko vietējo bioenergoresursu izmantošanu (kokapstrādes rūpniecības un lauksaimniecības blakusproduktu), to diversifikāciju un sastāva daudzveidības negatīvās ietekmes mazināšanu, degšanas procesa regulēšanai izmantojot liesmas virpuļplūsmas un elektriskā lauka mijiedarbības efektu, tādā veidā palielinot granulu degšanas efektivitāti un samazinot gaisu piesārņojošo gāzu emisijas daudzumu atmosfērā.

Darba mērķis

Promocijas darba mērķis ir izpētīt, izstrādāt teoriju un optimizēt līdzstrāvas elektriskā lauka ietekmi uz granulētas biomasas degšanu virpuļplūsmā (*Electric Field-Driven Flame Dynamics*, turpmāk *EFDFD*), lietojot degšanas procesu eksperimentālās identifikācijas metodes, kā arī izmantojot daudzfāžu nepārtrauktas vides daļiņu mehāniskās kustības un fizikāli ķīmiskās pārvēršanās teorijas.

Galvenie pētījuma uzdevumi

1. Veikti esošo daudzfāžu nepārtrauktas vides rotācijas kustības un dažādas biomasas fizikāli ķīmiskās pārvēršanās teorijas un eksperimentālo pētījumu izvērtējumi ar nolūku izmantot tos līdzstrāvas elektriskā lauka (ar intensitāti līdz $1 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$) ietekmes analīzē, esošo iekārtu un procesu parametriskajā uzlabošanā, kā arī prototipa iekārtas izveidē.

2. Izprojektēta, izgatavota un darbībā pārbaudīta jauna biokurināmo (kviešu salmu, skujkoku koksnes un purva kūdras) integrētā gazifikācijas un degšanas procesu elektrodinamiskās vadības (kontroles un stabilizācijas) iekārta.

3. Ar jauno izgatavoto eksperimentālo iekārtu veikti fizikāli eksperimenti dažādu granulēto biokurināmo lietojuma efektivitātes izvērtējumam. Eksperimentālie rezultāti novērtēti, aprakstot

elektriskā lauka ietekmi uz liesmas temperatūras, plūsmas ātruma un sastāva izmaiņām, kā arī uz siltuma daudzumu, kas izdalās biomasas degšanas procesā.

4. Veikta elektrodinamiskās vadības tehnoloģijas prototipa iekārtas praktiskā aprobācija ar rūpniecisko degļi līdz 20 kW.

Darba zinātniskā novitāte

Pirmo reizi zinātnes informācijas telpā aprakstītas mazas intensitātes (līdz $1 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$) perpendikulārā līdzstrāvas elektriskā lauka un dažādas izcelsmes biomasas liesmas virpuļplūsmas integrētās mijiedarbības likumsakarības (1. tab.), izvērtējot šīs mijiedarbības ietekmi uz biomasas termiskās sadalīšanās un gaistošo vielu veidošanās procesiem, gaistošo vielu uzliesmošanu un degšanu, siltuma-masas pārnesei procesu un degšanas produktu sastāva veidošanos.

1. tabula

Promocijas darba eksperimentālā pētījuma principiāls salīdzinājums

Autors	Mērogs	Kurināmais	Deg- maisījums	Plūsma	Kvēpu veidošanās	Lauka virziens	Lauka intensitāte*
<i>J. F. Weinberg, J. Lawton, P. J. Mayo</i>	mikro; mezo	gāze	difūzs	lamin.; turb.	✓	↓↓; →↓	vidēja; augsta
<i>D. C. Murphy, M. Sánchez-Sanz, C. Fernandez-Pello</i>	mikro	gāze	iepriekš samaisīts	lamin.		↓↓; →↓	augsta
<i>S. D. Marcum, B. N. Ganguly</i>	mikro	gāze	difūzs	lamin.	✓	↓↓	vidēja
<i>M. J. Papac, D. Dunn-Rankin, F. B. Carleton, Y. C. Chien</i>	mikro; mezo	gāze	iepriekš samaisīts; difūzs	lamin.	✓	↓↓	vidēja
<i>S. Karnani, J. A. Tinajero</i>	mikro	gāze	difūzs	lamin.		↓↓	zema; vidēja
<i>J. Van den Boom, A. Verhasselt</i>	mikro	gāze	iepriekš samaisīts	lamin.		↓↓	augsta
<i>Y. Xiong, D. G. Park, B. J. Lee, S. H. Chung, M. S. Cha</i>	mikro	gāze	iepriekš samaisīts; difūzs	lamin.		↓↓	vidēja; zema
D. Turlājs, I. Barmina	mezo	gāze	difūzs	lamin.; turb.	✓	→↓	vidēja
M. Zaķe, R. Valdmanis, A. Līckrastiņa	mezo	gāze, koksnes biomasa	difūzs	virpuļ- plūsma	✓	→↓	vidēja
N. Zeltiņš, O. Krickis	mezo	gāze	iepriekš samaisīts	lamin.; turb.		→↓	vidēja; augsta
A. Kolmičkovs, I. Barmina, S. Vostrikovs, M. Zaķe, R. Valdmanis	mezo, makro	salmu, koksnes biomasa un kūdra	difūzs	virpuļ- plūsma	✓	→↓	zema

*zema < $1 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$; vidēja $E \approx [1; 6] \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$; augsta > $6 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$.

Darba praktiskā nozīmība

Atjaunojamo energoresursu (dažādas izcelsmes biomasu) izmantošana siltumenerģētikā ir būtiska, jo kopā ar meža atjaunošanu potenciāli var ierobežot globālo sasilšanu, veicinot valsts vietējo energoresursu efektīvāku izmantošanu un valsts enerģētisko neatkarību. Turklāt atbilstoši vairākām ES direktīvām ir jāveido jaunākas metodes enerģijas ražošanai, efektīvāk izmantojot atjaunojamus enerģijas resursus.

Atzinumu par darba praktisko nozīmi ir sniegusi Latvijas Kokrūpniecības federācija: AS “Latvijas Finieris”, SIA “PATA AB”, SIA “Vika Wood”, SIA “Latgran”, SIA “Graanul Invest”. Promocijas darbā iegūtie rezultāti sniedz gan zinātnisku, gan praktisku ieguldījumu atjaunojamo energoresursu izmantošanas veicināšanā, izvērtējot elektriskā lauka izmantošanas iespējas dažādas izcelsmes granulētas biomasas degšanas dinamikas kontrolei, veicot elektriskā lauka un liesmas mijiedarbības padziļinātu izpēti, efektīvai jaunās viedās tehnoloģijas izstrādei, enerģijas ražošanas procesa kontrolei ar uzlabotu degšanas efektivitāti un degšanas produktu sastāvu. Darbā apkopotie būtiskākie ieteikumi tālākai šīs tehnoloģijas uzlabošanai, ieviešanai un drošībai. Turklāt darbā ir veikta arī dažādas izcelsmes biomasu sastāva būtisko atšķirību analīze, izvērtējot to ietekmi uz termiskās sadalīšanas un degšanas dinamikas veidošanos. Darba literatūras apskats ietver informāciju par jonu veidošanas mehānismiem biomasas pirolīzes un gaistošo vielu degšanas procesā, jonu koncentrācijas sadalījuma un “jonu vēja” veidošanos elektriskā lauka un liesmas mijiedarbības procesā. Pētījums ir aktuāls ne tikai zinātniekiem un nozares profesionāļiem, to var izmantot arī par mācību un atbalsta materiālu.

Izpētes metodika

Lai veiktu eksperimentālo izpēti par ārējā elektriskā lauka un liesmas virpuļplūsmas mijiedarbības efektu dažādas izcelsmes granulētas biomasas termokīmisko pārvērtību procesā, promocijas darbā veikts klasisks eksperiments ar vienu mainīgo – aksiāli simetriskā stieples veida elektroda (100 mm) pozitīvo potenciālu no 0 kV līdz 1,8 kV (ar ierobežotu jonu strāvu līdz 7 mA). Pētījumu metodika ir saistīta šajā nozarē ar aktuālo mērīšanas ierīču un aparatūras izmantošanu, dzesējamā ūdens plūsmas kalorimetrisko mērījumu veikšanai lietojot temperatūras sensorus, termopārus – lokāliem liesmas temperatūras mērījumiem, IS spektrometriju – biomasas termiskās sadalīšanās produktu sastāva mērījumiem, dūmgāzes analizatoru – liesmas un degšanas produktu sastāva mērījumiem, elektriskās zondes – lokāliem strāvas mērījumiem, ātruma zondes – plūsmas dinamikas lokāliem mērījumiem u. c. Dažādu parametru kompleksai izpētei eksperimentālie pētījumi veikti atkārtoti, izvērtējot mērījumu rezultātu precizitāti. Starpdisciplināra darba rezultātu apstrādei, izvērtēšanai un interpretēšanai izmantoti noteiktu nozaru starptautiski atzīti autoru darbi.

Pētījuma diapazons un iegūto rezultātu lietojuma robežas

Promocijas darba pētījumu rezultāti, kas iegūti, izmantojot periodiskās darbības mazas jaudas (4 kW) eksperimentālo iekārtu, validēti nepārtrauktas darbības tehnoloģiskai iekārtai ar cilindrisku degšanas kameru un siltuma jaudu līdz 20 kW. Darbs sniedz vērtīgu informāciju par elektroda izvietošanas metodoloģiju un biomasas gazifikācijas produktu degšanas zonas mijiedarbību ar

elektrisko lauku, kas paver iespējas pārnest un aprobēt pētījumu rezultātus arī uz rūpnieciskā mēroga degļu iekārtām, izmantojot virpuļplūsmas degšanas procesu stabilizēšanai un efektivitātes palielināšanai.

Hipotēze

Ar ārējo līdzstrāvas elektrisko lauku, izmainot liesmas virpuļplūsmas dinamiku, var kontrolēt biomasas termiskā sadalīšanas ātrumu, gaistošo vielu veidošanas ātrumu un to uzliesmošanu, degšanas zonas sastāva un struktūras veidošanos, intensificējot siltuma un masas pārnese procesus lauka virzienā, līdz ar to palielinot degšanas un siltuma ražošanas efektivitāti ar samazinātu relatīvo kaitīgo vielu emisiju.

Aizstāvēšanai izvirzītās tēzes

1. Dažādas izcelsmes granulēto biomasu (salmu, kūdras, koksnes) elementārā un ķīmiskā sastāva daudzveidība nosaka būtiskās atšķirības gazifikācijas un degšanas procesos.
2. Elektriskajā laukā notiek lejupvērstās virpuļplūsmas intensifikācija (0,6–1,1), nodrošinot uzlabotu gaisa virpuļplūsmas sajaukšanos ar aksiālo gaistošo vielu plūsmu, turklāt paplašinot gaistošo vielu degšanas zonu par 15–20 % un izmainot liesmas garumu par 50 %.
3. Liesmas virpuļplūsmas dinamikas izmaiņu rezultātā samazinās plūsmas aksiālais ātrums (no $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ līdz $0,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), palielinot gaistošo vielu uzturēšanās ilgumu degšanas zonā un uzlabojot gaistošo vielu sadegšanu līdz 36–37 %.
4. Biomasas termoķīmiskās konversijas izmaiņu efekts ir saistīts ar gazifikācijas intensifikāciju procesa sākuma stadijā (20 %) un uzlabotu gaistošo vielu veidošanos (20–40 %).
5. Gazifikācijas un degšanas produktu izmaiņas elektriskajā laukā, kā arī degšanas efektivitātes pieaugums par 4–10 %, intensificējot jonu pārnese virzienā uz sildvirsmām, palielina saražotās siltuma enerģijas daudzumu par 3–10 % biomasas termoķīmiskās konversijas procesā.

Darba struktūra un apjoms

Promocijas darba pamatā ir sistemātisks sešu gadu darbs, kas paveikts Latvijas Universitātes Fizikas institūtā ERAF finansēto projektu ietvaros. Pētījumu rezultāti apkopoti 16 tematiski vienotās zinātniskās publikācijās, citējamos starptautiskos periodiskos izdevumos. Šo publikāciju mērķis ir informēt sabiedrību par pētījumu rezultātiem un gūt starptautisku atzinību par rezultātu uzticamību un izvēlēto mērījumu metodoloģiju. Promocijas darbā ir ievads, četras galvenās nodaļas, secinājumi un priekšlikumi tālākai tehnoloģijas attīstībai. Ievadā akcentēta pētījuma aktualitāte, definēts pētījuma mērķis un noteikti darba uzdevumi, kā arī sniegta informācija par darba zinātnisko novitāti un praktisko lietojamību. Pirmajā nodaļā veikta analīze par dažādas biomasas ķīmiskā sastāva atšķirību ietekmi uz termiskās sadalīšanas produktu veidošanos un virpuļplūsmas liesmas veidošanās dinamiku, dažādu oglekļa dioksīda pārveidību ietekmi uz liesmas jonizāciju un jonu strāvas veidošanos, kā arī par liesmas jonizācijas pakāpi un jonu koncentrācijas sadalījuma veidošanās ietekmi uz “jonu vēja” izraisīto siltuma un masas pārnese lauka virzienā. Otrajā nodaļā aprakstītas eksperimentālajā izpētē izmantotās iekārtas, mērījumu instrumenti,

mērījumu metodoloģija, mērījumu robežas un jutība, izvērtējot eksperimentu rezultātu ticamību un atkārtojamību. Darba rezultāti, kas iegūti, izmantojot aprakstītās mērījumu metodikas, apskatīti trešajā nodaļā. Ceturtajā nodaļā analizēta rezultātu aprobācija uz lielākas jaudas iekārtas, dots tehnoloģijas ekonomiskais izvērtējums, ieteikumi tālākai tehnoloģijas lietošanas attīstībai un darba drošības pasākumi, strādājot ar elektrisko lauku. Secinājumu daļā akcentēti galvenie pētījuma rezultāti un sniegtas atbildes uz pētījuma uzdevumiem. Literatūras sarakstā dots izmantoto informācijas avotu bibliogrāfiskais apraksts.

Autora ieguldījums

Pētījumu eksperimentālais darbs veikts Latvijas Universitātes Fizikas institūta (LUFİ) Siltuma un masas pārnese laboratorijā *Dr. phys.* Maijas Zaķes un *Dr. ing. sc.* Inesas Barminas vadībā. Promocijas darba autors kopā ar Siltuma un masas pārnese laboratorijas darbiniekiem (I. Barmina, R. Valdmanis, S. Vostrikovs, M. Zaķe) piedalījās eksperimentālajā darbā, rezultātu datu apstrādē un analizē. Pētījumam zinātnisko atbalstu sniedza arī Matemātikas un informātikas institūta darbinieki: *Dr. habil. math.* Harijs Kalis, *Dr. math.* Maksims Marinaki un *Mg. math.* Līva Ozola. Biomasas paraugu ķīmiski fizikālā izpēte veikta Latvijas Koksnes ķīmijas (KĶI) institūtā.

Darba autors ir piedalījies visos eksperimentālās izpētes posmos un apguvis visas mērījumu un datu apstrādes metodes, tomēr vislielāko ieguldījumu devis, veicot biomasas gazifikācijas produktu sastāva spektrālo izpēti tuvā infrasarkanā viļņu diapazonā, rezultātu apstrādi un interpretāciju, izvērtējot biomasas ķīmiskā sastāva atšķirības un to ietekmi uz dažādām degšanas procesa īpašībām. Projektu ietvaros pētnieku grupa izveidoja jauno eksperimentālo iekārtu (4 kW) ar uzlabotu aerodinamisko režīmu elektriskā lauka efekta iedarbības izpētei uz virpuļplūsmas veidošanās dinamiku, kā arī iekārtu tehnoloģijas aprobācijai ar rūpniecisko mazas jaudas degli (līdz 20 kW). Darba autors ir sagatavojis visaptverošo literatūras analīzi un apkopojumu par biomasas gazifikācijas produktu termokīmiskajām pārvērtībām un liesmas mijiedarbību ar ārējo elektrisko lauku, ievērojot LUFİ un KĶI iepriekš veikto pētījumu rezultātus. Pētījumu analīzi un secinājumus darba autors kopā ar kolēģiem apkopojis zinātniskajos rakstos un prezentējis vietēja mēroga un starptautiskās konferencēs, pateicoties LUFİ un ERAF projektu finansiālajam atbalstam.

Darba aprobācija

Darba gaitā autors ir piedalījies četros zinātniskajos projektos un piecās starptautiskās konferencēs, darba rezultātus apkopojis 21 zinātniskajā publikācijā (16 ir attiecināmas uz promocijas darbu). Saistībā ar promocijas darbu Latvijas Universitātes Fizikas institūta Zinātniskajā padomē ir izskatītas un akceptētas divas zinātnības (*know-how*) un iesniegts viens licences pieteikums.

Attiecināmo zinātnisko publikāciju saraksts

1. Kalis, H., Kolmičkovs, A., Marinaki, M., Valdmanis, R. Mathematical Modelling and Experimental Study of Straw Co-Firing with Gas Using Electric Field Control of Combustion Characteristics. *In: 19th International Scientific Conference "Engineering for Rural*

- Development": Proceedings*, **2020**, May 20–22, Jelgava: Latvia, pp. 1059–1064. DOI: 10.22616/ERDev.2020.19.TF250.
2. Barmina, I., Kolmičkovs, A., Valdmanis, R., Vostrikovs, S., Zake, M. The Effect of Electric Field Configuration on the Thermo-Chemical Conversion of Straw Pellets. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, **2020**, Vol. 57, No. 4, pp. 65–76. DOI:10.2478/lpts-2020-0022.
 3. Barmina, I., Kalis, H., Kolmičkovs, A., Marinaki, M., Ozola, L., Strautins, U., Valdmanis, R., Zake, M. Mathematical Modelling and Experimental Study of Straw Co-Firing with Gas. *Mathematical Modelling and Analysis*, **2019**, Vol. 24, No. 4, pp. 507–529. DOI:10.3846/mma.2019.031.
 4. Barmina, I., Kolmičkovs, A., Valdmanis, R., Zake, M., Vostrikovs, S., Kalis, H., Strautins, U. “Electric Field Effect on the Thermal Decomposition and Co-combustion of Straw with Solid Fuel Pellets” *Energies*, **2019**, Vol. 12, No. 8, pp. 1522–1542. DOI:10.3390/en12081522.
 5. Barmina, I., Kolmičkovs, A., Valdmanis, R., Vostrikovs, S. “Electrodynamic Control of Straw Co-Firing with Propane” In: *18th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”: Proceedings*, **2019**, May 22–24, Jelgava: Latvia, pp. 1319–1324. DOI: 10.22616/ERDev2019.18.N022.
 6. Barmina, I., Kolmičkovs, A., Valdmanis, R., Zaķe, M., Kalis, H., Strautiņš, U. “Electric Field Effect on the Thermal Decomposition and Co-Combustion of Straw Pellets with Peat” *Chemical Engineering Transactions*, **2018**, vol. 70, pp. 1267–1272. DOI: 10.3303/CET1870212.
 7. Barmina, I., Kolmičkovs, A., Valdmanis, R., Zaķe, M., Kalis, H., Strautiņš, U. “Kinetic Study of the Thermal Decomposition and Co-Combustion of Straw Pellets with Coal” *Chemical Engineering Transactions*, **2018**, vol. 70, pp. 247–252. DOI: 10.3303/CET1870042.
 8. Barmina, I., Kolmičkovs, A., Valdmanis, R., Zake, M., Kalis, H., Marinaki, M. “Experimental Study and Mathematical Modelling of Straw CoFiring with Peat” *Chemical Engineering Transactions*, **2018**, vol. 65, pp. 91–96. DOI: 10.3303/CET1865016.
 9. Kalis, H., Kolmičkovs, A., Marinaki, M., Ozola, L. “Development of Combustion Dynamics at Co-Combustion of Straw with Wood” In: *17th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”: Proceedings*, Latvia, Jelgava, 23–25 May, **2018**. Jelgava, Latvia, pp. 1322–1328. DOI: 10.22616/ERDev2018.17.N114.
 10. Barmina, I., Kolmičkovs, A., Valdmanis, R., Zaķe, M. “Co-Firing of Straw with Electrodynamic Process Control for Clean and Effective Energy Production” In: *European Biomass Conference and Exhibition Proceedings*, Sweden, Stockholm, 12–15 June, **2017**. pp. 579–592. DOI: 10.5071/25thEUBCE2017-2BV.1.22.
 11. Barmina, I., Kolmičkovs, A., Valdmanis, R., Zaķe, M., Kalis, H. “Experimental and Numerical Studies of Electric Field Effects on Biomass Thermo-chemical Conversion” *Chemical Engineering Transactions*, **2016**, vol. 50, pp. 121–126. DOI: 10.3303/CET1650021.

12. Barmina, A. Kolmickovs, R. Valdmanis, M. Zake. “Electrodynamic control of combustion dynamics and swirling flame structure at thermochemical conversion of biomass” in *Proceedings of the 7th Baltic Heat Transfer Conference*, Tallinn, **2015**, pp. 169–174. Available: www.ttu.ee/public/p/projektid/bhtc2015/7th_BHTC_Technical_Programme.pdf.
 13. Barmina, A. Kolmickovs, R. Valdmanis, M. Zake. “Combustion dynamics of swirling flame at thermochemical conversion of biomass” in *Chemical Engineering Transactions*, Milan, **2015**, vol. 43. DOI: 10.3303/CET1543109.
 14. Barmina, A. Kolmickovs, R. Valdmanis, M. Zake. “Control of combustion dynamics by an electric field” in *Chemical Engineering Transactions*, Milan, **2015**, vol. 43, pp. 973–978. DOI: 10.3303/CET1543163.
 15. M. Zake, I. Barmina, A. Kolmickovs, R. Valdmanis. “Electric field impact on the biomass gasification and combustion dynamics” in *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, Stockholm, **2015**, vol. 9, no. 7. DOI: 10.1999/1307-6892/10001811.
 16. Barmina, A. Kolmickovs, R. Valdmanis, S. Vostrikovs, M. Zake. “Electric field control of biomass gasification” in *Engineering for Rural Development*, Jelgava, **2015**, pp. 510–515. Available: tf.llu.lv/conference/proceedings2015/Papers/083_Kolmickovs.pdf.
- Visas autora publikācijas: ortus.rtu.lv/science/lv/experts/12778.

1. SILTUMA RAŽOŠANAS PROCESU TEORIJAS UN ESOŠO EKSPERIMENTĀLO PĒTĪJUMU IZVĒRTĒJUMS

1.1. Granulētās augu biomasas termiskās sadalīšanās īpašības

Augu valsts izcelsmes cietā kurināmā degšana ietver savstarpēji saistītus procesus: biomasas sildīšanu, žāvēšanu, galveno komponentu (hemicelulozes, celulozes, lignīna) termisko sadalīšanos, gaistošo vielu veidošanos (līdz 60 %), to uzliesmošanu un termoķīmisko pārveidošanu, kā arī cietās fāzes (līdz 17 %) pārvērtības ar divu fāžu reakcijām uz pāroģlotās biomasas virsmas.

