



RĪGAS TEHNISKĀ  
UNIVERSITĀTE

Antons Kolmičkovs

# ELEKTRISKĀ LAUKA IETEKME UZ GRANULĒTAS BIOMASAS DEGŠANU VIRPUĻPLŪSMĀ

Promocijas darbs

Antons Kolmičkovs

Promocijas darbs



RTU Izdevniecība  
Rīga 2022

**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 darbs**

Zinātniskie vadītāji

*Dr. sc. ing.*

Sergejs VOSTRIKOVS

*Dr. sc. ing.*

Inesa BARMINA

RTU Izdevniecība

Rīga 2022

Kolmičkovs, A. Elektriskā lauka ietekme uz granulētas biomasas degšanu virpuļplūsmā. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība, 2022. – 177 lpp.

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

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 “Biomassas 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

---

INVESTING IN YOUR FUTURE

## 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; Mašīnzinību, Transporta un Aeronautikas Fakultāte;  
Mehānikas un Mašīnbūves Institūts; Latvija

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

Pētnieks, *Ph. D. Michal Špiláček*  
Brno Tehnoloģiskā universitāte, Mašīnzinību fakultāte, Enerģētikas institūts  
Čehijas Republika

### APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis(usi) 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: 2021. gada 1. oktorbī

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, CO<sub>2</sub> 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 granulētās 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 citējamos izdevumos un prezentēšanu dažāda līmeņa starptautiskās zinātniskās konferencēs. Darba pirmajā nodaļā apkopota informācija par granulētās 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 sadeģšanas procesu izpētes rezultāti apkopoti trešajā nodaļā, inženiertehniskais aprēķins kopā ar aprobācijas rezultātiem – ceturtajā nodaļā. Iegūtie secinājumi ar priekšlikumiem tehnoloģiju tālākai attīstībai apkopoti darba noslēgumā.

## ANNOTATION

**Keywords: combustion, biomass, wheat straw, softwood, peat, electric field, electrodynamic control**

The Doctoral Thesis examines the control of the swirling flame flow dynamics with an external static electric field (electric field-driven flame dynamics) firing the gaseous products of thermal decomposition of pelletized straw, woody biomass, and peat with the aim of more efficient heat production with a decrease of flue gas emissions. The relevance of the work is related to the goals set by the EU for 2030 and is in line with the development strategy of the Latvian RIS3, including increasing energy efficiency, diversifying biofuels, using CO<sub>2</sub>-neutral energy, and developing smart technologies to obtain clean energy from local energy resources of Latvia. The scientific novelty of the research is in the combined use of an external electric field, the biomass of various origins, and a swirling flame flows to produce heat during the combustion of a pelletized solid bio-fuel for efficient mixing of the gaseous components of the fuel-air mixture.

To achieve the goal of the Thesis, experimental studies of the effect of an electric field on the processes of thermal decomposition of pelletized solid fuel (wheat straw, coniferous wood and peat), the kinetics of the formation of volatile products, the processes of combustion kinetics and the dynamics of a swirling flame flow were carried out in order to evaluate the effect of an external electric field on the variable parameters – flame temperature, swirling flow velocity components, fuel-air mixture composition and the amount of heat released during the thermal decomposition of biomass and combustion of gaseous substances. The Thesis summarizes the research carried out at the Institute of Physics of the University of Latvia (IPUL) within the framework of projects funded by the European Regional Development Fund (ERDF). The results of the research were presented at international scientific conferences and have been published in periodic journals indexed in international scientific databases. The purpose of the published (16) articles was a verification of the experimental methodology and the results by the international scientific community.

The Introduction of the Doctoral Thesis defines the aims and tasks of the Thesis, evaluates its topicality and scientific novelty, describes its practical significance, provides a brief overview of the presentation of the research results at various international scientific conferences, and lists the publications in indexed scientific journals. The first chapter summarizes the information on thermal decomposition processes of pelletized solid fuel, the combustion kinetics of volatiles, ion formation mechanisms, the formation of swirling flame flow, and its behaviour in the electric field. The second chapter describes the experimental research and measurement methodology. The results of the research of thermal decomposition and combustion processes of biomass of different origins are summarized in the third chapter, but the engineer-economic calculation together with the approbation results are presented in the fourth chapter. The obtained conclusions and proposals for further development of technology are summarized in the conclusions of the work.

## PATEICĪBAS

Šis darbs ir liels kopsavilkums nozīmīgai manas studiju dzīves daļai, un es velētos pateikt paldies tiem cilvēkiem, kuri man ir snieguši zināšanas, dalījās ar pieredzi un atbalstīja morāli un finansiāli, un kuri šo posmu paveica man līdzās, intensīvā solī.