Granulētās biomasas degšanas ierosināšanu un tās ātrumu nosaka fizikālie žāvēšanas procesi (kas vairāk atkarīgi no kurināmā daļiņu lieluma un blīvuma) un endotermiskie degzācības procesi. Lai uzturētu degzācības procesus, ir jāpievada siltums, jo pievadītā siltuma daudzums nosaka gaistošo vielu veidošanās ātrumu [29]. Biomasas izcelsme nosaka tās termiskās sadalīšanas īpašības un gaistošo produktu daudzumu [30], [31]. Koksnes [32] un salmu [33] granulu termiskās sadalīšanas procesa atšķirības galvenokārt nosaka citāds gaistošo savienojumu un cietās fāzes sadalījums, tomēr nelielas procesa atšķirības nosaka arī hemicelulozes ķīmiskā struktūra [34]. Skujkoku biomasas hemicelulozes (*Gal-Glu-Man*) struktūra nodrošina uzlabotu gaistošo savienojumu izdalīšanos no biomasas liesmas veidošanās posmā, turklāt kviešu salmu hemicelulozes struktūra (*Glu-Uro-Ara-Xyl*) palielina ogles fāzes veidošanos un nedaudz samazina gaistošo savienojumu veidošanās ātrumu degzācības procesā. Savukārt kūdras struktūra principiāli nosaka degzācības un ogles fāzes veidošanās procesa atšķirības, jo vismaz trešā daļa no kūdras

sausās masas ir humīnskābes un fulvoskābes [35], kam ir stipri aromatizētā struktūra, kas, piemēram, lignīnam, nosaka samazinātu gaistošo vielu daudzumu un paaugstinātu saistītā oglekļa daudzumu [36].

Liesmas temperatūras sadalījums [37], [38] nosaka termiskās sadalīšanas produktu ķīmisko sastāvu un vielu pārveidošanas ātrumu, tāpēc biomasas granulu reakcijas slānī ir jāuztur temperatūra virs 700 K [6]. Siltuma līdzsvars starp endotermiskiem biomasas sadalīšanas procesiem [29] un gaistošo vielu konversiju [39] nosaka gazifikācijas produktu aizdegšanās ātrumu, kas savukārt ietekmē liesmas veidošanas kinētiku un dinamiku – jo vairāk gaistošu vielu veidojas gazifikācijas procesā, jo intensīvāka ir liesma [40].

Ievērojot dažādas izcelsmes biomasas granulu ķīmiskā sastāva [41]–[43] gaistošo vielu daudzuma [32], [41], [43] un biomasas komponentu termiskās sadalīšanās siltuma efektu atšķirības [29], [31], [44], secināms, ka garu koksnes un salmu biomasas liesmas veidošanos nosaka intensīva holocelulozes sadalīšanās [29], [31], [32], veidojot gaistošu vielu plūsmu [45], [46], kuras aizdegšanos aizkavē celulozes endotermiskais sadalīšanās siltuma efekts [29], [30]. Savukārt kūdras biomasas samazinātais gaistošo vielu daudzums un palielinātais fiksētā oglekļa daudzums [43] nodrošina vienmērīgu degmaisījuma veidošanos [47], uzlabotu plūsmas sasīšanu un ātrāku aizdegšanos [37], [38].

Tā kā granulu ogļveida cietā fāze (biomasas termiskās sadalīšanas pēdējā posma produkta) līdz 95 % sastāv no oglekļa atomiem [45], tās oksidēšanas uzturēšanai tiek patērēts vislielākais skābekļa daudzums [48], kas ir jāpievada tieši ogles virsmai [49]. Cietās fāzes oksidēšanas procesā vienmērīgi izdalās liels siltuma daudzums (līdz 33 MJ·kg⁻¹) [30], ar kura palīdzību biomasas degšanas procesā tiek līdzsvaroti endotermiskie biomasas degzācības procesi, šādā veidā nodrošinot biomasas degšanas pašuzturošo procesu un liesmas veidošanās. Sīkāka biomasas raksturojošo parametru un struktūras analīze – promocijas darba 1.1. nodaļā.

1.2. Liesmas kinētika un jonu veidošanās

Biomasas termiskās sadalīšanās produktu degmaisījuma sastāvs ir mainīgs, tomēr galvenokārt tā sastāvdaļas ir CO₂ (27–32 %), CO (12–23 %), H₂ (1–14 %), CH₄ (0,5–4 %), C₂H₂ (līdz 1 %) un C₂H₄ (līdz 0,5 %) [45], [46]. Biomasas termiskās sadalīšanās gāzveida galveno produktu (H₂ un CO) oksidēšanās reakcijas pārsvarā ir sazarotās ķēdes reakcijas, kurām reakcijas ātrumu galvenokārt nosaka reakcijas mehānisms un aktīvo centru daudzums (H un OH radikāļi). Ievērojot H₂ degšanas kinētiku un salīdzinot to ar CO degšanas procesu, ievēro, ka udeņradis liesmas plūsmā sadeg gandrīz momentāni, tomēr H radikālis piedalās CO oksidēšanas reakcijās, tāpēc to klātbūtne liesmā ir ļoti svarīga [50], [51].

Ogļūdeņražu (CH₄, C₂H₄ vai C₂H₂) oksidēšanās kopumā ir līdzīga udeņraža un oglekļa oksīdu oksidēšanās procesiem, šos procesus arī ietverot. Visvairāk reakciju virkņu aptverošo mehānismu ir izstrādāts, pateicoties vairāku vienlaicīgo ķīmisko reakciju modelēšanas pētījumiem [52]. Tomēr, mainot degšanas procesa apstākļus, mainās reakciju kinētiskie parametri, un tā

rezultātā var mainīties pat reakcijas virziens un to secība. Reakciju kinētiku visvairāk ietekmē tādi ārējie faktori kā degvielas-gaisa attiecība un temperatūra [28].

Cietās ogļveida fāzes degšanas procesu nosaka oglekļa gazifikācijas [53] un oksidēšanās [48] reakcijas. Šīs reakcijas ir vislēnākās, jo sarežģītais sorbcijas un difūzijas process [49], [54], kā arī konkurējošās oksidēšanās-reducēšanās reakcijas apgrūtina pāroglotās cietās fāzes virsmas reakcijas un veicina kvēpu veidošanos liesmā. Kvēpu daļiņu termiskā gaismas emisija nosaka liesmas dzeltensarkano krāsu biomasas degšanā [55]. Daļiņām, kas tiek aiznestas ar plūsmu no cietās vielas virsmas vai arī veidojas pašā liesmā, degšanas process ir saistīts ar oksidētāja difūziju, virsmas reakcijām un cietās daļiņas pārvērtībām, ko nosaka kontrakcijas modelis [54].

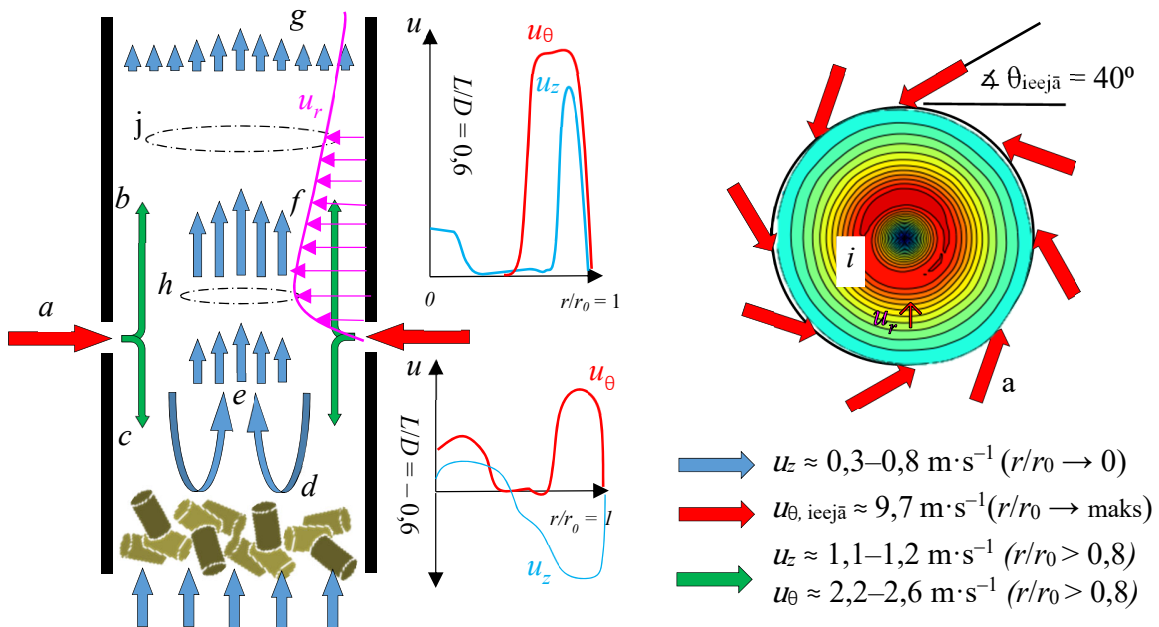
Jonu veidošanās biomasas degšanas procesā ir saistīta arī ogļūdeņražu ķīmiskajām reakcijām [26], [27]. Liesmas reakcijas zonai ir raksturīga ļoti augsta reaģējošo vielu koncentrācija ar ierosinātu C_2 un CH radikāļu veidošanos. Šim ierosināto radikāļu veidošanās procesam ir liela nozīme liesmas dabiskajā jonizācijā [52]. Ķīmiskā jonizācija ir atkarīga ne tikai no temperatūras, bet arī no reaģējošās vielas dabas, saites veida un reaģentu enerģētiskā stāvokļa [56]. Pēc dažiem datiem elektroni liesmā veido līdz 90 % no kopējā negatīvā lādiņa [57], tomēr pozitīvie joni liesmā veidojas daudz nekā negatīvie [14], [15]. CHO^+ jonu uzskata par primāro jonu [58], kas veidojas liesmas jonizācijas rezultātā, tomēr ūdens tvaika klātbūtnē šis katjons gandrīz pilnībā pārveidojas par stabilāku hidroksionija jonu – H_3O^+ [57], kura koncentrācija ir novērojama visā liesmas garumā [59]. Stehiometriskajā liesmā 85 % no kopējā pozitīvo jonu lādiņa blīvuma ieņem H_3O^+ , $C_3H_3^+$ un $C_2H_3O^+$ joni [60]. Pārējo pozitīvo jonu klātbūtnē liesmas pamatnē nav novērojama.

Liesmām ar gaisa trūkumu galvenā atšķirība ir intensīvā $C_3H_3^+$ veidošanās [14], tomēr pie stipra gaisa pārsvara liesmā dominējošais jons ir CH_3CO^+ [61]. Pie stipra oksidētāja trūkuma no joniem veidojas lielākas masas ogļūdeņražu joni, pieaugot oglekļa ķēdei ($C_{2n}H_{2n+1}$) vai kondensācijas procesos ($C_{2n}H_{2n-1}$) [61]. Ūdeņraža saturs molekulā pakāpeniski samazinās, veidojas poliaromatiskā struktūra un tādi joni kā $C_5H_3^+$, $C_{13}H_9^+$, $C_{21}H_{11}^+$, $C_{33}H_{15}^+$ un citi PAH^+ joni [62]. Degmaisījumā ar degvielas pārsvaru (α zemāk par 0,4) lielmolekulārie joni (PAH^+) aizvieto visus oksidētos ogļūdeņražu jonus [61]. Biomasas degšanas procesā izdalās ļoti daudz kvēpu daļiņu un lidojošo pelnu. Liesmā ar augstu kvēpu saturu, lādiņa pārnesei procesā ar ogļūdeņražu joniem vai elektroniem kvēpu daļiņas var tikt uzlādētas atbilstoši pozitīvi un negatīvi [63]. Par lādiņu nesēju var kalpot arī pašas kvēpu daļiņas. Savukārt kvēpu veidojošās liesmas jonu strāva ir stipri mazāka, salīdzinot ar jonu strāvu stehiometriskajām liesmām [64]. Plašāk par liesmas reakcijas un jonu veidošanās mehānismiem un kinētiku – promocijas darba 1.2. un 1.4. nodaļā.

1.3. Liesmas virpuļplūsmas struktūra

Rūpnieciskās siltuma ražošanas iekārtās degšanas procesu uzlabošanai izmanto virpuļplūsmas, kur primāro gaisa plūsmu degvielas samaisīšanai padod aksiāli zem granulu slāņa, savukārt sekundāro gaisa virpuļplūsmu pievada pa pieskari pret degšanas kameras sienām izplūdes gāzes piesārņojošo vielu daudzuma samazināšanai. Virpuļplūsma efektīvāk samaisa degmaisījuma

komponentus un uzlabo degšana īpašības [65]. Promocijas darbā, ņemot vērā konkrētās eksperimentālās iekārtas konfigurāciju, izmantota simetriski cilindriska konverģējoša virpuļplūsma ar virpuļskaitli $S \approx 0,6-0,9$ – liesmas virpuļviesulis. Gaisa sekundārā plūsma tiek padota azimutāli pie liesmas pamata ar ieplūdes leņķi ($\angle \theta_{ieejā}$) – 40° . Šādai plūsmai ir izteikta kontrakcija liesmas pamatā (1. att. h) ar nelielu izplešanos (1. att. j) liesmas centrālajā daļā [66], [67]. Virpuļplūsmu raksturo aksiāla azimutālā, radiālā ātruma un savirpuļojuma parametru sadalījums cilindriskajās koordinātēs. Veidojoties degšanas zonai, plūsmas azimutālais ātrums pakāpeniski samazinās, veidojot liesmas frontes konusu. Liesmas virpuļviesulis raksturojas ar platu radiālo robežslāni, kurā notiek degmaisījuma termiskā apstrāde un samaisīšanās ar sekundāro, uz centru virzīto gaisa plūsmu ($z \leftarrow 0$ un $u_r \approx \text{maks.}$) [10].



1. att. Eksperimentālās iekārtas virpuļplūsmas veidošanās shēma.

Šādas plūsmas veidošanos raksturo laminārs liesmas kodols ar degvielas pārsvaru liesmas centrālajā daļā ($r/r_0 \leftarrow 0$), kur azimutālā ātruma komponente ir minimāla ($u_\theta \approx \text{min.}$), savukārt aksiālā ātruma komponente sasniedz maksimālo vērtību ($u_z \approx \text{maks.}$). Virpuļplūsmas savirpuļojums sasniedz maksimālo vērtību liesmas ārējā daļā, kur azimutālā ātruma komponente pieaug līdz maksimālai vērtībai, savukārt aksiālā komponente pakāpeniski samazinās [10].

Iepriekš veiktie plūsmas dinamikas veidošanās modelējošie pētījumi cilindriskā kanālā ļāva secināt, ka sekundārā virpuļplūsmas padeve gaisa degšanas zonas pamatnē (1. att. a) izraisa gaisa virpuļplūsmas sadalīšanos, veidojot augšupvērstu (b) un lejupvērstu (c) gaisa virpuļplūsmas pie degšanas kameras sienām. Lejupvērstā virpuļplūsma gar degšanas kameras sienu pārvietojas virzienā uz granulu slāņa virsmu (d), veidojot pretplūsmu biomasas gazifikācijas produktu aksiālai plūsmai, intensificējot gaistošo vielu un gaisa virpuļplūsmas sajaukšanos un pakāpeniski samazinot lejupvērstās virpuļplūsmas intensitāti (e). Sasniedzot biomasas slāni, notiek virpuļplūsmas

atstarošanās, palielinot plūsmas aksiālo ātrumu plūsmas centrālajā daļā, kurā novēro plūsmas laminarizāciju un intensīva degšanas procesa veidošanos (f) [13]. Cilindriskajā degšanas kamerā plūsmas savirpuļojums sasniedz maksimumu pie $r/r_0 \approx 0,3$ un samazinās virzienā uz plūsmas centru (i), kur konstatējama lamināra degšanas procesa dinamika (e–g) [68]. Plašāk par izmantoto liesmas virpuļplūsmas struktūru – promocijas darba 1.3. nodaļā un 2.1.2. apakšnodaļā.

1.4. Elektriskā lauka mijiedarbība ar liesmu

Mūsdienu pētījumi par līdzstrāvas elektriskā lauka mijiedarbību ar ogļūdeņražu liesmu apsvēruši, ka nelielas intensitātes ($E_\varphi < 3 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$) elektriskā lauka enerģija, kas pievadīta liesmai, ir daudz zemāka par siltumu, kas izdalās degšanas reakcijās liesmas frontē [17], savukārt liesmas izplatīšanas ātrums un degšanas kinētika nav atkarīga no elektriskā lauka intensitātes [69]. Liesmas ģeometrijas izmaiņas ir vairāk atkarīgas no elektriskajā laukā radītā spēka iedarbības uz lādētām daļiņām, veidotām dabīgas liesmas jonizācijas rezultātā. Nodrošinot elektrisko lauku telpā starp diviem elektrodiem, kas novietoti ārpus liesmas, joni tiek pārnesti no liesmas uz elektrodu, turklāt atsevišķu jonu pārneses attālums ir atkarīgs no jonu kustīguma un to dzīves laika. Elektriskais tilpuma spēks ir proporcionāls lauka intensitātei E_φ , jonu koncentrācijai n_\pm un lādiņam q_\pm , turklāt lauka intensitāte ir proporcionāla elektroda potenciāla izmaiņām [16]:

$$\pm F_\varphi = q_\pm E_\varphi n_\pm = q_\pm (-\text{grad } \varphi). \quad (1)$$

Elektriskā tilpuma spēka izmaiņas noteiktajā virzienā, neievērojot konvekciju un difūziju, var aprakstīt ar jonu strāvas j vienādojumu, kur μ_\pm ir jonu kustīgums [16]:

$$j = q_\pm n_\pm \mu_\pm E_\varphi = [q_\pm n_\pm \mu_\pm = \text{const}] \sim \Delta\varphi. \quad (2)$$

Lādēto daļiņu kustīgums ietekmē sprieguma sadalījumu starp elektrodiem un kopējo veidoto jonu strāvu. Pieaugot jonu vai daļiņu izmēram, samazinās to kustīgums, tāpēc vislielākais kustīgums piemīt elektroniem [70]. Lielāks daļiņu kustīgums sekmē daļiņu sadursmju varbūtību telpā, savukārt elektriskajā laukā sadursmju skaits pieaug vēl vairāk. Turklāt lielāks lādēto daļiņu kustīgums pats nevar nodrošināt izteiktāku elektriskā lauka un liesmas mijiedarbību, jo lielākais kustīgums piemīt mazākajām daļiņām [71]. H_3O^+ un C_3H_3^+ joni savukārt ir spējīgi sadursmes laikā nodot pietiekami lielu kustības impulsu, ierosinot neitrālo daļiņu kustību lauka virzienā [72].

Elektriskā lauka radīto tilpuma spēku ir iespējams regulēt, mainot pieliktā lauka intensitāti. Palielinot elektriskā lauka intensitāti, pieaug arī elektriskā strāva (paraboliski), kas veidojas lādēto daļiņu rekombinācijas rezultātā uz elektroda virsmas. Analizējot voltampēru raksturlīknes, ir iespējams noteikt maksimālo jonu strāvu, kas palīdz atrast lauka efektīvāko iedarbības vietu liesmā. Lauka intensitātes robežās līdz $<1 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ jonu veidošanās liesmā ir stiprāka par jonu rekombināciju uz elektroda virsmas [72].

Lādēto un neitrālo daļiņu sadursmju rezultātā inducēto gāzu masas kustību elektroda virzienā sauc par “jonu vēju” [16]. “Jonu vēja” teorija apgalvo, ka liesmā sastopamie joni un elektroni paātrinās, reaģējot uz Lorenca spēku, ko nodrošina ārējais lauks. Lādētās daļiņas tiek pārnestas

lauka virzienā un pakļautas elastīgām sadursmēm ar neitrālām molekulām bez ķīmiskām pārvērtībām, izraisot neitrālo gāzes daļiņu paātrinājumu un pārneši lauka virzienā [22].

Vispārēji ir pieņemts, ka “jonu vēju” pārsvarā izraisa elektriskā lauka ierosinātā H_3O^+ jonu pārnese lauka virzienā. Lai aprēķinātu “jonu vēja” maksimālo ātrumu, pieņem, ka visa iespējamā enerģija – gan gravitācijas, gan elektriskā – tiek pārvērsta kinētiskajā enerģijā. Rezultējošais vienādojums, ņemot vērā šādu nosacījumu, ir (Δx_{\pm} attālums līdz pozitīvam vai negatīvam elektrodam) [16]:

$$u_{elec} = \sqrt{\frac{2j\Delta x_{\pm}}{\rho\mu_{\pm}}}, \quad (3)$$

Pēc šīs formulas aprēķinātais teorētiskais maksimālais jonu vēja ātrums sasniedz $0,8\text{--}5,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [16], [18], [73]. Pretēji lādēto jonu un elektronu daļiņas veido pretēji virzītās viļņveida kustības. Skaitliskos aprēķinos bieži neievēro pretēji lādēto daļiņu kustību, tāpēc eksperimentālā maksimālā “jonu vēja” vērtība ir mazāka par teorētisko [17], [18].

Liesma ir elektriskā sistēma ar telpiski nodalītu pozitīvo un negatīvo lādiņu [15], [61], un elektriskajā laukā var novērot liesmas konfigurācijas izmaiņas: paralēlajā laukā novēro liesmas garuma izmaiņas [21], [74], perpendikulārajā laukā – liesmas nolieces vai paplašināšanos [22], [75]. Elektriskā lauka ietekme uz liesmas plūsmu notiek vektorāli, tāpēc elektriskā lauka tilpuma spēka ietekmes virziens ir stipri nozīmīgs. Elektriskais lauks var uzlabot lādēto daļiņu difūzijas ātrumu, paātrinot ambipolāro elektronu difūziju degmaisījuma samaisīšanas zonā, uzlabojot siltuma pārneši degmaisījuma sagatavošanas zonā un veicinot degmaisījuma aizdegšanos [21]. Ar elektrisko tilpuma spēku radītais “jonu vējš” uzlabo arī konvektīvo siltuma atdevi sildvirsmām [75], [76]. Plašāk par elektriskā lauka un liesmas mijiedarbības efekta teorētiskajiem aspektiem – promocijas darba 1.5. nodaļā.