Vēlos izteikt visdziļāko pateicību Latvijas Universitātes Fizikas institūta darba zinātniskam vadītājam Dr.phys. Maijai Zaķei un Dr.sc.ing. Inesai Barminai un Rīgas Tehniskās Universitātes darba vadītājam Dr.sc.ing. Sergejam Vostrikovam par dalīšanos zināšanās un pieredzē. Sevišķi vēlos uzsvērt Latvijas Universitātes Fizikas institūta infrastruktūras atbalstu darba izstrādē un īpaši Eiropas Reģionālo struktūrfondiem, par finansiālo atbalstu pētījumiem. Īpašs paldies ir jāsaka LUFU pētniekam Raimondam Valdmanim, kurš palīdzēja tehniskajā eksperimenta plānošanā un tehnoloģisko iekārtu izstrādē.

Esmu dziļi pateicīgs Rīgas Tehniskās Universitātes Siltumenerģētisko sistēmu katedras profesoriem Sigurdam Jaundālderim un Dmitrijam Rusovam par būtisku ieguldījumu manas, kā siltumenerģijas inženiera kvalifikācijas celšanā. Paldies arī katedras darbiniekiem, īpaši Dacei Šneiderei, kura bieži palīdzēja vairāku administratīvo jautājumu un neskaidrību risināšanā studiju gaitā. Vēlos atzīt arī mana bakalaura darba vadītāja, profesora Valda Kampara (RTU MĻĶF) un Jelenas Titokas (SIA Ventamonjaks Serviss) ieguldījumu manā profesionālā izaugsmē, iedvesmojot mani turpināt savas studijas un darbu degvielu un degšanas procesu izpēti nozarē, profesionālās prakses darba vadītāja Otto Kricka (AS Latvenego) un Dmitrija Ruskova (AS Grindeks) ieguldījumu, kuri ir bagātinājuši manu redzesloku un attīstīja manu kritisko domāšanu.

Noslēgumā, ar mīlestību, gribu pateikt "Paldies!" savai ģimenei, par pacietību un atbalstu, un par to, ka izveidoja manu attieksmi pret mācībām un darbu. Īpaši gribu izteikt sirsnīgo paldies manai mātei, kura iemācīja nepadoties, savlaicīgi uzkrāt enerģiju un vienmēr būt gatavam izaicinājumiem.

Antons Kolmičkovs

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

## SATURS

Anotācija.....	4
Annotation .....	4
Pateicības .....	6
Darbā izmantotie apzīmējumi un saīsinājumi .....	9
Ievads.....	11
Darba mērķis.....	12
Mērķa sasniegšanai atrisinātie galvenie uzdevumi .....	13
Darba zinātniskā novitāte.....	13
Darba praktiskā nozīmība .....	13
Izpētes metodika .....	14
Pētījuma diapazons un iegūto rezultātu pielietojuma robežās .....	14
Hipotēze .....	15
Aizstāvēšanai izvirzītās tēzes.....	15
Darba struktūra un apjoms .....	15
Autora ieguldījums .....	16
Darba aprobācija .....	16
Attiecināmo zinātnisko publikāciju saraksts .....	16
Citas zinātniskās publikācijas .....	18
Zinātnisko projektu saraksts .....	18
Ziņojumi konferencēs .....	19
1. Siltuma ražošanas procesu teorijas un esošo eksperimentālo pētījumu izvērtējums .....	20
1.1. Granulētās augu biomasas degšanas process .....	20
1.1.1. Ligno-celulozes biomasas elementārā sastāva īpašības .....	20
1.1.2. Biomasas ķīmiskais sastāvs un to atsevišķu komponentu īpatnības .....	22
1.1.3. Komponentu oksidatīvā termiskā sadalīšanās .....	24
1.1.4. Gaistošo vielu un cietās pārogļotās fāzes veidošanās un tās daudzums .....	28
1.1.5. Biomasas gazifikācijas procesa gāzveida vielu veidošanās kinētika un to daudzums..	30
1.2. Liesmas struktūra un kinētika .....	33
1.2.1. Vienkāršāko gaistošo vielu degšanas mehānismi un reakciju kinētika.....	35
1.2.2. Oglūdeņražu degšanas mehānismi un reakciju kinētika .....	39
1.2.3. Oglūdeņražu liesmas izplatīšanas ātrums .....	42
1.2.4. Liesmas endotermisko un eksotermisko efektu siltuma bilance.....	44
1.3. Liesmas virpuļplūsmas dinamika .....	48
1.3.1. Virpuļplūsmas raksturošana - virpuļviesulis.....	49
1.3.2. Virpuļviesuļa matemātiskā analīze .....	50
1.4. Jonu veidošanās liesmā.....	52
1.4.1. Liesmas jonizācijas mehānismi.....	53
1.4.2. Oglūdeņražu liesmas pozitīvie joni.....	56
1.4.3. Jonu koncentrācija un sadalījums oglekļa dioksīda liesmā .....	58
1.5. Elektriskā lauka tilpuma spēks .....	62
1.5.1. Strāvas piesātinājuma ietekme uz elektrisko tilpuma spēku.....	63
1.5.2. Daliņu kustīguma ietekme uz elektrisko tilpuma spēku .....	65
1.5.3. “Jonu vēja” ātrums .....	66
1.5.4. Elektriskā lauka tilpuma spēka ietekme uz liesmu .....	67



2. Eksperimentālās iekārtas izgatavošana, testēšanas metodoloģija un validācija .....	71
2.1. Eksperimentālās iekārtas apraksts .....	73
2.1.1. Elektriskā lauka konfigurācija un parametri .....	77
2.1.2. Virpuļplūsmas dinamikas veidošanās eksperimentālā iekārtā .....	79
2.2. Mērīšanas metodoloģijas apraksts .....	85
2.2.1. Biomasas sastāva un termiskās sadalīšanas procesa kinētikas raksturošana .....	85
2.2.2. Gaisa plūsmas nodrošināšana un padeves kontrole .....	86
2.2.3. Potenciāla nodrošināšana uz elektroda un sprieguma kontrole .....	86
2.2.4. Biomasas termiskās sadalīšanās ātruma mērīšanas metodika.....	86
2.2.5. Plūsmas ātruma komponentu mērīšanas metodika.....	87
2.2.6. Jonu strāvas mērīšanas metodika .....	88
2.2.7. Liesmas temperatūras mērīšanas metodika.....	88
2.2.8. Gaistošo vielu plūsmas un liesmas sastāva mērīšanas metodika .....	89
2.2.9. Degšanas produktu sastāva un temperatūras mērīšanas metodika.....	91
2.2.10. Iekārtas siltuma jaudas un summārā siltuma mērīšanas metodika.....	92
2.3. Tehnoloģiskās biomasas degšanas iekārtas apraksts .....	93
3. Siltuma procesu eksperimentālie pētījumi: identifikācija un optimizācija .....	95
3.1. Salmu, koksnes un kūdras biomasas paraugu raksturojums .....	95
3.2. Granulēto biomasas paraugu degšanas procesa raksturojums .....	99
3.3. Jonu strāvas veidošanās eksperimentālie pētījumi.....	105
3.4. Elektriskā lauka ietekme uz plūsmas ātrumu komponentu izmaiņu .....	110
3.5. Degšanas temperatūras izmaiņas elektriskā lauka iedarbības rezultātā.....	114
3.6. Biomasas termiskās sadalīšanas procesa intensifikācija.....	116
3.7. Siltuma pārneses uzlabošanās no liesmas uz kurtuves sienām .....	122
3.8. Dūmgāzes emisiju veidošanās biomasas degšanā ar elektrisko lauku.....	128
4. Jaunās tehnoloģijas prototipa aprobācija un novērtējums ar rūpniecisko granulu degli .....	134
4.1. Tehnoloģijas prototipa aprobācijas rezultatīvie radītāji .....	134
4.2. Tehnoloģijas ekonomijas aprēķins un drošības pasākumi.....	137
Secinājumi .....	142
Conclusions .....	144
Izmantotā literatūra.....	146
Pielikumi.....	161
1. pielikums .....	162
2. pielikums .....	163
3. pielikums .....	164
4. pielikums .....	166
5. pielikums .....	167
6. pielikums .....	168
7. pielikums .....	170
8. pielikums .....	171
9. pielikums .....	173
10. pielikums .....	174
11. pielikums .....	174
12. pielikums .....	175