1.5. Elektriskā tilpuma spēka ietekmes analītiskais izvērtējums

Matemātisko modeli zemas intensitātes pieliktajam elektriskām laukam regulē Eilera saglabāšanas vienādojumi, kas apraksta reakcijas plūsmas uzvedību elektrohidrodinamisko spēku klātbūtnē. Tas ietver masas (4. form.), impulsa (5. form.), kopējās enerģijas (6. form.) un sugu blīvuma saglabāšanu (7. form.) pēc *Poinsot* un *Veynante* [19], [77].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \otimes \vec{u} + p\mathbf{I} - \boldsymbol{\tau}) = \rho \sum_i^N w_i \vec{F}_i \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} H + \vec{h} - (\boldsymbol{\tau} - p\mathbf{I}) \cdot U) = - \sum_i^N H_i \dot{m}_i + \rho \sum_i^N w_i \vec{F}_{\phi,i} \cdot (\vec{u} + \vec{V}_{D,i}) \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho w_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho (\vec{u} + \vec{V}_{D,i}) w_i) = M_{r,i} \dot{m}_i \quad (7)$$

Vienādojumi aprēķina blīvuma ρ , ātruma vektora \vec{u} , kopējās enerģijas H un reaģējošo ķīmisko i -to vienību w_i (gan lādēto, gan neitrālo) masas daļas laika t izmaiņas. Spiedienu p šajā vienādojumu sistēmā aprēķina ar sistēmas stāvokļa vienādojumu. \vec{h} ir entalpijas plūsma, kas aprēķināta pēc Furjē siltuma vadīšanas likuma. τ un I ir atbilstoši viskozitātes stresa un identitātes tenzori, $\vec{u} \otimes \vec{u}$ – divu vektoru telpu tenzora reizināšanas rezultāts, $M_{r,i}$ – i -tās ķīmiskās vienības molārā masa, $\vec{V}_{D,i}$ – difūzijas ātrums, \dot{m}_i – i -tās ķīmiskās vienības molārais veidošanas ātrums, H_i – i -tās ķīmiskās vienības entalpija, savukārt $\vec{F}_{\varphi,i}$ – elektriskais tilpuma spēks, kas iedarbojas uz ķīmisko i -to vienību plūsmā. Elektrodinamisko spēku var aprakstīt ar 8. formulu, savukārt \vec{E}_{φ} var aprēķināt pēc Gausa likuma (9. form.) [72].

$$\vec{F}_{\varphi,i} = \sum_i^N q_{\pm,i} \vec{E}_{\varphi} n_{\pm,i}, \quad (8)$$

$$\nabla \cdot \vec{E}_{\varphi} = -\nabla^2 \varphi = \frac{\sum_i q_{\pm,i} n_{\pm,i}}{\epsilon_0}, \quad (9)$$

Visvairāk no daļiņas lādiņa ir atkarīgs difūzijas ātrums \vec{V}_i , savukārt lādētās daļiņas difūzijas ātruma izmaiņas elektriskajā laukā pēc 7. formulas ietekmē i -tās lādētās daļiņas masas daļas izmaiņas laikā un telpā. Neitrālajām daļiņām difūzijas ātrumu apraksta Fika likums, turklāt lādētām daļiņām jāievēro arī papildu masas dreifa plūsma dažāda elektriskā kustīguma $\mu_{\pm,i}$ dēļ:

$$\rho w_i \vec{V}_{D,i} = -\rho V_{D,i} \frac{M_{r,i}}{M} \nabla \chi_{\pm,i} + q_{\pm,i} \rho w_i \mu_{\pm,i} \vec{E}_{\varphi}, \quad (10)$$

kur $\chi_{\pm,i}$ – i -tās lādētās daļiņas molārā daļa, $V_{D,i}$ – tās termiskās difūzijas koeficients, izteikts ar $\lambda(\rho c_p)^{-1}$, kur λ – siltuma vadības koeficients, c_p – izobārā gāzes maisījuma siltuma ietilpība, M – gāzu maisījuma molārā masa [77].

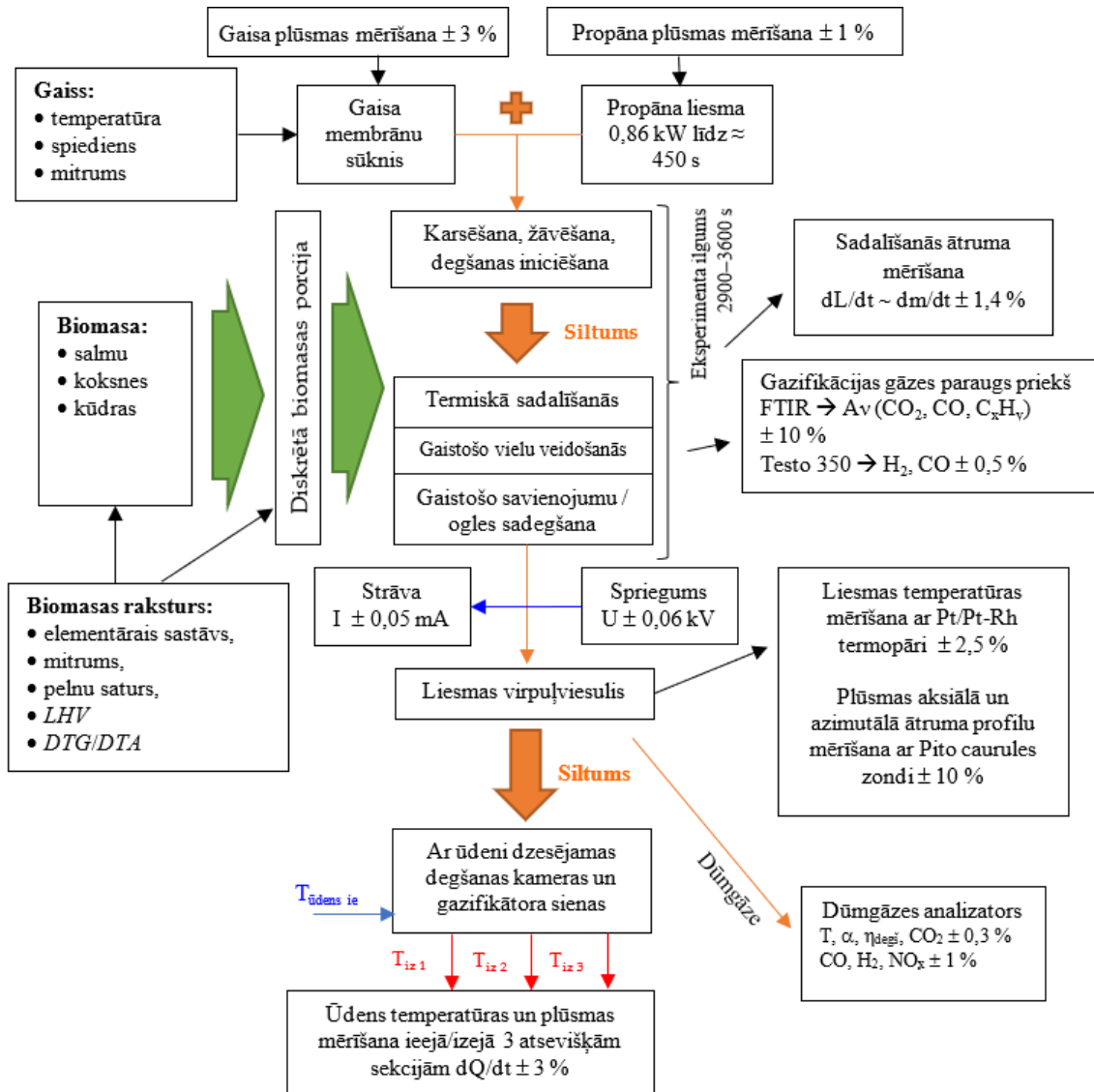
2. EKSPERIMENTĀLĀS IEKĀRTAS IZGATAVOŠANA, TESTĒŠANAS METODOLOĢIJA UN VALIDĀCIJA

Otrajā promocijas darba nodaļā aprakstītas eksperimentālo pētījumu un tehnoloģiskās aprobācijas iekārtas, mērinstrumenti un metodoloģija. Eksperimentālā izpēte iedalīta divos galvenajos posmos: *EFD* tehnoloģijas izpēte uz periodiskas darbības mazas jaudas (4 kW) granulētās biomasas degšanas iekārtas un tehnoloģijas aprobācija ar nepārtrauktas darbības rūpniecisko (līdz 20 kW) degli.

2. attēlā redzama izvērsta biomasas degšanas procesa elektrodinamiskās vadības aprobācijas eksperimentālās izpētes metodoloģijas shēma ar kritisko posmu aprakstu un galvenajiem nemainīgajiem ieejas un mainīgajiem izejas parametriem. Pilna tehniskā principiālā shēma – promocija darba 9. pielikumā.

Eksperimentālajā darbā tika izmantots pozitīvi lādēts, aksiāli ievietots stieples veida nihroma (NiCr) elektrods ar neizolētu garumu 100 mm un diametru 3 mm. Elektrodam pieliktā potenciāla lielumu regulēja robežās no (0,6 kV līdz 1,8 kV) \pm 0,06 kV, ierobežojot (ar 248 k Ω pretestību) jonu strāvu līdz 7 mA un sekojoši ierobežojot izlādes veidošanos telpā starp elektrodu un biomasas ogles

virsmu. Potenciāla starpības verificēšanai lietoja voltmetru ar sprieguma mērīšanas diapazonu līdz 3 kV un mērinstrumenta kļūdu ne vairāk par $\pm 0,5\%$. Pieliktā sprieguma lielums bija vienīgais mainīgais ieejas parametrs. Biomasas degšanas elektrodinamiskās vadības eksperimentālie pētījumi veikti ar vienādiem kontrolējamiem sākuma parametriem: gaisa plūsmas daudzuma, liesmas plūsmas struktūras, pievadītā siltuma daudzuma $P_{prop} = 0,86$ kW, dzesējamā ūdens plūsmas daudzumiem, biomasas paraugu raksturīpašībām un masas.



2. att. Eksperimentālās izpētes metodoloģijas shēma.

LUFU aerodinamiskā režīma eksperimentālajā priekšizpētē konstatēts [78], ka optimāls virpuļplūsmas padeves režīms dažādas izcelsmes biomasu degšanas nodrošināšanai ir $G_z/G_\theta \approx 30/40$ $l \cdot min^{-1}$, kur G_z ir zem granulu slāņa nodrošināta gaisa padeve $0,6$ $g \cdot s^{-1}$ ($\alpha_z \approx 0,4-0,5$) biomasas termiskās sadalīšanas procesa uzturēšanai, G_θ – sekundārā gaisa

virpuļplūsmas padeve, kas tika nodrošināta virs granulu slāņa pie $0,8 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ ($\alpha_\theta \approx 1,2\text{--}1,5$). Gaisa $30\text{--}40 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ padeves kontrolei izmantoti *Testo 6441 DN15* (ražotājs *Testo SE & Co KGaA*, Vācija) plūsmas mērītāji ar precizitāti $\pm 3\text{--}4 \%$. Liesmas virpuļplūsmas struktūra konstatēta, veicot lokālus liesmas plūsmas ātruma sadalījumu mērījumus, veidošanās procesu varēja novērot pēc degšanas zonas temperatūras un iekārtas siltuma jaudas izmaiņām, kā arī vizuāli.

Dzesējamā ūdens plūsmas padeves vienmērīguma nodrošināšanai veikts periodisks ūdens padeves monitorings ar ūdens 1000 ml mērcilindru ar minimālo iedaļas vērtību 10 ml. Ūdens plūsmas regulēšana iekārtā veikta ar caurplūsmas ventiļiem ar regulēšanas precizitāti $\pm 1 \%$.

Ieejas informācija par dažādas izcelsmes biomasas paraugu raksturojošiem parametriem (elementāro sastāvu, termiskās sadalīšanas kinētiku, mitruma un pelnu saturu, *FTIR*, *LHV*, *DTG/DTA*, pirolīzes produktu sastāvu) sagatavota sadarbībā ar Latvijas Koksnes ķīmijas institūtu. Eksperimentālajiem pētījumiem izmantotas komerciālās biomasas granulas (salmu, koksnes un kūdras). Kviešu salmu granulas ražotas SIA “EkoGrans” atbilstoši *EUBIONET 14961-6*. Koksnes granulas iegādātas SIA “Kurzemes granulas”, tās atbilst Vācijas *DINplus* standartam un Eiropas *ENplus A1 premium* standartam. Kūdras granulas iegādātas SIA “Zelta zeme” (Līvānu kūdras fabrika), pagatavotas, izmantojot Skrebeļu augstā purva kūdras maisījumu no dažādiem dziļumiem. Paraugu raksturojošie parametri bija nemainīgi.

Granulētās biomasas diskretās porcijas masa – salmiem – 440 g ($\rho_{\text{slāņa}} = 557 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), koksnei – 470 g ($612 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), kūdrai – 500 g ($690 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) – tika kontrolēta, lai nodrošinātu granulu slāņa augstumu līdz propāna padeves iekārtā. Siltums ($P_{\text{prop}} = 0,86 \pm 0,01 \text{ kW}$) no propāna liesmas gazifikatorā tika izmantots biomasas degzācības un aizdegšanas ierosināšanai. Propāna padeve tika pārtraukta pēc 400 sekundēm (500 s – kūdrai), kad izveidojās granulētās biomasas pašuzturošais degšanas process. Salmu, koksnes un kūdras granulu diskreto porciju pilnīga termoķīmiskā pārveidošanās (iekārtā ar jaudu līdz 4 kW) ilgst aptuveni 2900–3800 s.

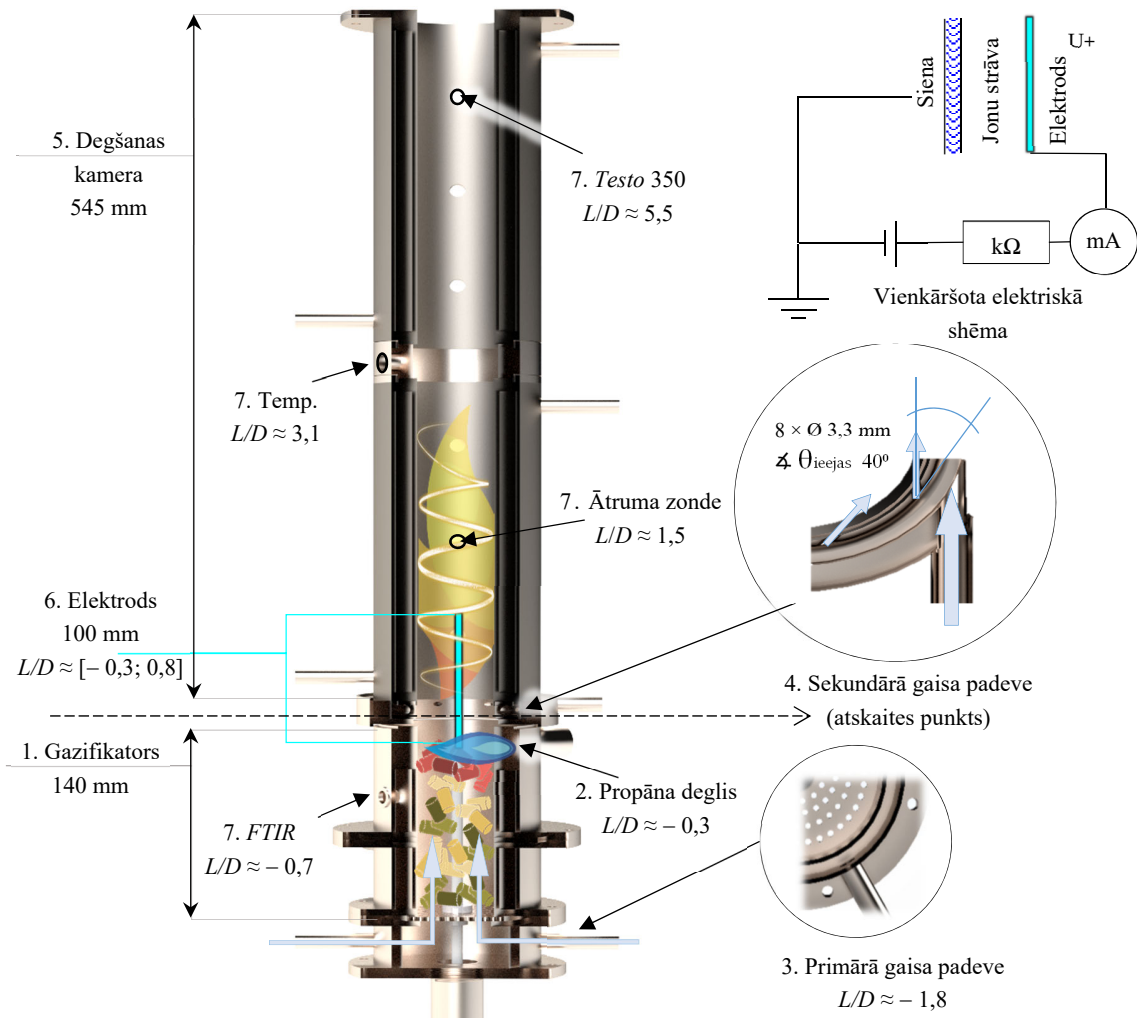
Eksperimenta atbilstības un precizitātes kontrolei tiešsaistē tika izvērtēti dažādi izejas (liesmas un plūsmas sastāva) parametri: temperatūra, skābekļa (O_2) saturs un oglekļa monoksīda (CO) saturs dūmgāzēs. Pēc katra eksperimenta rezultāti izvērtēti un salīdzināti ar iepriekšējiem, izvērtējot procesu atkārtojamību. Dažādu izejas parametru rezultātu (piemēram, plūsmas dinamikas izmaiņas, iekārtas jaudas izmaiņas, gazifikācijas un degšanas produktu sastāva izmaiņas u. tml.) validēšanai veikti vismaz pieci atkārtojumi. Promocijas darbā veikti aptuveni 60 eksperimenti, apstrādāti un analizēti masīvi datu apjomi. Datu pieraksts tika veikts reizi sekundē, katram mērījumam izmantojot tiešsaistes reģistratorus, kas pēc tam apkopoti un apstrādāti, izmantojot profesionālu programmnodrošinājumu.

Eksperimenta izejas parametru mērījumi tika veikti, ievērojot LUFİ laboratorijas aprīkojuma iespējas. Izmantotās mērīšanas metodes var iedalīt divās grupās – liesmas parametru kinētiskie mērījumi un vidējie lokālo parametru mērījumi. Eksperimentālie pētījumi par elektriskā lauka ietekmi uz degšanas procesa veidošanos apvieno kompleksus plūsmas ātruma komponentu (u_z , u_θ), liesmas temperatūras (T), jonu strāvas (I), degzācības produktu (CO , H_2 , C_2H_2 , C_2H_4 , CH_4) un

dūmgāzu (O_2 , CO_2 , CO , H_2 , NO_x) sastāva, biomasas termiskās sadalīšanās ātruma (dm/dt , $g \cdot s^{-1}$), strāvas, kā arī iekārtas siltuma jaudas kompleksus mērījumus.

2.1. Eksperimentālās izpētes iekārtas apraksts

EFDFD tehnoloģijas izpēte uz periodiskās darbības iekārtas (3. att.) ietver: 1 – biomasas paraugu raksturīpašību noteikšanu; 2 – granulētās biomasas termiskās sadalīšanās procesa izpēti ar degšanas procesa raksturošanu bez pieliktā ārēja elektriskā lauka; 3 – elektriskā lauka intensitātes un liesmas strāvas sadalījuma izpēti; 4 – biomasas degšanas procesa liesmas virpuļplūsmas parametru izpēti ar ārējā elektriskā lauka ietekmi un bez tās; 5 – termisko sadalīšanos, gazifikācijas produktu veidošanos, degšanas emisiju veidošanos un siltuma konvektīvās pārnese procesu izmaiņu izpēti ārējā līdzstrāvas elektriskajā laukā.



3. att. Eksperimentālās iekārtas trīsdimensiju zīmējums.

Eksperimentālā iekārta (3. att.) ir periodiskas darbības reaktors ar kopējo siltuma jaudu līdz 4 kW, kurā tiek ierosināta granulētas biomasas diskrēto porciju termiskās sadalīšanās (gazifikācija) un nodrošināta termiskās sadalīšanās produktu sadedzināšana. Iekārtas degšanas kameru veido ar ūdeni dzesējams sekcionēts cilindriskais kanāls (iekšējais diametrs – $D = 88$ mm, kopējais garums – līdz $L_{kop} \approx 750$ mm).

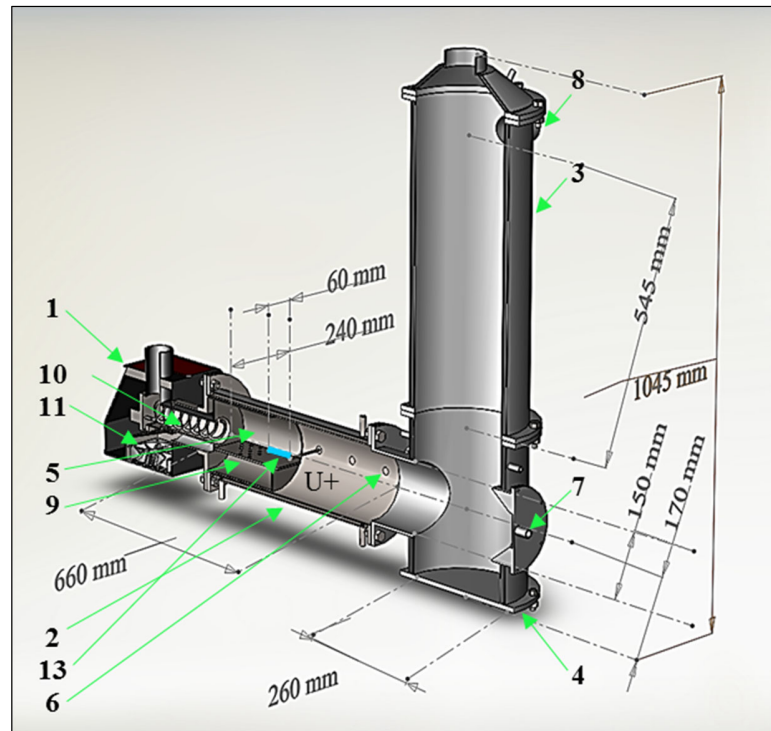
Iekārtas konstrukcijas galvenās sastāvdaļas: 1 – cilindrisks ar ūdeni dzesējams biomasas gazifikators, kura garums ir 140 mm un kurš tiek piepildīts ar biomasas granulām; 2 – propāna deglis, kas paredzēts biomasas termiskās sadalīšanās un degšanas ierosināšanai; 3 – primārā aksiālā gaisa padeve (G_z) gazifikatora lejasdaļā caur sietiņu ar $\approx 2-3$ mm atverēm gazifikācijas procesu uzturēšanai; 4 – sekundārā gaisa virpuļplūsmas padeve G_θ degšanas kameras pamatnē caur 8 azimutālām atverēm, kuru diametrs ir 3,3 mm un 40° izplūdes leņķis pret pieskari; 5 – divas cilindriskas ar ūdeni dzesējamas degšanas kameras sekcijas, kuru garums $L = 250$ mm; 6 – aksiāli simetrisks nihroma elektrods, kura garums 100 mm un diametrs 3 mm; 7 – diagnostiskās atveres liesmas parametru lokālajiem mērījumiem.

Mērinstrumentu izvietojums ir noteikts pēc L/D parametra, kur L – mērinstrumenta pozīcija attiecībā pret sekundārās gaisa padeves sprauslu, D – degšanas kameras iekšējais diametrs. Plašāk par mērījumu instrumentiem un metodiku – promocijas darba 2.3. apakšnodaļā.

2.2. Tehnoloģiskā prototipa aprobācijas iekārtas apraksts

Elektriskā lauka tehnoloģijas aprobācijai tika izveidota prototipa iekārta (4. att.) uz *Peltech* PV-20a granulu degļa bāzes ($P_{max} = 20$ kW), kurai trīs ar ūdeni dzesējas degšanas kameras sekcijas (4. att.), nodrošinot biomasas granulu padevi iekārtā ar vidējo ātrumu $0,85-1,1$ g·s⁻¹.

Tehnoloģisko iekārtu veido granulu deglis (4. att. 1) un degšanas kamera (eksperimentālais katls), kas sastāv no horizontālā ($\varnothing 150$ mm, $L = 660$ mm) posma (4. att. 2) un divām vertikālām ($\varnothing 260$ mm, $L = 950$ mm) dzesējamās degšanas kameras sekcijām (4. att. 3, 4). Kameras ir aprīkotas ar diagnostiskām atverēm lokāliem liesmas plūsmas ātruma, temperatūras un sastāva mērījumiem (4. att. 5, 6, 7, 8). 6. un 7. atverē degšanas kameras centrā tika mērītas plūsmas temperatūras (T_1 un T_2). Granulētā biomasma deglī tika padota no granulu tvertnes (4. att. 9) ar šneka palīdzību (4. att. 10). Primāro un sekundāro gaisa plūsmu deglim piegādā ventilators (4. att. 11). Primārais gaiss tiek ievadīts caur granulu šneka tipa padeves kanālu. Sekundārā gaisa plūsma tiek piegādāta caur azimutāliem caurumiem degļa perforētajā panelī, nodrošinot virpuļojošu plūsmu sadegšanas kamerā. Biomasas primārā uzsildīšana tiek veikta ar tena tipa elektrisko sildītāju. Elektrods tika uzstādīts uz horizontālās kameras centrālās ass 3. atverē, kas atrodas 240 mm attālumā no degļa izejas. Elektroda neizolētās virsmas efektīvais garums virzienā uz degļa izeju ir 60 mm. Ūdens dzesēšana sekcijām notiek līdzplūsmā: atsevišķi horizontālai sekcijai un vertikālām sekcijām kopā. Ūdens padeve horizontālajā (10 ml·s⁻¹ aptuveni pie 300 K) un vertikālajā (4 ml·s⁻¹ un 3 ml·s⁻¹) kamerā tika kontrolēta, regulējot barošanas ūdens vārstus. Kalorimetriskie ūdens mērījumi veikti barošanas ūdenim un horizontālas/vertikālās sekcijas izejā.



4. att. Tehnoloģiskās iekārtas trīsdimensiju modelis.

2.3. Mērījumu instrumenti un metodoloģija

Salmu, koksnes un kūdras elementārā sastāva mērīšanai pēc *LVS EN 15104:2011* standarta tika izmantots *Vario Macro* aparāts (*ELEMENTAR Analysensysteme*, Vācija). Pelnu saturs noteikts, karsējot paraugu *ELF 11/6B* krāsnī (*Carbolite Gero Ltd.*, Apvienotā Karaliste) pie 830 ± 10 K atbilstoši *LVS EN 14775:2010* metodei. *HHV* un *LHV* aprēķināts ar *Friedl* regresijas vienādojumu [8]. Biomasas *DTG/DTA* analīze veikta oksidējošā atmosfērā (gaisa plūsma $50 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$) $10 \pm 0,3 \text{ K} \cdot \text{min}^{-1}$ karsēšanas režīmā 300–900 K robežās, izmantojot *Star System TGA/SDTA 851e* (*Mettler Toledo AG*, Šveice). Gaistošo vielu un ogļveida fāzes daudzuma noteikšanai, kā arī lignocelulozes pirolīzes produktu analīzei izmantota apvienotā pirolīzes (770 K) gāzes hromatogrāfijas un masspektrometrijas metode ar *PY-2020iD/AS1020E* (*Frontier Laboratories Ltd.*, Apvienotā Karaliste). Biomasas paraugu *FTIR* analīzei izmantots *Spectrum One* (*Perkin Elmer Ltd.*, Apvienotā Karaliste) 4000–400 cm^{-1} diapazonā (2 mg, KBr tabletē).

Liesmas un plūsmas raksturojošo parametru lokālie mērījumi veikti, izmantojot mikromanipulatoru (± 1 mm), kas ļauj pārvietot diagnostikas rīkus (termopārus, ātruma zondes vai gāzes paraugu noņemšanas zondes) degšanas kamerā radiālā virzienā. Virpuļplūsmas ātruma komponentes lokālus mērījumus veikti, izmantojot *Pito* zondi un *Testo 435* (ražotājs *Testo SE & Co KGaA*, Vācija) ar mērījumu kļūdu līdz ± 10 %. Lai samazinātu mērījumu metodikas kļūdu, viena mērījuma vērtības noteikšanai apstrādātas 20 signāla vienības ar soli 1 s. Ātrumu komponentu

mērīšana un signāla reģistrācija eksperimenta laikā veikta, kad ir sasniegts pašuzturošs biomasas degšanas process.

Liesmas temperatūras mērījumiem lietoti S tipa (Pt/Pt-Rh) termopāri ar mērīšanas diapazonu [273; 1723] K un standarta mērījumu kļūdu $\pm 1,5$ K. Temperatūru sadalījuma mērīšanas metodikas kļūda pie vidējās temperatūras svārstības 20 K ir $\pm 2,5$ %. Sadalījuma mērījumi veikti līdzīgi plūsmas ātruma sadalījuma mērīšanas metodikai.

Jonu strāvu mērīšanai izmantots analogsignāla ampērmetrs ar precizitāti $\pm 0,005$ mA pie [0,005; 0,75] mA vai $\pm 0,05$ mA pie [0,5; 7,5] mA ar maksimālo mērījumu kļūdu līdz ± 6 %. Datu pieraksts veikts manuāli visā eksperimenta laikā ar soli 50 s, aprēķinot vidējo strāvas stiprumu laika diapazonā. Lādēto daļiņu (elektronu, jonu) strāvas radiālā un aksiālā sadalījuma mērījumiem darbā izmantota *Langmuir* dubultzondes metode [75], [79]. Dubultzonde bija veidota no diviem savstarpēji izolētiem $\approx 4,5$ mm attālumā nostiprinātiem NiCr vadiem (\varnothing 0,50 mm), izmantojot fajansa keramikas \varnothing 2,90 mm caurulītes. Neizolētā vadu daļa, kuras garums bija 5 mm, tika novietota paralēli z asij. Potenciāla starpības nodrošināšanai starp vadiem izmantots līdzstrāvas barošanas bloks. Voltampēru raksturlīkņu uzņemšanai zonde tika izvietota liesmas centrā. Mainot barošanas bloka spriegumu ar soli 0,06 kV un [0,30; 3,18] kV robežās, tika pierakstītas vidējās strāvas vērtības. Vidējā strāvas vērtība tika summēta no 5 ampērmetra rādījumiem, kas reģistrēti 20 s mērījumu laikā. Pēc voltampēru raksturlīkņu datu analīzes noteikts strāvas piesātinājums robežās no 0,6 kV līdz 1,6 kV (pieliktais spriegums). Lokālā strāvas blīvuma mērījumiem turpināts izmantot 0,9 kV spriegumu. Pārvietojot zondi ar mikromanipulatoru (solis 3 mm) pa degšanas kameras rādiusu definē strāvas sadalījumu liesmas noteiktajā garumā. Katra strāvas sadalījuma punkta noteikšanai pa degšanas kameras rādiusu veikti vismaz 10 strāvas signāla mērījumi. Ievērojot vidējo eksperimentālo vērtību strāvas piesātinājumā $\approx 0,4$ mA un mērīinstrumenta kļūdu šajā mērīšanas diapazonā ($\pm 0,05$ mA), vidējā mērījumu kļūda ir 12 %.

Ar Furjē transformācijas infrasarkanās spektroskopijas metodi (*FTIR*) noteiktas biomasas termokīmiskās sadalīšanās produktu (koncentrācijas izmaiņas dažādās biomasas degšanas stadijās, veicot šo savienojumu absorbcijas joslu intensitātes izmaiņu mērījumus IS spektra vidējā rajonā: CO₂ (668 cm⁻¹), CO (2169 un 2115 cm⁻¹ vidējais lielums), C₂H₂ – acetilēns (729 cm⁻¹), C₂H₄ – etilēns (949 cm⁻¹), CH₄ – metāns (3017 cm⁻¹) un skābes/aldehīdi (1758 un 1733 cm⁻¹). *FTIR* mērījumiem izmantots *Varian Cary 640-IR* spektrometrs (ražotājs *Agilent Technologies Inc.*, ASV). Spektrometra iestatījumi nodrošināja signāla stiprumu tukšai kivetī (≈ 225 ml) ar diviem KBr (7 mm biezumā) lodziņiem ≈ 6 – $6,5$ Abs (absorbcijas relatīvās vienībās). Zemākā nolasīšanas vērtība ir aptuveni 0,05 Abs. Absorbcijas joslu intensitāšu mērījumu standartkļūda dažādiem savienojumiem svārstās no 3 % līdz 11 %.

Lokāliem degšanas produktu temperatūras T (°C) un sastāva (O₂ %, CO₂ %, CO ppm, NO ppm, NO₂ ppm, NO_x ppm, H₂ ppm), gaisa pārpalikuma koeficienta (α), kā arī degšanas procesa efektivitātes ($\eta_{degš}$, %) un siltuma zudumu Q_{zud} . mērījumiem izmantots gāzu analizators *Testo 350* (*Testo SE & Co. KGaA*, Vācija). Gāzes analizators veic nepārtrauktu degšanas produktu sastāva mērīšanu. CO₂ noteikšanas [0; 50] % robežu precizitāte ir $\pm 0,3$ %. O₂ noteikšanas [0; 25] % robežu

precizitāte ir $\pm 0,8\%$. CO un H₂ precizitāte ir ± 10 ppm, tomēr [0; 500] ppm mērījumu robežās precizitāte ir ± 2 ppm. NO_x (NO+NO₂) noteikšanas precizitāte ir ± 5 ppm. Dūmgāzes sastāva mērījumi veikti visa eksperimenta laikā, lai kontrolētu degšanas procesa attīstīšanos un degšanas pašuzturēšanas posma sasniegšanu, tādā veidā nodrošinot degšanas procesa kontroli, salīdzināšanu un eksperimenta atkārtojamību. Procesā laikā analizētie parametri salīdzināti pēc vidējām vērtībām, ievērojot korekciju uz mēršūnu reakcijas laiku un izvērtējot signāla standartnovirzes. *Testo 350* veic signāla reģistrāciju ar soli 1 s, tāpēc plūsmas parametru radiālā sadalījuma noteikšanai veikti 30 mērījumi. Viena eksperimenta laikā ir iespējams pierakstīt divas sadalījuma raksturlīknes. Izmantojot *Testo 350* kopā ar *FTIR* spektrālo analīzi, biomasas termiskās sadalīšanās produktu paraugiem noteikta arī CO un H₂ koncentrācija ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$).

Iekārtas siltuma jaudas izmaiņu pētījumiem dažādās biomasas termokīmisko pārvērtību stadijās izmantoti dzesējamā ūdens kalorimetriskie mērījumi. Siltuma jaudas mērīšanas metode ir reducēta uz gazifikatora un degšanas kameras sekciju dzesējošā ūdens plūsmas un temperatūras izmaiņu mērījumiem. Ūdens plūsma tika regulēta gazifikācijas sekcijā aptuveni $12\text{--}15 \text{ ml}\cdot\text{s}^{-1}$ (atkarībā no granulu tipa) ar ieplūdes temperatūru aptuveni 289 K, degšanas kameras pirmajā daļā $\approx 15 \text{ ml}\cdot\text{s}^{-1}$ (≈ 295 K), otrajā daļā $\approx 14 \text{ ml}\cdot\text{s}^{-1}$ (300 K). Ūdens plūsmas temperatūras mērījumiem katras sekcijas ieejā un izejā izmantoti termojūtīgie sensori *AD590KF* (*OMEGA Engineering Inc.*, ASV) ar temperatūras mērīšanas robežām [218; 423] K un standartkļūdu $\pm 0,1$ K. Signāla reģistrēšana un pierakstīšana veikta tiešsaistē, aprēķinot termosensoru 10 signālu vidējo 1 sekundē un samazinot trokšņa ietekmi uz signāla vērtību. Kalibrēšanas kļūda ir ± 3 %.

Granulētās biomasas termiskās sadalīšanās ātruma noteikšanai veikta granulu slāņa augstuma izmaiņu mērīšana gazifikatorā, izmantojot brīvi lejupslīdošu keramisku stieni. Ievērojot biomasas slāņa blīvumu un ņemot vērā mērījumu biežumu, relatīvā termiskās sadalīšanās ātruma noteikšanas metodikas kļūda ir $\pm 1,4$ %.

Aprakstītie instrumenti izmantoti gan 4 kW, gan 20 kW ierīcēs, tomēr ir nelielas atšķirības vienlaikus pētīto parametru skaitā, kā arī eksperimenta metodikā. Tā kā darba kopsavilkumā ir samazināts eksperimenta mērīšanas metodikas apraksta apjoms, par pamatu tika ņemts mērījumu apraksts no 4 kW ierīces. Plašāk par mērījumu instrumentu, metodiku, precizitāti un atkārtojamību – promocijas darba 2.2. nodaļā.

3. SILTUMA PROCESU EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI

Praktiskajā daļā ir apvienotas teorētiskās zināšanas, kas iegūtas, veicot tehniskās un zinātniskās literatūras analīzi, un eksperimentālo pētījumu rezultāti, kas iegūti, izpildot promocijas darba uzdevumu, lai veiktu ārējo elektrisko spēku ietekmes izpēti un tās analīzi uz biomasas gāzveida vielu degšanas procesu raksturojošiem parametriem.

3.1. Salmu, koksnes un kūdras biomasas paraugu raksturojums

Eksperimentā izmantojamas biomasas paraugu raksturojošo īpašību analīze sniegta 1. tabulā. Ievērojot *DTG/DTA* rezultātus (5. att.), secināts, ka kviešu salmu termiskā sadalīšanās sākas ātrāk (pie 470 K), salīdzinot ar skujkoku biomasas un kūdras paraugiem, pateicoties īpašam hemicelulozes veidam, kas satur ksilānu. Visintensīvākais termiskās sadalīšanās maksimums ($\approx 65 \mu\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$) ir novērojams koksnes biomasai, ko nosaka augstais gaistošo vielu saturs koksnes biomasā. Tomēr primārā sadalīšanās posmā gan koksnes, gan salmu biomasas paraugi degšanas procesā veido līdzīgu eksotermisko efektu. Kūdrai zemā holocelulozes un augstā heterociklisko aromātisko savienojumu satura dēļ termiskās sadalīšanās process galvenokārt notiek augstā temperatūrā, kur notiek cietās pārņemtās fāzes oksidēšanās.

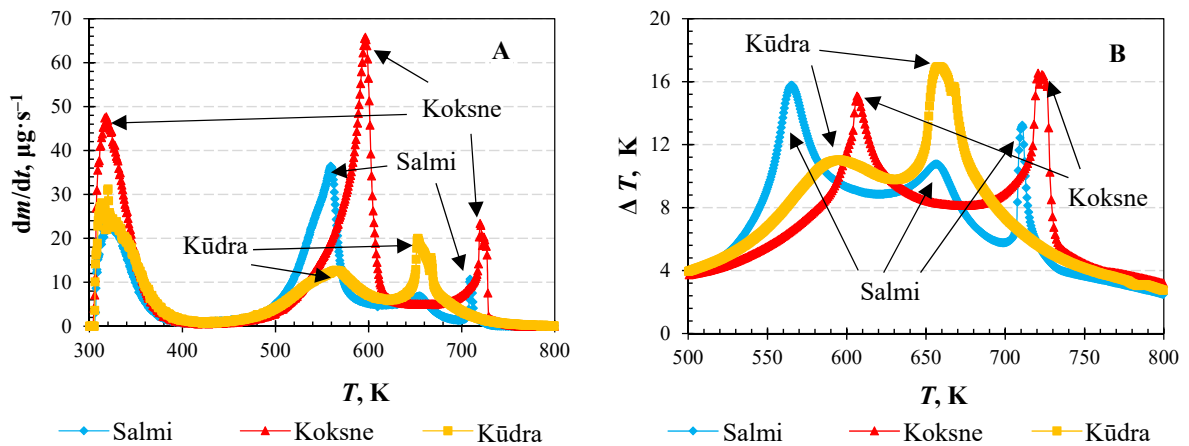
2. tabula

Biomasas paraugu granulu raksturojošās īpašības

	Kviešu salmi	Skujkoku koksne	Kūdra
Granulu diametrs **, mm	8,1	6,15	7,8
Granulu blīvums, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	(550)	(650–670)	(780)
Mitrums, w %	9,11 (9,6–10,6)	6,32 (5,6)	11,44 (8,3–11,3)
Pelnu saturs (sausā masa), %	4,26 (4,3–6,2)	0,64 (0,33–0,35)	3,02 (3,0)
Pelnu kušanas T , K	1073–1573	1743	1455
LHV , $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	15,52 (15,3–15,65)	16,61 (18,11)	17,24 (17,4–18,55)
C^* , %	46,62	49,79	53,83
H^* , %	5,09	5,15	5,12
O^* , %	42,72	44,24	36,93
N^* , %	1,31 (2,35)	0,18 (0,05)	1,11 (1,14)
S , %	(0,11)	(0,01)	(< 0,3)
Gaistošās vielas (pirolīze), %	≈ 68 %	≈ 83 % (81,01)	≈ 57 %
Gaistošās vielas (DTG), %	60,6 %	66,6 %	48,4 %
Biomasas ogle daļa (DTG), %	26,4 %	25,7 %	39,7 %
Ogļhidrāti	$77,2 \pm 1,1$	$78,4 \pm 1,1$	$73,3 \pm 1,1$
Polifenoli	$21,5 \pm 0,4$	$20,9 \pm 0,3$	$16,5 \pm 0,4$
Lipīdi	$1,3 \pm 0,1$	$0,6 \pm 0,1$	$10,4 \pm 0,2$
Gr. slāņa blīvums**, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	557	612	690
Slāņa rel. laukums**, $\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$	0,66	0,69	0,51

(...) – iekavās ražotāja dati; * – pēc sausās masas; ** – mērīts pēc metodes [80].

Eksperimentālo paraugu sekundārie termiskās sadalīšanās posmi atšķiras, pateicoties īpašam dažādas izcelsmes biomasas, ķīmiskam sastāvam, kas nosaka arī pārņemtās cietās fāzes daudzuma starpību. Ir jāatzīmē, ka kviešu salmu termiskās sadalīšanās sekundārā posma pazīmes līdzinās pārējo paraugu sekundārā posma pazīmēm, kas ļauj secināt, ka pārņemto salmu struktūra ir līdzīga kokogļu un pārņemtās kūdras struktūrai.



5. att. Eksperimentālo biomasas paraugu DTG/DTA līknes.

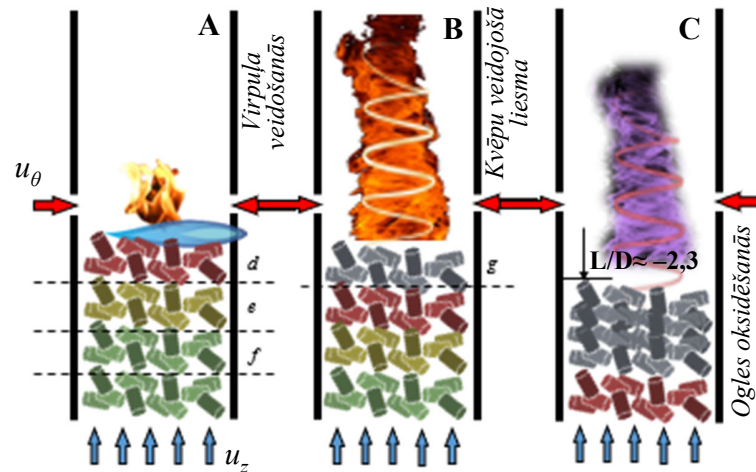
Tomēr abi salmu biomasas sekundārā posma sadalīšanās maksimumi ir mazāk izteikti, salīdzinot tos ar koksnes biomasas un kūdras attiecīgiem termiskās sadalīšanās sekundārā posma maksimumiem. Primārā posma masas zudumu izmaiņas salmu, koksnes biomasas un kūdras paraugiem ir saistītas ar dažādu biomasas gaistošo vielu un ogļhidrātu saturu, turklāt, salīdzinot ar dažādām analīzes metodēm noteikto gaistošo vielu daudzumu, var secināt, ka šīs atšķirības liecina par to, ka tikai daļa no ogļhidrātu masas pārveidojas pār gaistošām vielām. Tomēr aptuveni 15 % no hemicelulozes un celulozes masas paliek cietā fāzē, kas kopā ar lignīna termiskās sadalīšanās cietajiem produktiem veido biomasas ogles.

3.2. Granulētās biomasas degšanas bez elektriskā lauka raksturojums

Granulētās biomasas degšanas process eksperimentālajā iekārtā attīstās ar dažādiem periodiem. Eksperimentālajā iekārtā biomasas degšana notiek mainīgā slānī, kas dod iespēju analizēt dažādās degšanas procesa attīstības stadijas (liesmas virpuļa veidošanos, gaistošo vielu degšanas un ogles gruzdēšanas stadijas). Laika posmā līdz 400–500 s biomasas granulām tiek pievadīts papildu siltums, notiek biomasas pakāpeniska (līdz 700–900 s) žāvēšana (6. att. e) un attīstās termiskās sadalīšanās endo/eksotermiskie procesi (32. att. d) ar gaistošo vielu izdalīšanos un aizdegšanos, kas nosaka primāro liesmas virpuļplūsmas veidošanās stadiju (6. att. A).

Atbilstoši kalorimetriskajiem siltuma mērījumiem (7. att. B, C) biomasai pēc 800–900 s (kūdrai pēc 900–1000 s) novēro pašuzturošā degšanas procesa veidošanos, kad gaistošo vielu termoķīmisko pārvērtību eksotermiskais siltuma efekts līdzsvarojas ar biomasas uzsildīšanas, žāvēšanas un termiskās sadalīšanās endotermiskajiem procesiem. Salmu un koksnes granulētās biomasas pašuzturošais degšanas process turpinās līdz 2200–2300 s, kūdrai līdz ≈ 3200 s. Pašuzturošais degšanas process ietver divus dažādus degšanas režīmus, kas atšķiras vizuāli un pēc liesmas sastāva. Pašuzturošā posma sākuma stadijā attīstās kvēpu veidojošā liesma sarkandzeltenā krāsā [81]: līdz ≈ 1700 –1800 s salmiem/koksnei, līdz ≈ 2000 –2200 s kūdrai (6. att. B). Tālāk (6. att. C) ir novērojama zilganvioletas krāsas liesmas veidošanās. Apvienotie biomasas termiskās sadalīšanās ātruma un gaistošo vielu sastāva IS spektra mērījumi precizēja biomasas pašuzturošā

degšanas procesa veidošanās posmus (skat. promocijas darba 3.2. nod.) un apliecināja, ka liesmas krāsa mainās, stipri samazinoties C_2H_2 daudzumam liesmā.

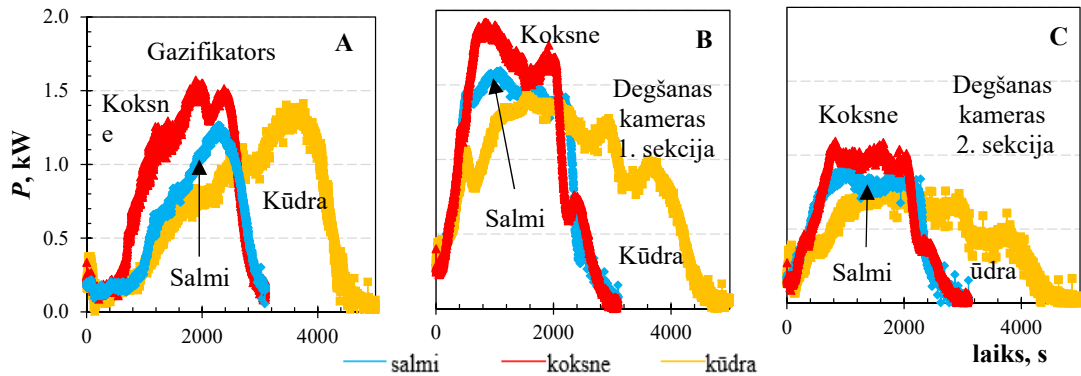


6. att. Granulētās biomasas degšanas procesa attīstīšanās shēma.