## DARBĀ IZMANTOTIE APZĪMĒJUMI UN SAĪSINĀJUMI

### Saīsinājumu saliktenis

AEBIOM – *Association of European Biomass*  
 Ara – arabinoze / abarināns  
 DC – *Direct Current* – līdzstrāva  
 DSC – *Differential Scanning Calorimetry*  
 DTA – *Differential Thermal Analysis*  
 DTG – *Differential Thermogravimetry*  
 EDS – Elektrodzinējspēks  
 EFDF – *Electric Field-Driven Flame Dynamics*  
 ERAF – Eiropas Reģionālās Attīstības Fonds  
 ES – Eiropas Savienība  
 EUR – Euro (valūta)  
 FTIR – Fourier-transform infrared spectroscopy  
 Gal – galaktoze / galaktāns  
 Glu – glikoze / glikāns

HHV – *Higher Heating Value*  
 IS – infrasarkanais (IR – infrared)  
 KĶI – Koksnes Ķīmijas institūts  
 LHV – *Lower Heating Value*  
 LUFU – Latvijas Universitātes Fizikas institūts  
 Man – mannoze / mannāns  
 PAH – *Polycyclic aromatic hydrocarbons*  
 REF – Reference vai atsaucē  
 SEG – Siltumnīcefekta gāzes  
 SLA – Sabiedrība ar ierobežotu atbildību  
 TG – *Thermogravimetry* – termogravimetrija  
 Uro – urīnskābe / uronāns  
 Xyl – ksiloze / ksilāns

Abs. – absorbcijas relatīvās vienībās  
 amu – *atomic mass units* – atoma masas vienības  
 asoc. – asociētais  
 degš. – degšanas  
 degv. – degviela  
 doc. – docents  
 Dr. – doktors  
 et. al. – *et alia* – un citi  
 g. – gaiss  
 gazif. – gazifikācija/gazifikators  
 habil. – habilitētais  
 ie. – ieeja  
 ied. – iedegšanās  
 ing. – inženieris  
 iz. – izeja  
 math. – *mathematics*  
 max. – maksimālais  
 min – minūte

min. – minimālais  
 phys. – *physics*  
 ppm – one part per million – 1% = 10 000 ppm  
 prod. – reakcijas produkti  
 prof. – profesors  
 prop. – propāns  
 r.z. – reakcijas zona  
 rel. vien. – relatīvās vienības  
 sc. – *science*  
 sk. – skaties  
 stac. – stacionārais  
 sum. – summārais  
 t.s. – tajā skaitā  
 teor. – teorētiskais  
 u.c. – un citi  
 u.t.t. – un tā tālāk  
 u.tml. – un tām līdzīgi  
 vid. – vidējais

$A$  – pirmseksponeciālais faktors  
 $A_v$  – absorbcijas intensitāte  
 $c_p$  – relatīvā izobārā siltumietilpība  
 $D$  – diametrs  
 $d$  – atvasinājums  
 $E_A$  – aktivācijas enerģija  
 $E_\phi$  – elektriskā lauka intensitāte  
 $e$  – eksponenciālais koeficients  
 $e^-$  – elektrons  
 $e_\theta$  – azimutālā komponente noteiktajā koord. sistēmā  
 $e_z$  – aksiālā komponente noteiktajā koord. sistēmā  
 $F$  – liesmas frontes virsmas laukums  
 $f$  – frekvence  
 $F_\phi$  – elektriskais tilpuma spēks  
 $G$  – plūsmas masas patēriņš  
 $G_0$  – plūsmas kustības daudzums  
 $G_z$  – aksiālās plūsmas kustības daudzums  
 $G_\theta$  – azimutālās plūsmas kustības daudzums

*Latīņu simboli*  
 $H, h$  – entalpija, reakcijas siltumefekts  
 $I$  – elektriskās strāvas stiprums, izstarojuma intensitāte, identitātes tenzors  
 $j$  – jonu strāva  
 $Y$  – ordinātu ass apzīmējums Dekarta sistēmā  
 $k_B$  – Bolcmana konstante  
 $K_j$  – jonu veidošanas ātrums  
 $K_{reakc}$  – reakcijas ātruma konstante  
 $L, l$  – garums  
 $n$  – vielas/jonu molārais daudzums  
 $m$  – masa  
 $M_r$  – molārā masa  
 $P$  – jauda  
 $p$  – spiediens  
 $Q$  – siltuma daudzums  
 $q_\pm$  – elektriskais lādiņš  
 $r$  – rādiuss vai radiālā komponente  
 $R$  – universālā gāzes konstante

$Re$  – Reinoldsa kritērijs  
 $R_Q$  – Omiskā pretestība  
 $R \cdot$  – radikāls  
 $S$  – virpuļskaitlis  
 $t$  – laiks  
 $T$  – temperatūra,  $T_d$  – degšanas temperatūra  
 $U$  – lineārais liesmas izplatīšanas ātrums  
 $U\varphi$  – elektriska lauka spriegums  
 $u_d$  – jonu dreifēšanas ātruma vektors  
 $u_n$  – normālais liesmas izplatīšanas ātrums  
 $u_{plūsmas}$  – degmaisījuma plūsmas ātrums  
 $u_r$  – ātruma radiālā komponente

$\partial$  – atvasināšanas zīme  
 $\Delta$  – vērtību starpība  
 $\nu$  – viļņa skaitlis  
 $\alpha$  – gaisa pārākuma koeficients  
 $\Gamma$  – virpuļplūsmas vektora recirkulācija  
 $\delta$  – biezums vai platumš  
 $\varepsilon$  – elektriskā caurlaidība  
 $\zeta$  – vidējais brīvais noskrējiena ceļš  
 $\eta$  – procesa lietderības koeficients  
 $\theta$  – azimutālā komponente  
 $\lambda$  – siltuma pārejas/vadītspējas koeficients

$\odot$  – Autortiesības zīme  
 $\oint$  – cirkulācijas operators  
 $\nabla$  – Laplasa operators

$u_z$  – ātruma aksiālā komponente  
 $u_\theta$  – ātruma azimutālā komponente  
 $V$  – tilpums, tilpuma daļa, īpatnējais tilpums  
 $V_{Avogadro}$  – gāzes kopējais molekulu skaits tilpuma vienībā  
 $V_D$  – difūzijas koeficients vai difūzijas ātrums  
 $V_k$  – kurināmā telpiskais patēriņš  
 $w$  – relatīvais masas daudzums (procentos)  
 $X$  – abscisu ass apzīmējums Dekarta sistēmā  
 $z$  – aplikatu ass komponente  
 $\Delta x$  – attālums starp ķermeņiem

### Grieķu burti

$\mu_{\pm}$  – jonu kustīgums  
 $\rho$  – vides blīvums  
 $\sigma$  – parametra deformācijas ātruma tenzors, ģeometriskā sadursmes projekcija jeb sadursmes šķērsriezums  
 $\Sigma$  – summēšanas zīme  
 $\tau$  – viskozitātes stresa tenzors  
 $\nu$  – kinemātiskā viskozitāte  
 $\varphi$  – elektriskais potenciāls  
 $\chi$  – reakciju vai vielas molārā daļa  
 $\psi$  – liesmas konusa atvērums leņķis  
 $\omega$  – plūsmas savirpuļojums  
 $\Omega_{IMS}$  – vidējā impulsa pārnese šķērsriezumā

### Simboli

$\otimes$  – vektoriālā reizinājuma operators  
 $\sphericalangle$  – leņķis

## IEVADS

Aizvien nopietnākas kļūst siltumnīcas efekta izraisošo gāzu ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ) koncentrācijas palielināšanās Zemes atmosfērā, izraisot gaisa piesārņojumu ar degšanas produktiem un ietekmējot Zemes klimata izmaiņas. Ar nolūku samazināt antropogēno ietekmi uz globālajām problēmām, Eiropas Savienības komisija noteica tālākās enerģētikas politikas mērķus laika posmam līdz 2030. gadam: par 40 % samazināt siltumnīcas efektu izraisošos  $\text{CO}_2$  izmešus: līdz 32 % palielināt atjaunojamos energoresursus ES valstu enerģētikas bilancē un par 32 % palielināt energoefektivitāti, salīdzinot ar 1990. gada līmeni [1].