Koksnes degšanas procesā pēc 2100–3000 s C_2H_2 , CH_4 un CO koncentrācija plūsmā samazinās gandrīz līdz nulles vērtībai, kas sakrīt ar svaigās biomasas termoķīmiskā konversijas procesa beigām. Savukārt salmiem un kūdrai, mainoties degšanas režīmam, CH_4 un CO turpina veidoties reakcijas zonā, kas liecina par liesmas klātbūtni. Konstatēts, ka kūdrai un salmiem veidojas pussadalītās biomasas virskārta. Kūdrai šīs kārta veidojas, pateicoties lēnam termiskās sadalīšanās procesam lielā granulū blīvuma un augstā aromātisko ogļūdeņražu satura dēļ, salmu biomasai – augstā pelnu satura un to specifisko termisko īpašību dēļ. Ir novērojama likumsakarība starp šīs virskārtas uz granulū slāņa un zilganvioletās liesmas veidošanos.

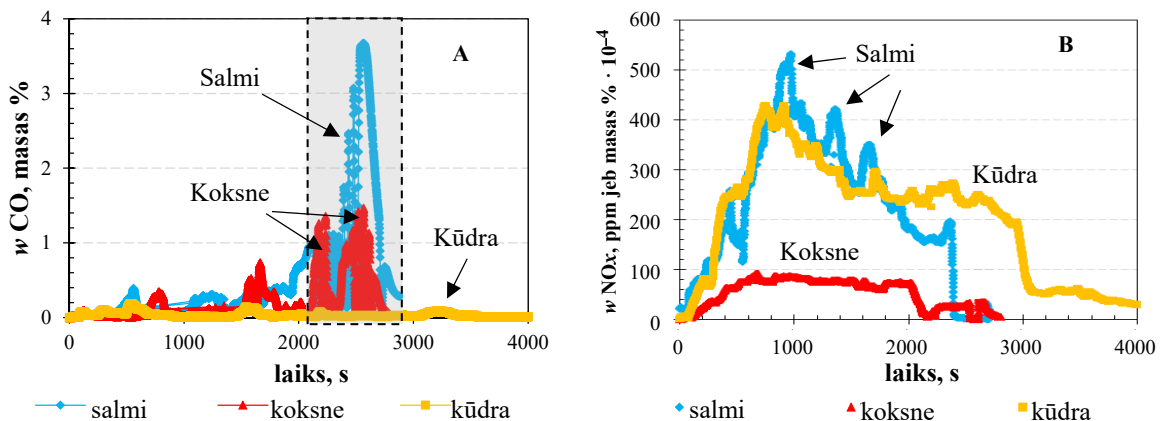
Pašuzturošais biomasas degšanas process beidzas, kad degšanas kamerā izzūd liesma, taču gazifikatorā ir novērojams siltuma plūsmas pieaugums līdz tās maksimālajai vērtībai (7. att. A), tā veidošanos nosaka siltuma pārnese no ogles gruzdēšanas reakcijas zonas uz gazifikatora sienām. Ogles gruzdēšanas procesa sākumu var konstatēt pēc CH_4 satura straujās samazināšanās liesmā. Savukārt dūmgāzēs turpina veidoties CO , pēc ≈ 2200 s izraisot intensīvu piesērējumu.

Lai arī biomasas elementārā un ķīmiskā sastāva svārstību dēļ veidojas biomasas degšanas procesa kinētikas izmaiņas, ir iespējams izdarīt secinājumus par salmu, koksnes biomasas un kūdras termoķīmisko pārvērtību raksturīgākajām pazīmēm. Intensīvo koksnes granulū termisko sadalīšanos nosaka augstais gaistošo vielu saturs (1. tab.), specifiskā hemicelulozes struktūra un augstais LHV , kas veicina ātrāku līdzsvara veidošanos starp eksotermiskiem un endotermiskiem biomasas termiskās sadalīšanas procesiem, nodrošinot visgarāko (≈ 450 mm) un viskarstāko (7. att. B, C) liesmas virpuļplūsmu, salīdzinot ar citiem biomasas paraugiem.



7. att. Biomasas paraugu degšanas procesa 4 kW iekārtas jaudas kinētikas mērījumi.

Intensīvā siltuma apmaiņa starp liesmas virpuļplūsmu un biomasas granulām nodrošina ātrāku gaistošo vielu aizdegšanos (8. att. A), zemākais slāpekļa saturs koksnes biomasā (2. tab.) nosaka zemāku NO_x izmešu daudzumu (8. att. B), salīdzinot to ar salmu un kūdras granulām NO_x emisiju dūmgāzēs. Kviešu salmu degšanas process raksturīgs ar laikā mainīga liesmas garuma veidošanos (līdz ≈ 250 mm), ko nosaka ogles/pelnu slāņa veidošanās virs biomasas slāņa virsmas. Pelnu veidošanās pakāpeniski ierobežo gaisa piekļuvi reakcijas zonai pašzurošā procesa beigu stadijā (≈ 1700 – 2300 s), atdzēsējot granulām slāņa virskārtu un ietekmējot liesmas veidošanās kinētiku.



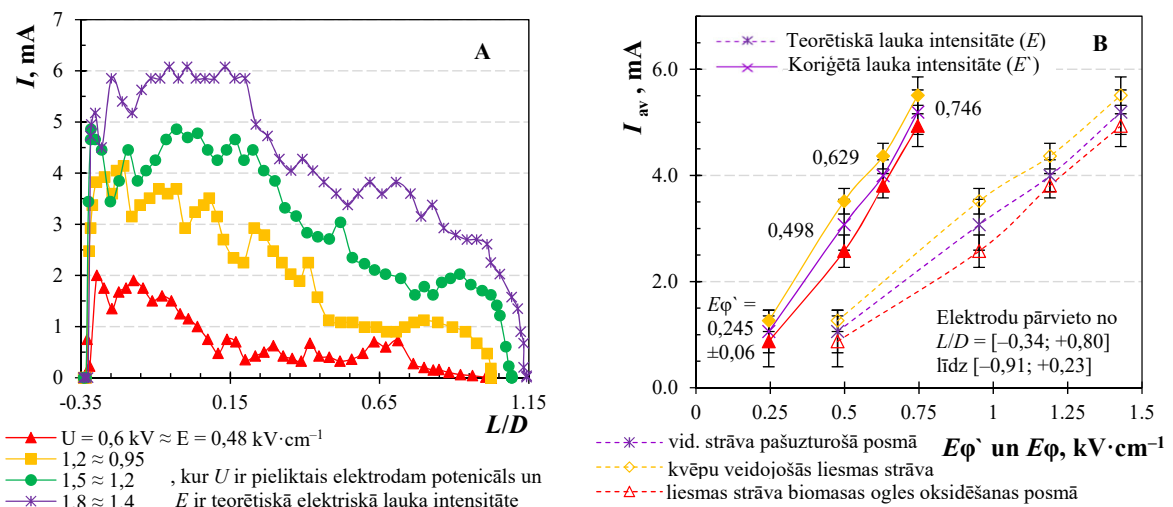
8. att. CO (A) un NO_x (B) emisiju veidošanās kinētika dūmgāzēs biomasas degšanas procesā.

Šī degšanas īpatnība izraisa problēmas salmu ogles gruzdēšanas laikā, kad dūmgāzēs pēc 2400 s veidojās liels CO daudzums (8. att. A) un samazinās siltuma atdeve gazifikatorā (7. att. A). Kūdras termiskās sadalīšanās aizkavējas granulām relatīvi lielā blīvuma, augstā mitruma satura un zema gaistošo vielu satura dēļ (2. tab.), kas apgrūtina liesmas veidošanos primārā biomasas ogļhidrātu sadalīšanās stadijā. Tomēr kūdras degšanas process ir vienmērīgāks, un tas īpaši novērojams ogļveida fāzes oksidēšanas posmā pēc 1500 s. Atšķirībā no koksnes un salmiem kūdras degšanas process raksturojas ar visīsāko (līdz 150 mm) liesmu un ilgstošāko gruzdēšanas posmu (7. att. A), ko nosaka zems gaistošo vielu un augstais oglekļa saturs granulās (1. tab.).

3.3. Liesmas strāvas eksperimentālie pētījumi

Biomases degšanas procesu dinamikas optimālai uzlabošanai ar līdzstrāvas elektrisko lauku tika veikta jonu strāvas veidošanās priekšizpēte, lai piemeklētu elektroda optimālos izmērus un to izvietojanas vietu degšanas kamerā. Lai nodrošinātu maksimāli efektīvu dažādas izcelsmes biomasu elektrisko kontroli, elektrods ir jānovieto tajā liesmas zonā, kur jonu strāva sasniedz maksimālo lielumu. Dažādas izcelsmes biomasu degšanas procesā jonu strāva sasniedz maksimālo vērtību vistuvāk gaisa un degvielas sajaukšanās zonai, kur notiek degvielas termiskā un ķīmiskā sagatavošana pirms uzliesmošanas – no 0 līdz 50 mm attālumā no biomasas granulu slāņa virsmas (9. att. A), t. i., liesmas apgabalā $L/D \approx [-0,35; +0,2]$.

EFDFD tehnoloģijas aprobācijai 4 kW iekārtā elektroda garums pārklāja $L/D = [-0,30; +2,00]$ zonu, nodrošinot elektrisko lauku visā liesmas apgabalā. Jonu strāvas samazināšanās liesmas garumā ir saistīta ar jonu veidojošo oglekļa savienojumu koncentrācijas samazināšanos. Liesmas kinētikas izmaiņas salmu biomasu degšanas laikā eksperimentāli mazāk ietekmē jonu strāvas stiprumu. Tomēr salmu degšanas posms pirms 1700 s, ko raksturo paaugstināta kvēpu koncentrācija liesmā un augsts C_2H_2 , C_2H_4 saturs degmaisījumā, atbilst lielākai jonu strāvai.



9. att. Strāvas izmaiņas liesmas garumā salmu degšanas procesā (A); liesmas jonu strāvas vērtību salīdzināšana teorētiskām un koriģētām elektriskā lauka intensitātēm (B).

Elektriskā lauka intensitāte pie pozitīvā elektroda mainās atkarībā no elektronu koncentrācijas izmaiņām un sprieguma krituma *Langmuir* dubultslānī un elektriskā robežslānī [82], [83]. Pieaugot elektronu koncentrācijai, palielinās sprieguma kritums robežslānī, samazinot elektriskā lauka intensitāti degšanas zonā [72]. 9. attēlā (B) redzamas liesmas strāvas stipruma izmaiņas atkarībā no koriģētās sprieguma vērtības (12. form.) salmu biomasas pašzūrošā degšanas posmā, salīdzinot ar elektriskā lauka intensitātes teorētiski aprēķinātajām vērtībām. Elektriskā lauka teorētiskās intensitātes aprēķināšanai izmantota 11. formula, kur $U_{\varphi, \text{pieliktais}}$ ir nodrošinātais ar barošanas bloku spriegumu pie centrālā elektroda, Δx – robežslāņa biezums pie elektroda virsmas. Robežslāņa veidošanos nosaka jonu un elektronu koncentrācija un plūsmas dinamiskais spiediens,

kas izraisa elektriskā lauka intensitātes samazināšanos, palielinoties attālumam no elektroda virsmas [82], [83]. 4 kW iekārtā $\Delta x \approx 13$ mm ($r/r_0 = [0; 0,3]$ robežās).

$$E_{\varphi} = \frac{U_{\varphi, \text{pieliktais}}}{\Delta x} \quad (11)$$

$$E_{\varphi}^{\prime} = E_{\varphi} - \frac{I_{eksp} \cdot R_{\Omega}}{\Delta x} \quad (12)$$

Plūsmas dinamikas pētījumu rezultātā ir konstatēts, ka elektriskā lauka efekts ir ierobežots ar vides elektrisko caurlaidību konkrētajā elektroda konfigurācijā. Elektriskā lauka intensitātes aprēķinos (12. form.), balstoties uz eksperimentā iegūto vidējo jonu strāvu I_{eksp} (skat. promocijas darba 2.1.1. apakšnod.), pieliktā elektroda potenciāla vērtība tika rediģēta pēc omiskā sprieguma krituma (9. att. B). Respektīvi, koriģētā elektriskā lauka intensitāte degšanas zonā tika regulēta robežās no $0,25 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ līdz $0,75 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$.

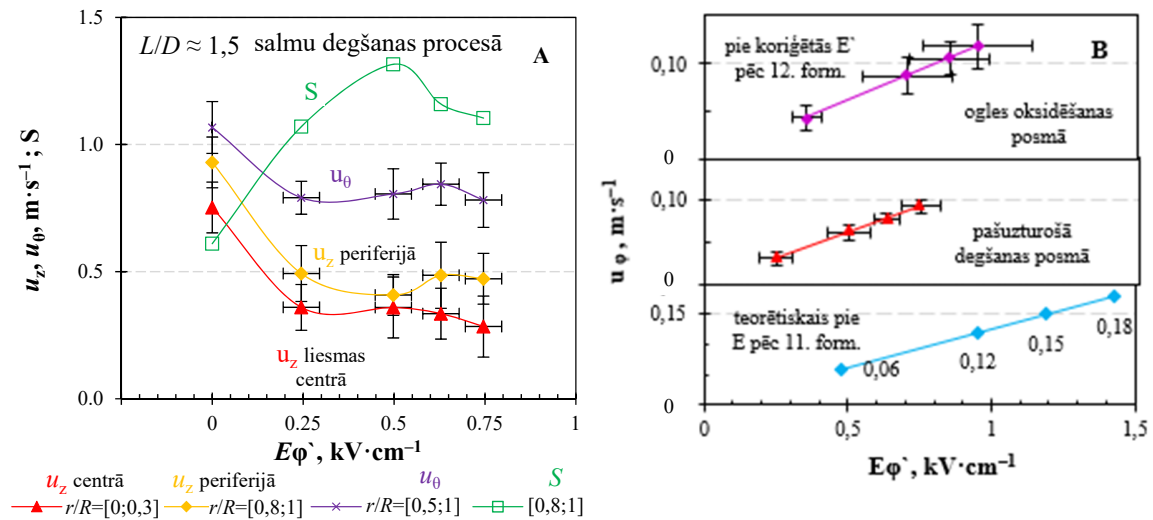
Jonu strāvas statistikas dati dažādos degšanas posmos liecina par lielu vidējās strāvas vērtību izkliedi, ko nosaka nestabilitāte, kuru izraisa virpuļojošās liesmas plūsmas oscilācija, granulu virsmas termokīmiskās izmaiņas, kvēpu daļiņu un sārnu metālu lidojošo pelnu veidošanās liesmā, kā arī cieto pelnu slāņa veidošanās uz granulu slāņa virsmas, kas augstās temperatūrās veido elektriskās strāvas vadošus pelnu un ogles aglomerātus. Savukārt jonu strāvas voltampēru raksturlīknes, kas pierakstītas, izmantojot dubultās zondes metodi, apliecināja, ka strāvas piesātinājuma veidošanos intensīvākajā jonu veidošanas zonā (pie $L/D = 0,15$) var novērot pie aptuveni $2\text{--}3 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ (salmu pašuzturošā degšanas procesā). Tomēr promocijas darbā strāvas piesātinājums netika sasniegts, jo līdz 50 % no pieliktā sprieguma samazinās omiskās pretestības dēļ, samazinot sprieguma kritumu degšanas zonā.

3.4. Liesmas virpuļplūsmas izplešanās efekts

Promocijas darbā izvēlēta gaisa padeve sekmē degvielas un gaisa sajaukšanos, uztur dažādas izcelsmes biomasas termokīmiskās pārvērtības, kas nosaka degšanas procesa veidošanos ($\eta_{degš} \approx 80\text{--}85 \%$) un degšanas zonas temperatūras uzturēšanu. Tomēr pie šāda veida sekundārās gaisa padeves veidojas augšupvērstā gaisa virpuļplūsma (1. att.), kurai daļa no azimutālā gaisa, nepiedaloties reakcijā, aizplūst gar degšanas kameras sienām. Nesajaucoties ar aksiālo gaistošo savienojumu plūsmu, šī gāzes masas kustība paaugstina gaisa pārsvaru α dūmgāzēs. Šo problēmu ir iespējams risināt, izmantojot ārējā elektriskā lauka un liesmas mijiedarbības efektus.

Aksiālā (u_z) un azimutālā (u_{θ}) ātruma radiālā sadalījuma mērījumi uzrādīja, ka elektriskā lauka ietekmē intensīvākas plūsmas dinamikas izmaiņas notiek attālumā $L/D \approx 1,5$ no degšanas zonas pamatnes (10. att. A). Šajā liesmas zonā ir konstatēta aksiālā ātruma samazināšanās plūsmas centrālajā daļā $r/r_0 = [0; 0,3]$ vidēji par $\approx 50 \%$, kā arī pie degšanas kameras sienas $r/r_0 = [0,8; 1]$. Plūsmas ātruma azimutālās komponentes samazinājums pie degšanas kameras sienas $r/r_0 = [0,5; 1]$ ir mazāk izteikts un nepārsniedz $\approx 25 \%$. Ievērojot nevienmērīgo plūsmas ātruma komponentu izmaiņas, perifērijā novēro virpuļskaitļa S paaugstināšanos no 0,6 līdz $\approx 1,1$. Minētās izmaiņas ir saistītas ar plūsmas radiālā ātruma u_r izmaiņām liesmas virpuļplūsmā. Ātruma radiālās

komponentes mērījumi, ņemot vērā šādu eksperimentālās iekārtas konstrukciju, nav iespējami, tāpēc pēc *Lawton* un *Weinberg* parauga [16] tika tuvināti aprēķinātas teorētiskā “jonu vēja” ātruma vērtības (10. att. B). Aprēķinātais “jonu vēja” ātrums tuvu elektrodam pašzuroša degšanas posmā var sasniegt $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, ja lauka intensitāte ir $E\phi \approx 0,75 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$. Stiprāks “jonu vējš” potenciāli var veidoties, degšanas procesam pārejot no kvēpu veidojošās liesmas ogles oksidēšanas posmā.

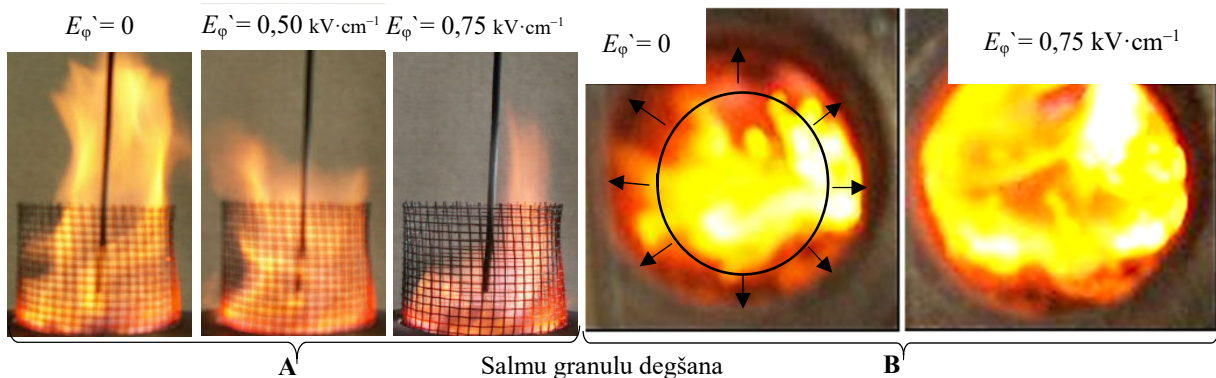


10. att. Vidējā aksiālā un azimutālā ātruma komponentu eksperimentālās vērtību izmaiņas elektriska lauka ietekmē (A); teorētiski aprēķinātā “jonu vēja” ātruma vērtības (B).

Detalizēta lauka un liesmas mijiedarbības analīze apliecina, ka primārās izmaiņas, ko izraisa elektriskais tilpuma spēks (F_ϕ), ir attiecināmas uz liesmas dinamikas izmaiņām (10. att. A), ko nosaka plūsmas nepārtrauktības vienādojums (7. un 10. form.), izraisot virpuļplūsmas aksiālā (u_z), azimutālā (u_θ) un radiālā (u_r) ātruma sadalījuma izmaiņas degšanas zonā saskaņā ar impulsa nezūdamības likumu (5. form.) un *Forthofer* un *Goodrick* vienādojumu [84]:

$$\frac{d\vec{\omega}}{dt} = \underbrace{(\vec{\omega} \cdot \vec{\nabla})\vec{u} - \vec{\omega}(\vec{\nabla} \cdot \vec{u})}_{\text{pārļiekšanās un iztīepšanās}} + \underbrace{\frac{1}{\rho^2} \vec{\nabla}\rho \cdot \vec{\nabla}p}_{\text{baroklinitāte}} + \underbrace{\vec{\nabla} \cdot \vec{F}}_{\text{tilpumspēks}} \quad (13)$$

Blīvuma radiālā gradienta izmaiņas, kas veidojas elektriska tilpuma spēka ietekmē $\vec{\nabla} \cdot \vec{F}_\phi$, izraisa plūsmas dinamiskā spiediena $\frac{1}{\rho^2} \vec{\nabla}\rho \cdot \vec{\nabla}p$ izmaiņas. Pamatojoties uz blīvuma gradienta izmaiņām, lauka virzienā tiek ierosināta masas kustība. Ievērojot impulsa nezūdamības likumu, palielinās liesmas virpuļplūsmas pārļiekšanās $(\vec{\omega} \cdot \vec{\nabla})\vec{u}$ un samazinās iztīepšanās efekts $\vec{\omega}(\vec{\nabla} \cdot \vec{u})$. Ievērojot virpuļplūsmas īpašības, notiek elektriskā lauka izraisītā masas pārnese virzienā no centra uz degšanas kameras sienām, paplašinot liesmas reakcijas zonas diametru un samazinot kontrakcijas efektu liesmas centrālajā daļā [85].



11. att. Liesmas virpuļplūsmas garuma samazinājums (A) un degšanas zonas paplašinājums (B) ārējā elektriskā lauka iedarbības rezultātā.

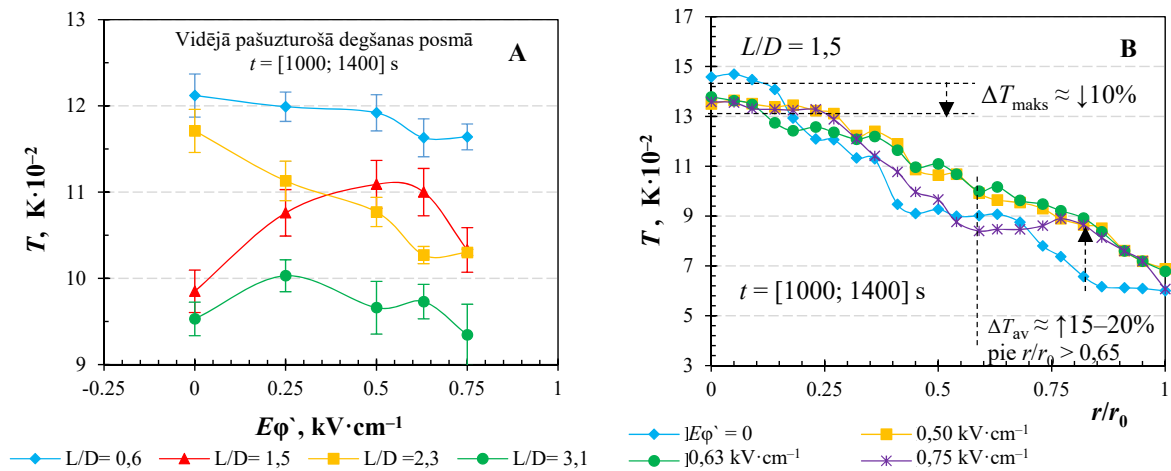
Elektriskā lauka iedarbības rezultātā plūsmas savirpuļojuma palielināšanos pie degšanas kameras sienas izraisa intensīvāku gaistošo vielu sajaukšanos ar gaisa virpuļplūsmu. Uzlabotā gaisa un biomasas termiskās sadalīšanās produktu samaisīšanās veicina degmaistījuma aizdegšanos, palielinot liesmas virpuļplūsmas struktūras viendabīgumu (11. att. B). Aksiālā ātruma komponentes samazinājums gan plūsmas centrā, gan arī degšanas zonas ārējā daļā ierosina liesmas redzamās daļās garuma samazināšanos (11. att. A).