Aktuālās ir arī problēmas, kas saistītas ar fosilā kurināmā resursu noplicināšanos un alternatīvo enerģijas avotu meklēšanu, kas 21. gadsimtā izraisīja nepieciešamību strauji attīstīt vēja, fotoelementu, plūdmaiņas viļņu un biomasas enerģijas tehnoloģijas izmantošanu ražošanas procesos. Galvenie biomasas patērētāji, enerģijas ražošanai, ir Āzija (43,6 %) un Āfrika (21,1 %). Kanāda, ASV, Eiropa un Latīņu Amerika daļa atlikušo biomasas enerģijas ražošanas tirgu vienādās daļās. Centrālās Āfrikas valstīs enerģijas ražošanai galvenokārt izmanto koksnes biomasu, bet ASV, Kanāda, Krievija un Eiropas Savienības valstīs diference resursu izmantošanu, jo šajās valstīs koksne ir daudz nozīmīgāks un dārgāks resurss un to pārsvarā izmanto, kā būvmateriālu [2]. Sekojot “nulles izmešu” vadlīnijām, pieprasījums pēc kvalitatīvās koksnes biomasas enerģijas ražošanas strauji pieaug. Atbilstoši Eiropas Biomasas asociācijas (*AEBIOM*) datiem koksnes biomasas patēriņš enerģijas ražošanai, laika posmā no 2013. gada līdz 2017. gadam tas ir audzis par 30 % (no 17 milj. līdz 24 milj. tonnu), tomēr kurināmā ražošanas tempi, šajā laika posmā, joprojām atpaliek, sasniedzot tikai no 14 līdz 18 milj. tonnu. Paralēli tam ir novērojama ražošanas recesija, un aktīva koksnes biomasas importa attīstība ES valstīs, ietekmējot ar mežu izstrādi saistīto SEG gāzes emisiju palielināšanos citos reģionos [3]. Tāpēc par vienu no populārākajām tendencēm kļūst biomasas kurināmā diversifikācija, meklējot alternatīvu biomasas resursu (salmu) izmantošanas iespējas enerģijas ražošanā. Izvērtējot šo alternatīvo enerģijas resursu izmantošanas iespējas, īpaši tiek ieteikta kviešu un rīsu salmu izmantošana, kuru resursi sasniedz > 1500 milj. tonnu gadā [4]. Vērts atzīmēt, ka pat tādās attīstītās valstīs kā Dānija, kurā ar likumu ir noteikts, ka salmiem, kā kurināmajam, ir jānodrošina 15 % no saražotās enerģijas apjoma, mazāk nekā 23 % no saražotā salmu apjoma tiek izmantoti enerģijas ražošanai, 27 % tiek lietoti lauksaimniecībā augsnes uzlabošanai, un līdz 50 % salmu paliek neizmantoti, un pārvēršas atkritumos (pēc *Danmarks Tekniske Universitet* datiem) [5].

Dažādu bioloģisko atkritumu pārstrādē, izmantojot rūpnieciskos (koksnes saimniecība), lauksaimniecības (salmi vai atkritumi no lopkopības saimniecībām) vai pārtikas ražotāju atkritumus (papīrs un citi lignocelulozes atkritumi), jau aktīvi iesaistās attīstīto valsts enerģijas ražotāji, izmantojot un izveidojot jaunas biomasas gazifikācijas un degšanas procesu tehnoloģijas [6], [7]. Tomēr zemas kvalitātes vai neapstrādātas biomasas izmantošana (ES valstīs līdz 45 %) [3] ir ierobežota mazo mājsaimniecību katlu iekārtās, ko nosaka to izmantotās biomasas fizikālo (ūdens saturs, blīvums un struktūra) un fizikāli-ķīmisko raksturojošo parametru (degšanas

siltumspēja, elementārais un ķīmiskais sastāvs, pelnu saturs) īpašību būtiska atšķirība un daudzveidība [8], [9]. Šāda daudzveidība izraisa siltuma un enerģijas ražošanas procesu nestabilitāti un samazina rezultātu prognozējamību.

Ņemot vērā ES noteiktās emisiju kvotas, Latvijā, fosilā cietā vai gāzveida kurināmā, apkures katlu mājas pakāpeniski tiek pārveidotas par katlu mājām, kas izmanto koksnes biomasas šķeldu vai granulas. Savukārt, ja šķeldas katlos tiek plaši lietotas verdošā slāņa vai kustīgo ārdū tehnoloģijas, kuras nav īpaši jutīgas pret kurināmā kvalitātes izmaiņām, nelielas jaudas granulu degļiem pārsvarā cenšas izmantot augsti kvalitatīvas koksnes skaidu granulas, jo izmantojot zemākās kvalitātes granulas, kurām pievieno arī lapas, mizas vai skujuas, samazinās biomasas granulu siltuma spēja, palielinās darvas nosēdumu veidošanās uz katlu sienām, pelnu veidošanās un stiklošanās [10]. Pieaugot pieprasījumam pēc augstas kvalitātes koksnes granulām, pakāpeniski veidojas koksnes granulu deficīts tirgū un tiek aktualizēts jautājums par alternatīvu granulēto biokurināmo izmantošanas iespējām lokālā (decentralizētā) apkurē. Turklāt, nekvalitatīva kurināma izmantošana degšanas procesā saistīta arī ar destruktīvo [11] un korozijas izraisošo vielu [12]–[15] veidošanos, kas samazina iekārtas izmantošanas ilgumu un palielina apkopes/remonta izmaksas.

Lai nodrošinātu stabilākus degšanas un gazifikācijas procesus, izmantojot dažādas izcelsmes biomasas, pakāpeniski attīstās biomasu pārstrādes metodes (granulēšana, briketēšana un šķeldošana), kas palīdz kontrolēt sadedzināmās biomasas blīvumu, elementāro sastāvu un siltumspēju, samazinot mitruma daudzumu kurināmā un atvieglot biomasas uzglabāšanu un transportēšanu [16], [17]. Tiek veikta biomasas priekšapstrāde, kas paver iespējas samazināt mitruma saturu biomasā un intensificēt gaistošo vielu veidošanos, to uzliesmošanu un degšanu [18], [19]. Paralēli pētījumiem, kas saistīti ar biomasas degvielu raksturojošo parametru uzlabošanu, tiek veikti pētījumi, kas saistīti ar degšanas procesu raksturojošo parametru uzlabošanu un stabilizāciju, degšanas procesu stabilizācijai izmantojot virpuļplūsmas, kombinēto degšanas procesu ar vienlaicīgu fosilā un atjaunojamā kurināmā sadedzināšanu, kā arī ārējos spēkus (elektriskos, magnētiskos) [20]–[25]. Izmantojot elektriskā lauka un liesmas mijiedarbības efektus, ir konstatēts, ka elektriskā lauka ierosinātā siltuma un masas pārnese lauka virzienā (jonu vējš) dod iespējas kontrolēt liesmas stabilitāti, garumu, formu, degšanas un siltuma ražošanas procesu efektivitāti un emisiju sastāvu [26]–[28].

### **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*), pielietojot degšanas procesu eksperimentālās identifikācijas metodes, kā arī izmantojot daudzfāžu nepārtrauktas vides daļiņu mehāniskās kustības un fizikāli ķīmiskās pārvēršanās teorijas.

### **Mērķa sasniegšanai atrisinātie galvenie 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**

Par elektriska lauka mijiedarbības efektiem ar gāzveida kurināmā (dabas gāzes, metāna, acetilēna, propāna) lamināru liesmu tika veikti plaši pētījumi dažādās valstīs. Fundamentālo ieguldījumu šī procesa teorētiskā un eksperimentālā izpētē kopš 19.gadsimta 60.gadiem ir veikuši *J.F. Weinberg, J. Lawton un P.J Mayo*, (Apvienotā Karaliste). Esošās zinātniskās tālākai attīstībai jaunāko pienesumu ir devuši *D.C. Murphy, S.D. Marcum, B.N. Ganguly, M.J. Papac, S. Karnani, D. Dunn-Rankin, J.A. Tinajero, F.B. Carleton, Y.C. Chien* (Amerikas Savienotajās Valstīs), *M. Sánchez-Sanz* (Spānija), *M. Belhi un P. Domingo* (Francija), *J. Van den Boom un A. Verhasselt* (Nīderlande), *Y. Wang, C. Li, X. Wu* (Ķīna), *F. Bisetti, D.G. Park, S.H. Chung, M.S. Cha, M.K. Kim* (Saūda Arābija), kā arī *M. Purmalis, D. Turlajs, M. Zaķe, I. Barmina, H. Kalis, N. Zeltiņš, A. Līckrastiņa, R. Valdmanis S. Vostrikovs un O. Krickis* (Latvija). Promocijas darba ievaros, pirmo reizi zinātnes informācijas telpā, tika aprakstītas mazas intensitātes (līdz  $1 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ ) perpendikulārā līdzstrāvas elektriskā lauka un dažādas izcelsmes granulētās 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 pārnese procesu un degšanas produktu sastāva veidošanos. Promocijas darba eksperimentālā pētījuma principiālais salīdzinājums ir sniegts 1.pielikumā.

### **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 atjaunojamās 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 apkopoti 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 termoķīmisko 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 atzītu autoru darbi.

### **Pētījuma diapazons un iegūto rezultātu pielietojuma robežās**

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 izvietojuma 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 ogļūdeņražu pārvērtību ietekmi uz liesmas jonizāciju un jonu strāvas veidošanos, kā arī par liesmas jonizācijas pakāpes 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 zinātniskās (*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*, Latvia, Jelgava, 20–22 May, **2020**, 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 7<sup>th</sup> Baltic Heat Transfer Conference*, Tallin, **2015**, pp. 169–174. [www.ttu.ee/public/p/projektid/bhtc2015/7th\\_BHTC\\_Technical\\_Programme.pdf](http://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](http://tf.llu.lv/conference/proceedings2015/Papers/083_Kolmickovs.pdf)