Liesmas fotoattēlos var novērot pakāpenisku liesmas pārliedzēšanu un iztīpēšanu efekta samazināšanos, ko nosaka virpuļplūsmas aksiālā komponentes izmaiņas. Šis efekts prognozēts, ievērojot liesmas virpuļplūsmas radiālā blīvuma gradienta izmaiņas (10. form.).

3.5. Plūsmas temperatūras izmaiņu efekts

Liesmas virpuļplūsmas dinamikas un struktūras izmaiņu pētījumi apliecina augšupvērstās virpuļplūsmas kustības samazināšanos, ko nosaka lejupvērstās virpuļplūsmas kustības daudzuma palielinājums pie kanāla sienām. Reversās plūsmas veidošanās pie kanāla sienām uzlabo degvielas un gaisa sajaukšanos degšanas kameras pamatnē un nodrošina pilnīgāku kurināmā sadedzināšanu, kas savukārt izraisa degšanas zonas temperatūras sadalījuma izmaiņas (12. att.).

Granulētās biomasas degšanas procesa temperatūras kinētikas mērījumi pie liesmas pamatnes ($L/D = 0,6$) apliecina ātrāku holocelulozes sadalīšanās endotermisko procesu, samazinot plūsmas temperatūru pirms 1000 s un nedaudz aizkavējot liesmas attīstīšanos. Šo temperatūras pazeminājumu galvenokārt nosaka temperatūras paaugstināšanās degšanas zonā pie $L/D \approx 1,5$ (12. att. A), kur prevalē eksotermiskie degšanas procesi. Plūsmas aksiālā ātruma samazināšanās dēļ palielinās biomasas termiskās sadalīšanās produktu uzturēšanas ilgums, nobīdot liesmas siltuma gradienta maksimumu tuvāk biomasas granulu virsmai. Elektriskajā laukā novēro arī liesmas reakcijas zonas paplašināšanos, kas nodrošina vienmērīgāku siltuma padevi biomasas slānim un ātrāku pašuzturošā degšanas procesa veidošanos. Intensificējot endotermiskos biomasas termiskās sadalīšanās procesus, liesmas virpuļplūsmas pamatnē ($L/D = 0,6$) ir vērojama degšanas zonas vidējās temperatūras samazināšanās (12. att. A).



12. att. Elektriskā lauka ietekme uz liesmas temperatūras kinētiku degšanas kameras centrā (A) un liesmas temperatūras radiālā sadalījuma vidējo vērtību (B).

Lai arī elektriskā lauka iedarbības rezultātā liesmas virpuļplūsmas degšanas zonas centrālajā daļā ($L/D = 1,5$) novēro vidējās temperatūras pieaugumu, tālāk liesmas garumā ($L/D > 2,3$) ir vērojama vidējās temperatūras samazināšanās (12. att. A), ko nosaka reakcijas zonas paplašināšanās un liesmas garuma samazināšanās. Liesmas virpuļplūsmas reakcijas zonas paplašināšanos apliecina arī temperatūras radiālā sadalījuma izmaiņas pie $L/D = 1,5$, izraisot temperatūras maksimālo vērtību samazināšanos liesmas centrālajā daļā – pie $r/r_0 = [0; 0,2]$ vidēji par $\approx 10\%$, pie $r/r_0 > 0,65$ izraisot temperatūras pieaugumu par 15–20% (12. att. B).

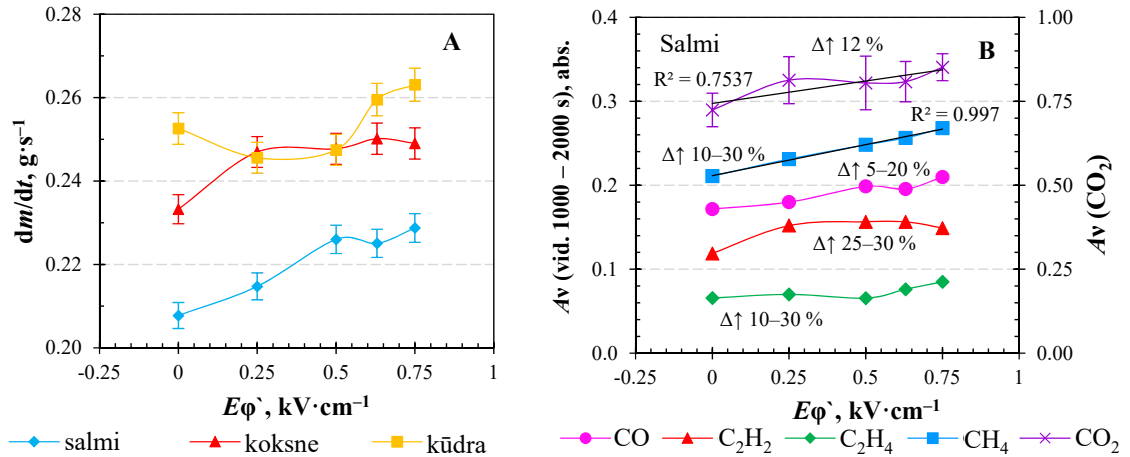
3.6. Biomasas termiskās sadalīšanas intensifikācijas efekts

Apkopojot plūsmas ātruma sadalījuma un temperatūras izmaiņas pētījuma rezultātus, ir konstatēts, ka, ņemot vērā virpuļplūsmas struktūru un elektroda konfigurāciju, elektriskajā laukā ierosinātie siltuma un masas pārneses procesi izraisa lokālas plūsmas dinamikas un liesmas temperatūras izmaiņas ar sekojošo biomasas termiskās sadalīšanās procesu intensifikāciju.

Izmantojot apvienoto biomasas granulu slāņa augstuma mērījumus un termiskās sadalīšanas produktu IS spektrālo analīzi, eksperimentāli konstatēta termiskās sadalīšanās (13. att. A) un gaistošo vielu veidošanās procesu intensifikācija (13. att. B). Veicot biomasas masas zudumu izmaiņu vidējo vērtību aprēķinus, konstatēts, ka vislielākais kviešu salmu granulu masas zudumu pieaugums (par $\approx 10\%$) ir vērojams pie $E\phi' = 0,75 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$. Savukārt koksnes biomasas termiskās sadalīšanās ātruma pieaugums, palielinot pozitīvi lādētā elektroda spriegumu, ir samērā neliels ($\approx 5\%$) jau pēc $E\phi' = 0,25 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$. Kūdras granulu sadalīšanās ātruma pieaugums nav vienmērīgs, tomēr pie $E\phi' = 0,75 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ var sasniegt $\approx 5\%$.

Salīdzinot dažādas izcelsmes biomasu termiskās sadalīšanas produktu IS absorbcijas vidējo vērtību izmaiņas atkarībā no ārējā elektriskā lauka intensitātes, novēro gaistošo vielu koncentrācijas pieaugumu salmu un koksnes biomasas degšanas kameras pamatnē (13. att. B).

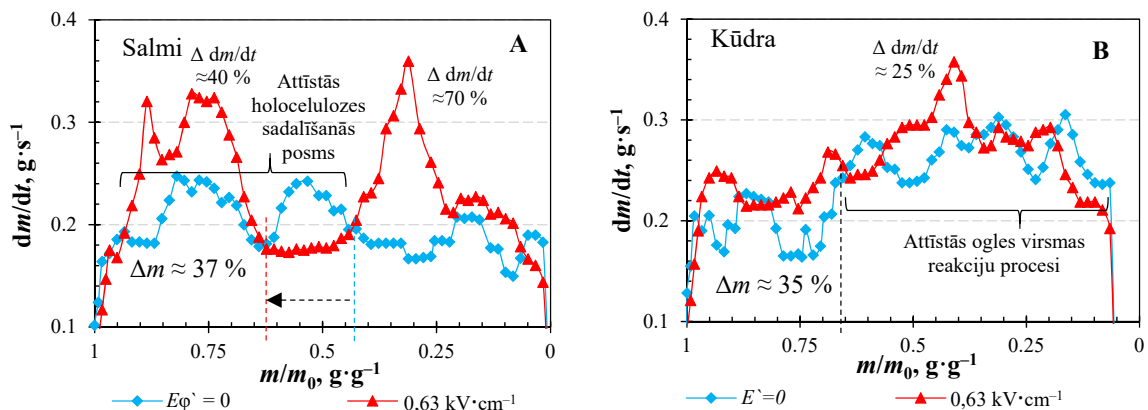
Salmu biomasas gaistošo vielu vidējās koncentrācijas, palielinot elektriskā lauka intensitāti, vienmērīgi pieaug no $\approx 10\%$ līdz 30% . Īpaši intensīvs pieaugums ir novērojams C_2H_2 un CH_4 .



13. att. Elektriskā lauka efekts uz granulu masas zudumu vidējo vērtību (A) un biomasas termiskās sadalīšanās produktu vidējo daudzumu degšanas kameras pamatnē (B).

Savukārt kūdras granulu degšanas procesā degšanas kameras pamatnē ar pielikto elektrisko lauku novēro termiskās sadalīšanas produktu koncentrācijas vidējo vērtību samazināšanos. Kūdras biomasas degšanas kinētika raksturojas ar īsākas liesmas veidošanos (skat. promocijas darba 3.2. nod.), tāpēc elektriskajā laukā izraisītie efekti efektīvi uzlabo gaisa samaisīšanos ar termiskās sadalīšanās produktiem. Tas ir novērojams degšanas kameras pamatnē, ņemot vērā gan gaistošo savienojumu (CO , C_2H_2 , CH_4 , C_2H_4) koncentrāciju un gaisa pārpalikuma pakāpenisko samazināšanos, gan CO_2 koncentrācijas palielināšanos.

Konstatēts, ka mainās arī granulu masas zudumu kinētiskas līknes elektriskajā laukā (14. att.). Šīs izmaiņas dažādām biomasām ir atšķirīgas, un to nosaka komponentu struktūras, elementārā un ķīmiskā sastāva atšķirības.



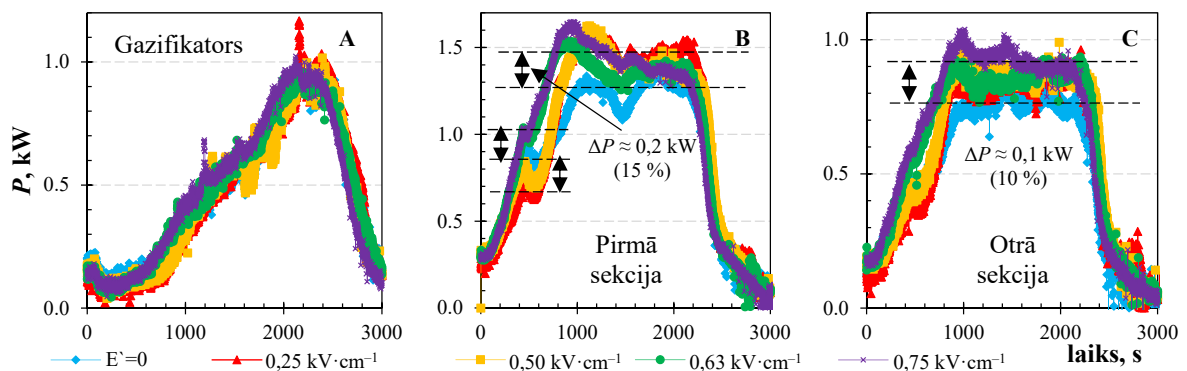
14. att. Salmu biomasas (A) un kūdras (B) granulu masas zudumu izmaiņas termiskās sadalīšanās procesā elektriskajā laukā.

Elektriskā lauka iedarbības rezultātā biomasas termiskās sadalīšanas procesā galvenokārt tiek intensificēta holocelulozes termiskā sadalīšanās, izraisot biomasas granulu slāņa strauju kritumu vidēji par 35–40 %. Dažādas izcelsmes granulu masas izmaiņas holocelulozes termiskās sadalīšanās procesā ir saistītas ar sevišķu gaistošo vielu saturu un hemicelulozes atšķirīgo ķīmisko sastāvu.

Koksnes biomasas hemicelulozes termiskā sadalīšanās notiek visstraujāk, tāpēc elektriskajā laukā, posmā pirms 1000 s ($m/m_0 \approx 0,60$), tās sadalīšanās uzlabojās par 20 %. Visintensīvākās masas izmaiņas (40 %) posmā līdz 1200 s (14. att. A) elektriskā lauka iedarbības rezultātā ir novērotas salmiem, kad tiek intensificēta *Glu-Uro-Ara-Xyl* termiskā sadalīšanās, izraisot holocelulozes termiskās sadalīšanās paātrināšanos par 20 %. Kūdras biomasu granulām pazeminātā gaistošo vielu satura dēļ (2. tab.) degšanas posmā līdz ≈ 1500 s (14. att. B) ogļhidrātu termiskās sadalīšanās intensifikācija ir mazāk izteikta (par 10 %).

3.7. Uzlabotās siltuma pārnese efekts

Virpuļplūsmas struktūras izmaiņas ārējā elektriskā lauka iedarbības rezultātā veicina degšanas zonas radiālu izplešanos, palielinot temperatūras vidējās vērtības, bet samazinot tās maksimālās vērtības. Degšanas zonas radiālā izplešanās palielina liesmas temperatūru degšanas zonas ārējā daļā ar korelējošu saražotā siltuma pārnese intensifikāciju uz sildvirsmām. Savukārt liesmas garuma samazināšanās uzlabo siltuma apmaiņu starp liesmas virpuļplūsmas centrālo daļu un biomasas granulu slāni, aktivizējot biomasas termisko sadalīšanos. Elektriskā lauka un liesmas mijiedarbības efekti intensificē degošo komponentu izdalīšanos, palielina šo komponentu uzturēšanās ilgumu reakcijas zonā (10. att. A), aizdegšanos un siltuma izdalīšanos degšanas kamerā, palielinot siltuma pārnese uz degšanas kameras sienām.



15. att. Dažādu eksperimentālās iekārtas sekciju siltuma jaudas kinētikas izmaiņas salmu granulu degšanas procesā atkarībā no pieliktā elektriskā lauka intensitātes.

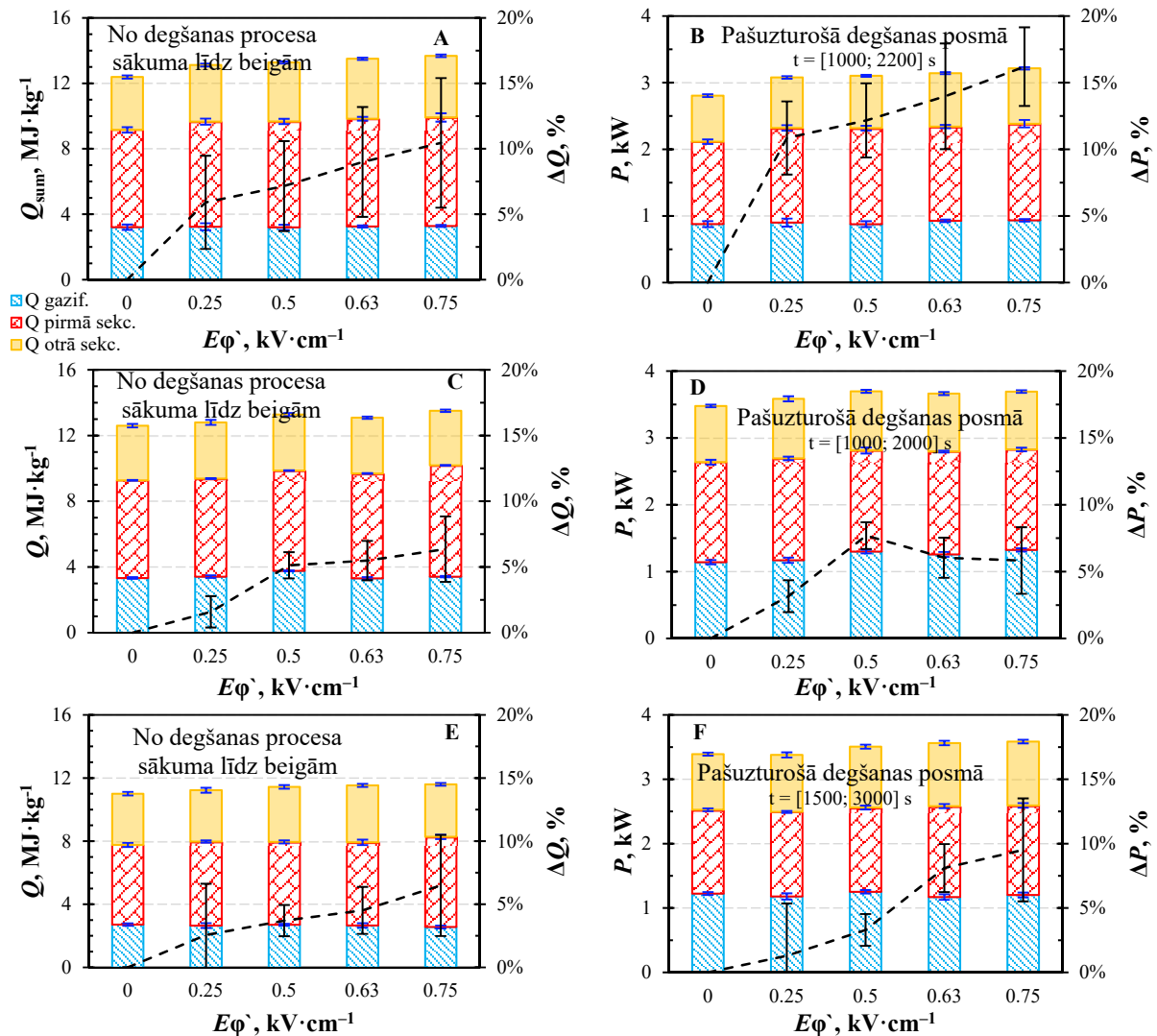
Elektriskajā laukā līdz $0,5 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ salmu un koksnes biomasas degšanas procesā līdz 1000 s (kūdrai – līdz 1500 s) ir novērojama holocelulozes termiskās sadalīšanās intensifikācija, kas saistīta ar endotermisko efektu palielināšanos degšanas procesa sākuma stadijā (15. att. B). Palielinot elektriskā lauka intensitāti, pārsvaru gūst termiskās sadalīšanās produktu uzliesmošanas

eksotermiskais efekts, izmainot siltuma jaudas kinētiku. Pie $E\varphi' \geq 0,63 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ laika posmā līdz 1000 s ir novērojams ātrāks siltuma jaudas pieaugums (vidēji par 20 %). Pašuzturošā degšanas posmā (no 1000 s līdz ≈ 2200 s) elektriskais lauks ietekmē siltuma pārnesei degšanas kameras pirmajā un otrajā sekcijā, palielinot to siltuma jaudu par 10–15 % (15. att. B, C).

Lielāks siltuma jaudas pieaugums (0,2 kW pret 0,1 kW) ir pirmajā sekcijā, kurā maksimālo vērtību sasniedz jonu strāva un ir novērojama liesmas virpuļplūsmas radiālā paplašināšanās (11. att. B). Savukārt gazifikatorā elektriskā lauka iedarbības rezultātā radītās siltuma jaudas izmaiņas ir minimālās (15. att. A), jo gazifikatorā siltuma pārnese nosaka konduktīvā un starojuma siltuma pārnese no pārogleto biomasas slāņa. Šāda veida process dominē salmu granulu degšanā pēc 1800 s, kad eksperimentālajā iekārtā novēro pāreju no liesmas degšanas uz ogles virsmas gruzdēšanas procesiem (8. att. A).

“Jonu vēja” ierosinātā siltuma un masas pārnese elektriskā spēka darbības virzienā uzlabo konvektīvo siltuma pārnesei, palielinot iekārtas siltuma jaudu biomasas granulu pašuzturošā degšanas posmā un kopējo saražotā siltuma daudzumu degšanas kameras sekcijās. Salmu biomasas degšanas procesā elektriskā lauka iedarbības rezultātā tika novērots kopējā saražotā siltuma daudzuma pieaugums no 6 % līdz 10 % ar vidējo rezultātu novirzi līdz ± 4 % (16. att. A). Turklāt eksperimentālās iekārtas siltuma jaudas pieaugums salmu biomasas degšanā sasniedza 11–16 % ar novirzi ± 4 % (16. att. B). Pie $E\varphi' > 0,5 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ kopējais saražotais siltuma daudzums koksnes biomasas degšanā pieaug par 5–6 % ar vidējo rezultātu novirzi līdz ± 2 % (16. att. C). Turklāt iekārtas vidējais siltuma jaudas pieaugums pašuzturošā procesā ir 6–8 % ar vidējo novirzi ± 2 % (16. att. D). Ievērojot koksnes biomasas degšanas liesmas garumu, eksperimenta laikā siltuma atdeve kurtuves sienām nebija efektīva. Biomasas termiskās sadalīšanas intensifikācijas dēļ elektriskajā laukā veidojas vairāk gaistošo savienojumu, īpaši CO, kas nepaspēj pilnībā izreagēt liesmas garumā un saražot siltumu. Koksnes granulu degšanas procesam ir jāizmanto garāks elektrods, kam ir palielināts siltumapmaiņas laukums.

Fotoattēlos liesmas garuma izmaiņas kūdras granulu termoķīmisko pārvērtību procesā, elektriskajā laukā praktiski nav novērojamas, jo kūdras liesmas garums jau pie $E\varphi' = 0$ ir neliels. Tāpēc kūdras granulu degšanā iekārtas siltuma jaudas izmaiņas var novērot tikai degšanas kameras pirmajā sekcijā. Kūdras degšanas pētījumā elektriskajā laukā ir konstatēts kopējā siltuma palielinājums par 3–6 % ar vidējo vērtību novirzi ± 3 % (16. att. E). Tomēr iekārtas vidējās siltuma jaudas palielinājums ir konstatēts tikai pie $E\varphi' > 0,5 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$, sasniedzot 8–10 % ar ± 3 % novirzi (16. att. F). Ievērojot siltuma parametru vērtību novirzes, var secināt, ka elektriskā lauka efekts uz iekārtas siltuma jaudu ir stabils tikai augstākā elektriskā lauka intensitātē.

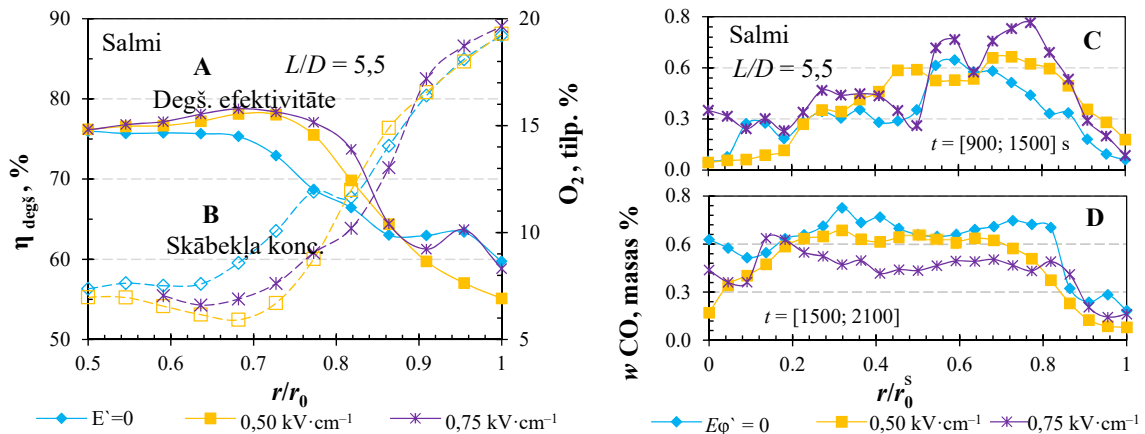


16. att. Kopējā saražotā siltuma daudzuma un iekārtas vidējās jaudas izmaiņas elektriskajā laukā salmu (A, B), koksnes (C, D) biomasas un kūdras (E, F) degšanas procesā.

3.8. Dūmgāzu kaitīgo emisiju samazināšanas efekts

Liesmas virpuļplūsmas reakcijas zonas paplašināšanos elektriskā lauka ietekmē izraisa ne tikai temperatūras profila, bet arī skābekļa koncentrācijas un degšanas procesu efektivitātes radiālā sadalījuma izmaiņas pie $r/r_0 = [0,6; 0,85]$ ar sekojošu degšanas procesu efektivitātes pieaugumu un skābekļa koncentrācijas samazināšanos plūsmā vidēji par 4–10 % (17. att. A).

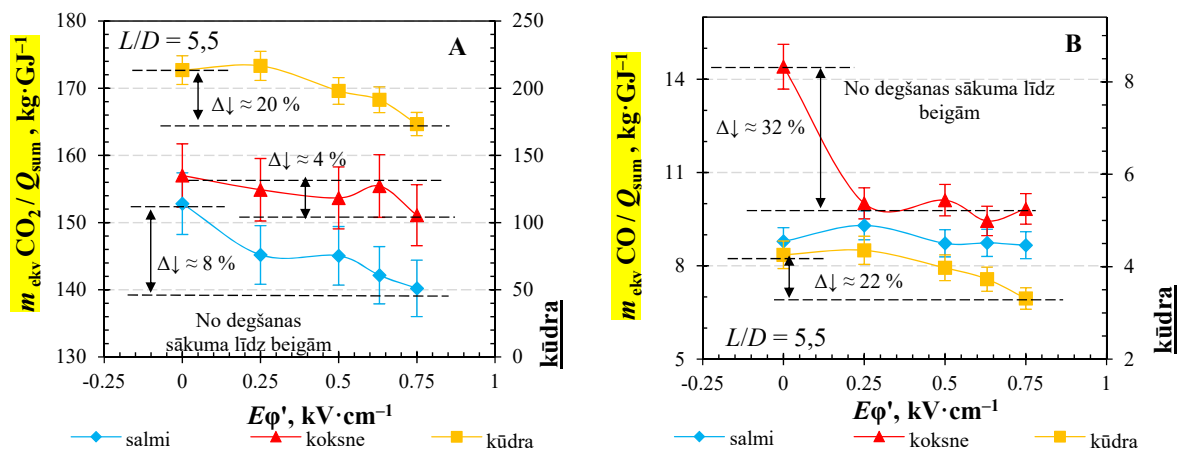
Tomēr holocelulozes termiskās sadalīšanās intensifikācijas dēļ (14. att.) degšanas posmā no 900 s līdz 1500 s plūsmas perifērijā pie $r/r_0 = [0,5; 0,8]$ ir konstatēts neliels CO koncentrācijas pieaugums (17. att. C). Tomēr posmā pēc 1500 s, kad ir novērojama degšanas kinētikas pāreja uz virsmas reakciju dominējošiem procesiem, CO koncentrācijas radiāla sadalījuma izmaiņas (17. att. D) ļauj secināt par uzlabotiem degšanas apstākļiem, jo, pieaugot $E\phi$, novēro CO koncentrācijas samazināšanos par 20–45 %.



17. att. Degšanas procesa efektivitātes (A), skābekļa (B) un oglekļa monoksīda (C, D) koncentrācijas radiālā sadalījuma izmaiņas degšanas kamerā elektriskajā laukā.

Elektriskā lauka izraisīto virpuļplūsmas struktūras izmaiņu, kā arī siltuma ražošanas un siltuma apmaiņas procesu izmaiņu rezultātā novēro relatīvo CO₂ emisiju daudzuma (14. form.) samazināšanos (18. att. A), kas viennozīmīgi saistītas ar biomasas termiskās sadalīšanās produktu (t. s. CO) uzlaboto termokīmisko konversiju elektriskajā laukā (18. att. B). Pēc koksnes relatīvo emisiju sastāva izmaiņām ir redzams, ka CO₂ emisiju daudzuma vērtību kritums ir mazāks (uz 4 %) par attiecīgo CO vērtību kritumu (uz 32 %).

$$m_{CO_2, ekv} / Q_{\text{summārais}} = \frac{\sum_{\text{end}}^0 m_{CO_2, TESTO} / m_{\text{granulu porcija}}}{\sum_{\text{beigas}}^0 P_{\text{eksp. iekārtas}}} \quad (14)$$



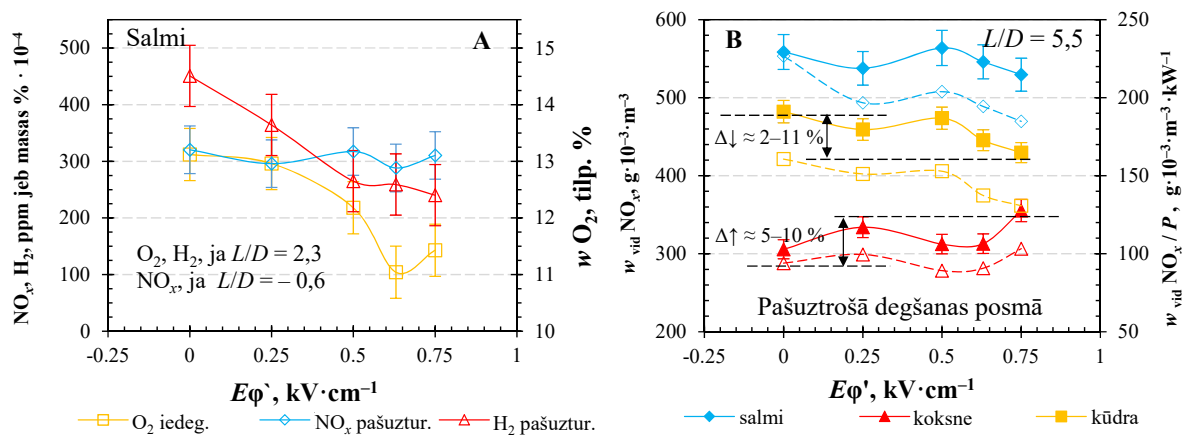
18. att. Degšanas procesā veidoto CO₂ (A) un CO (B) emisiju relatīvā daudzuma izmaiņas.

Relatīvā CO emisiju (par 22 %) un CO₂ emisiju (≈ 20 %) daudzuma samazināšanās efekts elektriskajā laukā novērojams arī kūdras degšanas procesā, ko nosaka uzlabotais gruzdēšanas process. Kūdras degšanas procesos CO emisiju samazinājums gruzdēšanas posmā ir īpaši svarīgs, jo pārņērtās kūdras gruzdēšanas posms var sasniegt līdz pat 30 % no kopējā degšanas procesa

ilguma. Savukārt salmu granulu degšanas procesā ar elektrisko lauku CO emisiju relatīvā daudzuma izmaiņas nav nozīmīgas, ko izraisa cietās pelnu kārtas veidošanās uz biomasas virsmas, ierobežojot gaisa piekļuvi virsmas reakciju zonai. Tomēr, pateicoties intensificētam salmu granulu termiskās sadalīšanās un gaistošo vielu degšanas procesam, kā arī uzlabotiem siltuma ražošanas un apmaiņas procesiem, CO₂ relatīvo emisiju daudzums samazinās par 8 %.

Izteiktas NO_x koncentrācijas izmaiņas, kas saistītas ar biomasas slāpekļa saturošo vielu izdalīšanās un oksidēšanās intensifikāciju gazifikatora izejā, nav novērotas (19. att. A). Salmu un kūdras degšanas produktu sastāva mērījumos pie $L/D = 5,5$ konstatēts, ka kopējais NO_x saturs izplūdes gāzēs samazinās elektriskā lauka iedarbības rezultātā: salmiem par 4–5 %, kūdrai par 2–11 % (19. att. B), ko nosaka degšanas zonas temperatūras maksimālo vērtību samazināšanās liesmas centrā (12. att. B). NO_x koncentrācijas izmaiņas, ņemot vērā iekārtas siltuma jaudas pieaugumu, uzrāda izteiktu kopējā procesa uzlabošanos elektriskā lauka un liesmas mijiedarbības rezultātā, sasniedzot NO_x emisiju samazinājumu pret jaudas vienību līdz 18 %.

Izmaiņas, ko nosaka biomasas termiskās sadalīšanās procesa intensifikācija un ķīmiski saistītā slāpekļa saturošo savienojumu izdalīšanās un oksidēšanās, ir konstatētas arī koksnes biomasas degšanās elektriskajā laukā. Koksnes degšanas procesā relatīvi karstākas un garākas liesmas veidošanās atbilstoši Zeldoviča termiskajam NO_x veidošanās mehānismam nosaka 10 % NO_x koncentrācijas pieaugumu dūmgāzēs (19. att. B).



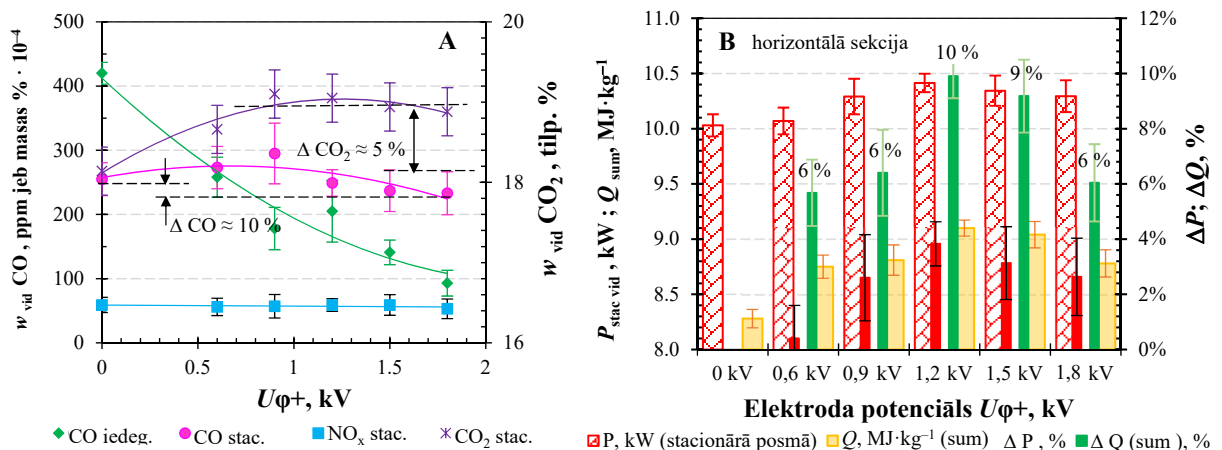
19. att. NO_x vidējās koncentrācijas izmaiņas dūmgāzēs dažādas izcelsmes granulu degšanā.

Holocelulozes termiskās sadalīšanās procesa intensifikācija kopā ar uzlaboto gaistošo vielu veidošanos nosaka gaisa skābekļa koncentrācijas samazināšanos biomasas degšanas procesa veidošanās posmā (19. att. A). Savukārt liesmas virpuļplūsmas vidējās temperatūras pieaugumu reakcijas zonā pie $L/D = 1,5$ (12. att. A) nosaka gaistošo savienojumu uzliesmošanas intensifikācija, secinot pēc H₂ koncentrācijas samazināšanās liesmas kodolā pašuzturošā degšanas posmā. Udeņraža degšanas procesā veidotie OH radikāļi paātrina CO oksidēšanas reakciju kinētiku un sekmē CO₂ veidošanos reakcijas zonā.

4. JAUNĀS TEHNOLOĢIJAS PROTOTIPA APROBĀCIJA UN NOVĒRTĒJUMS AR RŪPNIECISKO GRANULU DEGLI

Promocijas darbā granulētās biomasas degšanas procesu elektrodinamiskās kontroles tehnoloģijas pārnēsē no 4 kW jaudas eksperimentālās iekārtas uz rūpnieciskā prototipa 20 kW iekārtu tika veikti pieci granulētās koksnes biomasas degšanas eksperimenti pie katra elektroda potenciāla $U_{\varphi+} = [0; 1,8]$ kV. Tehnoloģijas prototipa aprobācijas rezultāti atbilst rezultātiem, kas iegūti, veicot pētījumus ar mazas jaudas eksperimentālo iekārtu. Elektriskā lauka iedarbības rezultātā laika posmā no 200 s līdz 500 s paātrinās biomasas gaistošo vielu uzliesmošana, palielinot vidējo temperatūru liesmas reakcijas zonā par 10–20 % un degšanas produktu plūsmā par ≈ 10 %. Degšanas zonas vidējās temperatūras paaugstināšanās, ko nosaka reakcijas zonas radiālā izplešanās liesmas un elektriskā lauka mijiedarbības procesā, ir novērojama arī stacionārā degšanas režīmā, tomēr vidējās temperatūras pieaugums visiem eksperimentiem nepārsniedz 4 %.

Gaistošo savienojumu uzlabotā aizdegšanās, kā arī vispārējās degšanas procesa efektivitātes palielināšanās tehnoloģiskā prototipa iekārtā ir konstatēta arī CO_2 vidējās koncentrācijas pieauguma dūmgāzēs – no 3 % līdz 5 % (20. att. A). Kaitīgo CO emisiju daudzums (≈ 420 ppm), mainot elektroda potenciālu, biomasas granulū degšanas sākuma posmā samazinās robežās no 38 % līdz 77 %. Tomēr stacionārajā degšanas posmā CO emisiju (≈ 250 ppm) koncentrācijas izmaiņas ir mazāk izteiktas (10 % no sākuma vērtības pie $U_{\varphi+} = 0$). Savukārt NO_x emisiju daudzums (≈ 50 – 60 ppm) praktiski nemainās gan biomasas degšanas procesa sākuma stadijā, gan stacionārā degšanas posmā. Iegūtie rezultāti ļauj secināt, ka piesārņojošo emisiju pieaugums dūmgāzēs galvenokārt ir saistīts ar biomasas termiskās sadalīšanās procesa intensifikāciju elektriskajā laukā, nevis ar liesmas temperatūras paaugstināšanos, jo liesmas temperatūras pieaugums ir pārāk mazs, lai izraisītu termiski jutīgā NO_x koncentrācijas pieaugumu.



20. att. Elektriskā lauka efekts uz tehnoloģiskā prototipa iekārtas CO_2 , CO, NO_x emisiju daudzuma (A) un kurtuves siltuma parametru (B) izmaiņām, izmantojot koksnes granulās.

Pēc dūmgāzu vidējās temperatūras aptuveni 600–630 K ir konstatēts, ka tehnoloģiskā prototipa iekārtā siltums no dūmgāzēm nav pilnībā izmantots. Vislielākais elektriskā lauka efekts uz

degšanas un siltuma pārneses procesiem ir konstatēts tehnoloģiskās iekārtas horizontālajā sekcijā jeb degšanas kamerā. Stacionārā degšanas procesa jaudas izmaiņas nepārsniedz 3–4 %, tomēr eksperimentos ar 4 kW iekārtu vidējais siltuma jaudas pieaugums pašuzturošā degšanas procesā ir augstāks, sasniedzot 6–8 % ar vidējo novirzi ± 2 %.

Jāatzīmē arī tas, ka komerciālā granulu degļa gaisa un kurināmā padeves režīma koriģēšana tehnoloģiskā iekārtā nav iespējama, jo deglis ir pilnībā automatizēts. Šie parametri ir ieprogrammēti un pielāgoti A kvalitātes koksnes granulu degšanas režīmam. Cita veida biomasas granulu izmantošanu ierobežo ražotāja garantijas līgums. Minēto iemeslu dēļ tehnoloģijas aprobācija uz 20 kW degļa, izmantojot par kurināmo salmu biomasas un kūdras granulas, netika veikta.

4.1. Tehnoloģijas ieviešanas inženierekonomiskais aprēķins

EFDFD tehnoloģijas ieviešanas izdevumi ir saistīti ar katla degšanas kameras pārbūvi. Projektējot katlu ar noteikto jaudu, ir iespējams paredzēt optimālā augstsprieguma barošanas bloka izvēli, jo tehnoloģijas ieviešanas izdevumi reducējas uz elektriskās daļas instalāciju un izmaksām par elektroenerģijas patēriņu augstsprieguma līdzstrāvas bloka barošanai.

Lai noteiktu vidējās cenas par augstsprieguma līdzstrāvas barošanas bloku, elektroda izgatavošanu, elektroda izolāciju un uzstādīšanas/montāžas darbiem, tika veikta tirgus izpēte. Jāatzīmē, ka rūpnieciskajā iekārtā nav nepieciešams bloks ar augstu regulēšanas precizitāti, turklāt bloku ir iespējams apvienot ar degļa automātiku un regulēt izejas spriegumu pēc katla darba jaudas. Barošanas bloku lietderības koeficients parasti nepārsniedz 60 %, tāpēc, izvēloties optimālo barošanas bloku, ir jāizpēta strāvas piesātinājums un strāvas īsslēguma robeža. Augstsprieguma barošanas bloka cena mainās atbilstoši jaudas parametriem: no 2680 EUR līdz 3980 EUR [86]. Kopējie izdevumi tehnoloģijas ieviešanai mainās no 4147 EUR līdz 6033 EUR. Darbā tika izmantots bloks, kura maksimālais nodrošinātais spriegums ir 3 kV un sprieguma noslodzes maksimālā strāva ir 10 mA. Līdzīgs risinājums tirgū ir *APS-1915 (T&M Atlantic Inc, ASV)*, tā cena ir 260–500 EUR robežās. Kopējie izdevumi ir aptuveni 884–1380 EUR.

Ievērojot izmantotā bloka lietderības koeficientu pie dažādiem elektroda potenciāliem un atbilstošiem strāvas eksperimentālajiem lielumiem, tika aprēķināts tehnoloģijas elektroenerģijas patēriņš (15. un 16. form.). Ar 17. formulu aprēķināts relatīvais elektroenerģijas patēriņš pret horizontālās sekcijās siltuma jaudas pieaugumu. Vislietderīgākā ($\eta_{\text{vid}} \approx 96$ %) tehnoloģijas izmantošana notiek $U_{\phi+} = [0,9; 1,5]$ kV elektroda potenciāla robežās, jo relatīvais elektroenerģijas patēriņš ir tikai aptuveni 2–6 % no saražotā siltuma pieauguma (ΔQ_{silt}).

$$P_{\text{el}} = \frac{U_{\phi+} \cdot I}{\eta_{\text{baroš.}}} = [\eta_{\text{baroš.}} = 60\%] = \frac{1,8 \cdot 10^3 \cdot 7,25 \cdot 10^{-3}}{0,6} = 26,1 \text{ [W]} \quad (15)$$

$$W_{\text{el}} = P_{\text{el}} \cdot t_{\text{eksperimenta}} = 26,1 \cdot 10^{-3} \cdot 1,07 = 0,028 \text{ [kWh]} \quad (16)$$

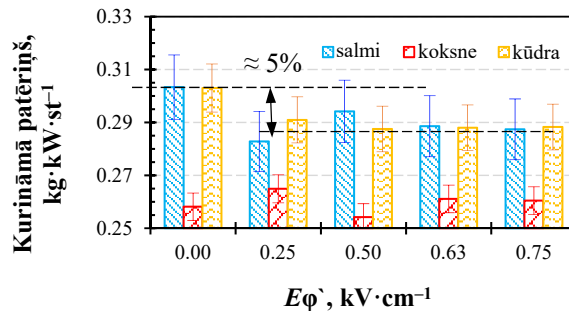
$$\Delta W_{\%} = \frac{W_{\text{el}}}{\Delta P_{\text{thermal}} \cdot t} = \frac{0,028}{0,26} \approx 11 \text{ [%]} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \text{Ekonomija} &= V_{\text{kurin}} [\text{kg} \cdot \text{st}^{-1}] \cdot \text{cena}_{\text{vid.}} [\text{EUR} \cdot \text{kg}^{-1}] \cdot \frac{dV}{dQ} = 4,13 \cdot 0,182 \cdot 5\% \\ &= 0,0376 [\text{EUR} \cdot \text{st}^{-1}] \end{aligned} \quad (18)$$

$$\text{Atmaksāšanas periods} = \frac{\text{Kapitālizmaksas}}{\text{Ekonomija} \cdot \text{stundu gadā}} = \frac{[884 \rightarrow 1380]}{0,0376 \cdot 8760} = 2,7 \rightarrow 4,2 [\text{gadi}] \quad (19)$$

Ievērojot konstatēto kurināmā dV/dQ ekonomiju 5 % (21. att.), vidējo kokskaidu granulu cenu tirgū (2020. gadā – 0,182 EUR·kg⁻¹) un datus par tehnoloģijas izmaksām, tika veikts atmaksāšanas perioda aprēķins (18. un 19. form.).

Pēc aprēķina rezultātiem ir noteikts, ka tehnoloģijas pašatmaksāšanas periods 20 kW jaudas katla iekārtā ir no 2,7 līdz 4,2 gadiem. Pieņemot, ka kurināmā ekonomija saglabājas, lineāri ekstrapolējot degļa jaudu līdz 300 kW, var secināt, ka tehnoloģijas atmaksāšanas periods samazinās aptuveni līdz vienam gadam.



21. att. Relatīvā kurināmā patēriņa izmaiņas, izmantojot ārējā elektriskā lauka efektu.

Mērogojot elektrodinamiskās kontroles tehnoloģijas izmantošanas pozitīvo efektu, lielākas jaudas katlu iekārtās ir sagaidāmi paaugstināti izdevumi, kas saistīti ar barošanas bloka izvēli. Pēc Purmalis u. c. datiem [87], veicot elektrodinamiskās kontroles tehnoloģijas lineāro mērogošanu 3–4 MW katlu iekārtās, kurināmā ekonomijas efekts sasniedz 5 %, patērējot tikai 0,14 kWh un nodrošinot elektriskā lauka intensitāti $\approx 0,9 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$. Tāpēc tiek pieņemts, ka aprēķins attēlo atmaksāšanas periodu pēc negatīvās prognozes. Tomēr, izvēloties optimālo barošanas bloku konkrētā degļa jaudai, var panākt izdevumu samazināšanos, kas apstiprina iepriekšējo tēzi par to, ka elektrodinamiskās kontroles tehnoloģija ir jāparedz katlu projektēšanas stadijā un jāoptimizē tās izmantošana, lai panāktu zemāku tehnoloģijas pašizmaksu.

SECINĀJUMI

1. Dažādas izcelsmes granulēto biomasu (salmu, kūdras, koksnes) elementārā un ķīmiskā sastāva daudzveidība nosaka būtiskas atšķirības gazifikācijas un degšanas procesos.
2. Granulētās biomasas degšanas liesmas virpuļplūsmas eksperimentālajā izpētē (bez pieliktā elektriskā lauka) konstatēts, ka maksimālā vidējā degšanas temperatūra, augstākā iekārtas jauda un mazākais emisiju daudzums, veidojas, ja sekundārais gaisa ieplūdes leņķis (α_{ieejas}) ir 40° un virpuļskaitlis $S \approx 0,6-0,9$.
3. Dažādas izcelsmes biomasu degšanā jonu strāva sasniedz maksimālo vērtību (līdz 6 mA) attālumā no 0 mm līdz 50 mm no biomasas granulu slāņa virsmas. Lai efektīvi kontrolētu virpuļplūsmas struktūru, optimālajam elektroda garumam ir jābūt vismaz 63 mm.
4. Zemas intensitātes līdzstrāvas elektriskajā laukā (līdz $1 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$) ar “jonu vēja” ($\approx 0,18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) spēka iedarbību notiek lejupvērstās virpuļplūsmas intensifikācija un virpuļskaitļa pieaugums līdz 1,1–1,3. Elektriskā lauka iedarbībā par 15–20 % paplašinās biomasas termiskās sadalīšanās produktu degšanas zona, un līdz 50 % samazinās liesmas garums, izraisot temperatūras maksimālās vērtības samazināšanos par aptuveni 10 % liesmas centrālajā daļā un temperatūras paaugstināšanos par aptuveni 15–20 % liesmas perifērijā. Virpuļplūsmas dinamikas izmaiņu rezultātā samazinās aksiālais ātrums degšanas zonā (līdz $0,3-0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), palielinot degmaisījuma uzturēšanās ilgumu un uzlabojot gaistošo vielu sadegšanu ar sekojošu gaisa pārākuma koeficienta samazināšanos dažādām biomasām par aptuveni 15–30 %.
5. Pie $E\varphi = 0,75 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ ir konstatēts kviešu salmu granulu sadalīšanās ātruma pieaugums par aptuveni 10 %. Savukārt koksnes biomasas un kūdras termiskās sadalīšanās ātruma maksimālais pieaugums elektriskajā laukā sasniedz aptuveni 5 %.
6. CO_2 pieaugums liesmas reakcijas zonā līdz aptuveni 36–37 %, kā arī degšanas procesa efektivitātes pieaugums par 4–10 % pie degšanas kameras sienām netieši liecina par konvektīvās siltuma pārnese intensifikāciju virzienā uz sildvirsmām, palielinot degšanas procesa vidējo saražoto siltuma daudzumu par $6-10 \pm 4 \%$ – salmu biomasai, par $5-6 \pm 2 \%$ – koksnes biomasai un par $3-6 \pm 3 \%$ kūdrai. Konsekventi ir konstatēts arī relatīvā kurināmā patēriņa samazinājums vidēji par 5 %, izmantojot ārējā elektriskā lauka efektu.
7. Elektriskā lauka izraisītās virpuļplūsmas izmaiņas veicina CO_2 , CO un NO_x emisiju relatīvo daudzumu samazināšanos (īpaši gruzdēšanas posmā) dažāda veida biomasas granulu degšanas procesā par aptuveni 4–20 %, 20–30 % un 5–10 % atbilstoši.
8. Elektrodinamiskās vadības tehnoloģijas aprobācija ar rūpniecisko granulu degli (20 kW) apstiprināja elektriskā lauka pozitīvo efektu, paaugstinot vidējo degšanas temperatūru reakcijas zonā par aptuveni 3–5 %, uzlabojot biomasas termiskās sadalīšanas produktu (CO) sadegšanu par aptuveni 10 % ar sekojošu tehnoloģiskā prototipa iekārtas vidējais siltuma jaudas pieaugumu $\approx 3-4 \%$, kā arī kopējā saražotā siltuma vidējo pieaugumu par 6–8 % ar vidējo novirzi $\pm 2 \%$.
9. Atbilstoši elektroenerģijas patēriņa aprēķiniem tehnoloģijas priekšizpētē pie +1,8 kV elektroda potenciāla un maksimālā $7,25 \pm 0,45 \text{ mA}$ strāvas stipruma maksimālais barošanas bloka

elektroenerģijas patēriņš sasniedz 0,028 kWh. Lauka nodrošināšanai patērētā elektriskā jauda ir aptuveni 2,5 % no prototipa iekārtas siltuma jaudas, savukārt relatīvais elektroenerģijas patēriņš ir tikai aptuveni 2–6 % no saražotā siltuma pieauguma.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA

- [1] European Commission, “2030 climate & energy framework.” [Online]. Available: ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en. [Accessed: 26-Oct-2020].
- [2] AEBIOM, “Bioenergy Europe Statistical Report 2018,” Brussels, 2018.
- [3] FAOSTAT, “Crops,” 2017. [Online]. Available: www.fao.org/faostat/en/#data/QC/. [Accessed: 01-Nov-2019].
- [4] S. V. Vassilev, D. Baxter, and C. G. Vassileva, “An overview of the behaviour of biomass during combustion: Part I. Phase-mineral transformations of organic and inorganic matter,” *Fuel*, vol. 112, no. May, pp. 391–449, 2013.
- [5] T. G. Bridgeman, J. M. Jones, I. Shield, and P. T. Williams, “Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties,” *Fuel*, vol. 87, no. 6, pp. 844–856, May 2008.
- [6] N. Gao, A. Li, C. Quan, L. Du, and Y. Duan, “TG–FTIR and Py–GC/MS analysis on pyrolysis and combustion of pine sawdust,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 100, pp. 26–32, Mar. 2013.
- [7] C. Ryu, Y. B. Yang, A. Khor, N. E. Yates, V. N. Sharifi, and J. Swithenbank, “Effect of fuel properties on biomass combustion: part I. Experiments – fuel type, equivalence ratio and particle size,” *Fuel*, vol. 85, pp. 1039–1046, 2006.
- [8] A. Friedl, E. Padouvas, H. Rotter, and K. Varmuza, “Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition,” *Anal. Chim. Acta*, vol. 544, pp. 191–198, 2005.
- [9] I. Barmina *et al.*, “Effect of Microwave Pre-Processing of Pelletized Biomass on its Gasification and Combustion,” *Latv. J. Phys. Tech. Sci.*, vol. 50, no. 4, pp. 34–47, 2013.
- [10] A. Tohidi, M. J. Gollner, and H. Xiao, “Fire Whirls,” *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 50, no. 1, pp. 187–213, 2017.
- [11] Ecotec SWEDEN AB, “Technical data Bioline 20-25 - Pellet burner from Ecotec,” 2017. [Online]. Available: www.ecotec.net/bostad/sma-villor/bioline-20-25-pelletsbrannare/. [Accessed: 02-Nov-2019].
- [12] I. Barmina, M. Zake, and R. Valdmanis, “Electric field-induced variations of combustion dynamics,” *Chem. Eng. Trans.*, vol. 39, pp. 1531–1536, 2014.
- [13] M. Zake, I. Barmina, and A. Meijere, “The electric field-forced formation of the swirling flame flow field,” in *The 15th Riga and 6th PAMIR Conference on Fundamental and Applied MHD*, 2005, pp. 115–118.
- [14] J. M. Goodings, D. K. Bohme, and N. G. Chun-Wai, “Detailed ion chemistry in methane-oxygen flames. I. Positive ions,” *Combust. Flame*, vol. 36, pp. 27–43, Jan. 1979.
- [15] J. M. Goodings, D. K. Bohme, and N. G. Chun-Wai, “Detailed ion chemistry in methane-oxygen flames. II. Negative ions,” *Combust. Flame*, vol. 36, pp. 45–62, Jan. 1979.
- [16] J. Lawton and F. J. Weinberg, *Electrical Aspects of Combustion*, In Russian. Moscow: Energija, 1976.
- [17] V. S. Karnani, “Electric field-driven flame dynamics,” University of California, Irvine, 2011.

- [18] J. A. Tinajero, “Flame dynamics and chemi-ion flows driven by applied electric fields,” University of California, Irvine, 2017.
- [19] M. Belhi, B. J. Lee, F. Bisetti, and H. G. Im, “A computational study of the effects of DC electric fields on non-premixed counterflow methane-air flames,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 50, no. 49, p. 494005, Dec. 2017.
- [20] Y.-C. Chien, “Electrical Aspects of Impinging Flames,” University of California, Irvine, 2014.
- [21] P. R. Salvador and K. G. Xu, “Electric field modified bunsen flame with variable anode placement,” *J. Thermophys. Heat Transf.*, vol. 31, no. 4, pp. 956–964, 2017.
- [22] J. Lawton, P. J. Mayo, and F. J. Weinberg, “Electrical control of gas flows in combustion processes,” *Proc. R. Soc. London*, vol. 303, no. 1474, pp. 275–298, 1968.
- [23] H. F. Calcote and C. H. Berman, “Increased methane-air stability limits by a DC electric field,” in *Proc. ASME Fossil Fuels Combustion*, 1989, pp. 25–31.
- [24] J. Colannino, “Electrodynamic combustion control TM technology, A clear Sign white paper,” Seattle, 2012.
- [25] H. F. Calcote, “Ion and electron profiles in flames,” *Symp. Combust.*, vol. 9, no. 1, pp. 622–637, 1963.
- [26] A. M. Starik, A. M. Savel’ev, and N. S. Titova, “Kinetic processes in the plasma formed in combustion of hydrocarbon fuels,” *J. Eng. Phys. Thermophys.*, vol. 84, no. 1, pp. 100–124, Jan. 2011.
- [27] A. M. Starik and N. S. Titova, “Kinetics of ion formation in the volumetric reaction of methane with air,” *Combust. Explos. Shock Waves*, vol. 38, no. 3, pp. 253–268, 2002.
- [28] H. Zhang, “Numerical combustion of commercial fuels and soot formation,” The University of Utah, 2005.
- [29] K. Werner, L. Pommer, and M. Broström, “Thermal decomposition of hemicelluloses,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 110, pp. 130–137, 2014.
- [30] H. Yang, R. Yan, H. Chen, D. H. Lee, and C. Zheng, “Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis,” *Fuel*, vol. 86, no. 12–13, pp. 1781–1788, 2007.
- [31] D. Shen, L. Zhang, J. Xue, S. Guan, Q. Liu, and R. Xiao, “Thermal degradation of xylan-based hemicellulose under oxidative atmosphere,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 127, pp. 363–371, 2015.
- [32] D. K. Shen, S. Gu, K. H. Luo, A. V. Bridgwater, and M. X. Fang, “Kinetic study on thermal decomposition of woods in oxidative environment,” *Fuel*, vol. 88, no. 6, pp. 1024–1030, Jun. 2009.
- [33] S. A. El-Sayed and M. Khairy, “An experimental study of combustion and emissions of wheat straw pellets in high-temperature air flows,” *Combust. Sci. Technol.*, vol. 190, no. 2, pp. 222–251, 2018.
- [34] X. Zhou, W. Li, R. Mabon, and L. J. Broadbelt, “A critical review on hemicellulose pyrolysis,” *Energy Technol.*, vol. 5, no. 1, pp. 52–79, 2017.
- [35] S. Wang and C. N. Mulligan, “Effect of natural organic matter on arsenic release from soils and sediments into groundwater,” *Environ. Geochem. Health*, vol. 28, no. 3, pp. 197–214, Jun. 2006.
- [36] A. G. Barneto, J. A. Carmona, J. A. Conesa Ferrer, and M. J. Díaz Blanco, “Kinetic study on the thermal degradation of a biomass and its compost: Composting effect on hydrogen production,” *Fuel*, vol. 89, no. 2, pp. 462–473, Feb. 2010.
- [37] Y. B. Zeldovich, *Selected Works of Yakov Borisovich Zeldovich, Volume I*, Russian Tr. Moscow: Nauka, 1992.

- [38] A. V. Talantov, *The theory of combustion*, In Russian., vol. 1. Kazan, Russia: Kazan Aviation Institute, 1975.
- [39] D. Shen, R. Xiao, S. Gu, and H. Zhang, “The overview of thermal decomposition of cellulose in lignocellulosic biomass,” in *Cellulose – Biomass Conversion*, InTech, 2013.
- [40] F. A. Williams, *Combustion Theory: The Fundamental Theory of Chemically Reacting Flow Systems*, 2nd ed. California, USA: The Benjamin/Cummings Publishing Company, 1985.
- [41] T. G. Bridgeman, J. M. Jones, I. Shield, and P. T. Williams, “Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties,” *Fuel*, vol. 87, no. 6, pp. 844–856, May 2008.
- [42] R. C. Pettersen, “The Chemical Composition of Wood,” in *Journal of Polymer Science*, vol. 51, no. 155, 1984, pp. 57–126.
- [43] C. H. Fuchsman, *Peat: Industrial Chemistry and Technology*, 1st Ed. New York: Academic Press Inc., 1980.
- [44] M. Amutio, G. Lopez, R. Aguado, M. Artetxe, J. Bilbao, and M. Olazar, “Kinetic study of lignocellulosic biomass oxidative pyrolysis,” *Fuel*, vol. 95, pp. 305–311, May 2012.
- [45] E. Daouk, L. Van de Steene, F. Paviot, E. Martin, J. Valette, and S. Salvador, “Oxidative pyrolysis of wood chips and of wood pellets in a downdraft continuous fixed bed reactor,” *Fuel*, vol. 196, pp. 408–418, 2017.
- [46] R. J. Yokelson, R. Susott, D. E. Ward, J. Reardon, and D. W. T. Griffith, “Emissions from smoldering combustion of biomass measured by open-path Fourier transform infrared spectroscopy,” *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 102, no. 15, pp. 18865–18877, 1997.
- [47] O. Purmalis, D. Porsnovs, and M. Klavins, “Differential thermal analysis of peat and peat humic acids,” *Mater. Sci. Appl. Chem.*, vol. 24, pp. 89–94, 2011.
- [48] A. N. Hayhurst and M. S. Parmar, “Does solid carbon burn in oxygen to give the gaseous intermediate CO or produce CO₂ directly? Some experiments in a hot bed of sand fluidized by air,” *Chem. Eng. Sci.*, vol. 53, no. 3, pp. 427–438, 1998.
- [49] X. Jiang, D. Chen, Z. Ma, and J. Yan, “Models for the combustion of single solid fuel particles in fluidized beds: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 68, no. 1, pp. 410–431, 2017.
- [50] H. P. Miller, R. Mitchell, M. Smooke, and R. Kee, “Towards a comprehensive chemical kinetic mechanism for the oxidation of acetylene: comparison of model predictions with results from flame and shock tube experiments,” in *Proceedings of the Nineteenth Symposium (International) on Combustion*, 1982, pp. 181–196.
- [51] F. L. Dryer, *High temperature oxidation of carbon monoxide and methane in a turbulent flow reactor*, no. AD746284. New Jersey: University of South Carolina, 1972.
- [52] G. P. Smith *et al.*, “Methane-air reaction mechanism, GRI Mech 3.0,” 2018. [Online]. Available: <http://combustion.berkeley.edu/gri-mech/>. [Accessed: 14-Oct-2019].
- [53] H. Marsh and K. Kuo, “Kinetics and catalysis of carbon gasification,” in *Introduction to Carbon Science*, Newcastle, UK: Elsevier, 1989, pp. 107–151.
- [54] A. Ouedraogo, J. C. Mulligan, and J. G. Cleland, “A quasi-steady shrinking core analysis of wood combustion,” *Combust. Flame*, vol. 114, no. 1–2, pp. 1–12, 1998.
- [55] H. A. Michelsen, C. Schulz, G. J. Smallwood, and S. Will, “Laser-induced incandescence: Particulate diagnostics for combustion, atmospheric, and industrial applications,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 51, pp. 2–48, 2015.
- [56] H. F. Calcote, “Mechanisms for the formation of ions in flames,” *Combust. Flame*, vol. 1, no. 4, pp. 385–403, 1957.
- [57] J. Prager, U. Riedel, and J. Warnatz, “Modeling ion chemistry and charged species diffusion

- in lean methane-oxygen flames,” *Proc. Combust. Inst.*, vol. 31 I, no. 1, pp. 1129–1137, 2007.
- [58] M. P. Gardner, C. Vinckier, and K. D. Bayes, “Identification of the primary chemi-ion in hydrocarbon oxidations,” *Chem. Phys. Lett.*, vol. 31, no. 2, pp. 318–320, 1975.
- [59] J. A. Green and T. M. Sugden, “Some observations on the mechanism of ionization in flames containing hydrocarbons,” *Symp. Combust.*, vol. 9, no. 1, pp. 607–621, 1963.
- [60] R. C. Brown and A. N. Eraslan, “Simulation of ionic structure in lean and close-to-stoichiometric acetylene flames,” *Combust. Flame*, vol. 73, no. 1, pp. 1–21, 1988.
- [61] A. N. Eraslan and R. C. Brown, “Chemiionization and ion-molecule reactions in fuel-rich acetylene flames,” *Combust. Flame*, vol. 74, no. 1, pp. 19–37, 1988.
- [62] A. B. Fialkov and K. H. Homann, “Large molecules, ions, radicals, and small soot particles in fuel-rich hydrocarbon flames – Part VI: Positive ions of aliphatic and aromatic hydrocarbons in a low-pressure premixed flame of n-butane and oxygen,” *Combust. Flame*, vol. 127, no. 3, pp. 2076–2090, 2001.
- [63] A. M. Savel’ev, A. M. Starik, N. S. Titova, and O. N. Favorskii, “Mechanism of the electric charging of soot particles upon the combustion of hydrocarbon fuels,” *Dokl. Phys.*, vol. 49, no. 8, pp. 441–446, 2004.
- [64] A. Fialkov, “Investigations on ions in flames,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 23, no. 5–6, pp. 399–528, 1997.
- [65] R. K. Cheng and D. Littlejohn, “Laboratory Study of Premixed H₂-Air and H₂-N₂-Air Flames in a Low-Swirl Injector for Ultralow Emissions Gas Turbines,” *J. Eng. Gas Turbines Power*, vol. 130, no. 3, May 2008.
- [66] Y. Wang, “A numerical study of combustion in meso-scale vortex chambers,” The Pennsylvania State University, 2006.
- [67] A. K. Gupta, D. G. Lilley, and N. Syred, *Swirl Flows*, Russian Translation. Moscow: Mir, 1987.
- [68] I. Barmina, R. Valdmanis, H. Kalis, and M. Marinaki, “Experimental and numerical study of the development of swirling flow and flame dynamics and combustion characteristics at biomass thermo-chemical conversion,” *Eng. Rural Dev.*, vol. 16, no. 1, pp. 68–74, 2017.
- [69] H. C. Jagers and A. von Engel, “The effect of electric fields on the burning velocity of various flames,” *Combust. Flame*, vol. 16, no. 3, pp. 275–285, 1971.
- [70] F. Bisetti and M. El Morsli, “Calculation and analysis of the mobility and diffusion coefficient of thermal electrons in methane/air premixed flames,” *Combust. Flame*, vol. 159, no. 12, pp. 3518–3521, 2012.
- [71] T. Wyttenbach, C. Bleiholder, and M. T. Bowers, “Factors contributing to the collision cross section of polyatomic ions in the kilodalton to gigadalton range: Application to ion mobility measurements,” *Anal. Chem.*, vol. 85, no. 4, pp. 2191–2199, 2013.
- [72] J. Lawton and F. J. Weinberg, “Maximum ion currents from flames and the maximum practical effects of applied electric fields,” *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 277, no. 1371, pp. 468–497, 1964.
- [73] K. G. Xu, “Plasma sheath behavior and ionic wind effect in electric field modified flames,” *Combust. Flame*, vol. 161, no. 6, pp. 1678–1686, 2014.
- [74] T. Asakawa, “Effect of an electrical field on liquid fuel combustion processes,” in *Combustion Questions*, Russian Tr., Moscow: Metallurgizdat, 1963, pp. 419–426.
- [75] E. M. Stepanov and B. G. D’yachkov, *Ionization in Flames — The Electric Field*, In Russian. Moscow: Metallurgizdat, 1968.
- [76] Y. C. Chien and D. Dunn-Rankin, “Electric field induced changes of a diffusion flame and heat transfer near an impinging surface,” *Energies*, vol. 11, no. 5, 2018.

- [77] M. Belhi, P. Domingo, and P. Vervisch, "Modelling of the effect of DC and AC electric fields on the stability of a lifted diffusion methane/air flame," *Combust. Theory Model.*, vol. 17, no. 4, pp. 749–787, 2013.
- [78] M. Abricka, I. Barmina, V. Suzdalenko, and M. Zake, "Combustion dynamics at biomass thermochemical conversion downstream of integrated gasifier and combustor," in *Engineering For Rural Development*, 2013, pp. 638–642.
- [79] O. V. Kozlov, *Electric probe in plasma*, In Russian. Moscow: Atomizdat, 1969.
- [80] C. Igathinathane *et al.*, "Simple and inexpensive method of wood pellets macro-porosity measurement," *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 16, pp. 6528–6537, Aug. 2010.
- [81] X. Cheng, L. Chen, F. Yan, and S. Dong, "Study on soot formation characteristics in the diesel combustion process based on an improved detailed soot model," *Energy Convers. Manag.*, vol. 75, pp. 1–10, Nov. 2013.
- [82] T. J. C. Dolmansley, C. W. Wilson, and D. A. Stone, "Electrical modification of combustion and the affect of electrode geometry on the field produced," *Model. Simul. Eng.*, vol. 2011, 2011.
- [83] H. Duan *et al.*, "Effects of electric field intensity and distribution on flame propagation speed of CH₄/O₂/N₂ flames," *Fuel*, vol. 158, pp. 807–815, 2015.
- [84] J. M. Forthofer and S. L. Goodrick, "Review of vortices in wildland fire," *J. Combust.*, vol. 2011, pp. 1–14, 2011.
- [85] I. Barmina, A. Kolmickovs, R. Valdmanis, M. Zake, and H. Kalis, "Experimental and numerical studies of electric field effects on biomass thermo-chemical conversion," *Chem. Eng. Trans.*, vol. 50, 2016.
- [86] DSC-Electronics Germany GmbH, "DP-PH series high-voltage laboratory power supplies." [Online]. Available: dsc-electronics.com/products/dc-laboratory-power-supplies/dp-ph-series [Accessed: 24-Jan-2020].
- [87] I. Barmina, M. Purmalis, R. Valdmanis, and M. Zaķe, "Electrodynamic control of the combustion characteristics and heat energy production," *Combust. Sci. Technol.*, vol. 188, no. 2, pp. 190–206, Feb. 2016.



Antons Kolmičkovs dzimis 1990. gadā Ventspilī. Rīgas Tehniskā universitātē (RTU) ieguvis bakalaura grādu ķīmijas tehnoloģijā (2013) un maģistra grādu siltumenerģētikā un siltumtechnikā (2016). No 2014. līdz 2020. gadam strādājis Latvijas Universitātes Fizikas institūtā, ieņemot asistenta, vēlāk arī pētnieka amatu. 2016. gadā iekļauts RTU Zelta fondā par izcilību studijās un panākumiem zinātnē. Par maģistra darbu saņēmis AS "Latvenergo" studiju noslēguma darbu konkursa diplomu. Patlaban A. Kolmičkovs ir pašvaldības SIA "Rīgas Ūdens" Infrastruktūras attīstības departamenta plānošanas inženieris.