#### **Citas zinātniskās publikācijas**

1. Barmina, I., Kolmičkovs, A., Valdmanis, R., Zake, M., Kalis, H., Strautins, U. “Effects of Straw and Biogas Co-firing on the Combustion Characteristics” *Chemical Engineering Transactions*, **2019**, Vol.74, pp.235–240. DOI: 10.3303/CET1974040
2. Barmina, I., Kolmičkovs, A., Valdmanis, R., Zake, M., Kalis, H., Marinaki, M. “Experimental Study and Mathematical Modelling of Straw Co-Firing with Propane” *Chemical Engineering Transactions*, **2019**, Vol.74, pp.19–24. DOI: 10.3303/CET1974004
3. Barmina, I., Kolmičkovs, A., Valdmanis, R., Vostrikovs, S., Zake, M. “Thermo-Chemical Conversion of Microwave Activated Biomass Mixtures” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **2018**, vol. 355, pp. 1–9. DOI: 10.1088/1757-899X/355/1/012018
4. Barmina, I., Kolmičkovs, A., Valdmanis, R., Vostrikovs, S., Zake, M. “Combustion Dynamics of Biomass Mixtures with Microwave Pre-Processing of Pellets” In: *VIII International Scientific Colloquium Modelling for Materials Processings*, Latvia, Riga, 21–22 September, **2017**. pp.133–138. DOI: 10.22364/mmp2017.45
5. Barmina, A. Kolmickovs, R. Valdmanis, M. Zake. “Effect of an upstream-increasing magnetic field on the biomass gasification/combustion characteristics” in *Proceedings of the 7<sup>th</sup> Baltic Heat Transfer Conference*, Tallin, 2015, pp. 163–168.

#### **Zinātnisko projektu saraksts**

1. Biomasas kombinēto degšanas procesu pētījumi un elektrodinamiskā vadība ekoloģiski tīrai un efektīvai enerģijas ražošanai. ERAF projekta nr. 1.1.1.1/16/A/004. 2017.–2020.g
2. Jaunās tehnoloģijas attīstība un ieviešana biomasas degšanas un siltuma ražošanas procesu elektriskai kontrolei ar zināšanu nesaimniecisku pārnesi. LU projekta nr. AAP2015/B023. 2015.g.

3. Virpuļveida plūsmas: modelēšana un izmantošana enerģijas pārveidošanas tehnoloģijās, jaunu ierīču projektēšanā, jaunu tehnisku risinājumu iegūšanā un vides aizsardzībā. LZP projekta nr. 623/2014. 2014.g.
4. Granulētas biomasas degšanas procesu dinamikas regulēšana un uzlabošana elektrisko spēku laukā. ERAF projekta nr. 2DP/2.1.1.1.0/14/APIA/VIAA/004, 2014.–2015.g

### **Ziņojumi konferencēs**

1. 14th International Conference on Chemical and Process Engineering, **2019**, May 26–29, Bologna, Italy, 2 presentations: Barmina, I., Kolmičkovs, A., Valdmanis, R., Zake, M., Kalis, H., Strautins, U., “*Effects of Straw and Biogas Co-firing on the Combustion Characteristics*” (poster presentation) and Barmina, I., Kolmičkovs, A., Valdmanis, R., Zake, M., Kalis, H., Marinaki, M. “*Experimental Study and Mathematical Modelling of Straw Co-Firing with Propane*”
2. 21st Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction, **2018**, August 25–29, Prague, Czech Republic, 2 presentations: 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*” (oral presentation) and 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*”
3. The 8th International Scientific Colloquium Modelling for Materials Processings, **2017**, September 21–22, Riga, Latvia, Barmina, I., Kolmičkovs, A., Valdmanis, R., Vostrikovs, S., Zaķe, M. “*Combustion Dynamics of Biomass Mixtures with Microwave Pre-Processing of Pellets*”
4. The 14th International Conference “Engineering for rural development”, **2015**, May 20–22, Jelgava, Latvia, I. Barmina, A. Kolmickovs, R. Valdmanis, S. Vostrikovs, M. Zake, „*Electric field control of biomass gasification*”
5. Riga Technical University 56th International Scientific Conference, **2015**, October 14–16, Riga, Latvia, Section “Heat Energetics and Heat Physics”, M. Zaķe, I. Barmina, R. Valdmanis, A.Kolmičkovs, S. Vostrikovs, “*Electric field impact on biomass pyrolysis*”

# 1. SILTUMA RAŽOŠANAS PROCESU TEORIJAS UN ESOŠO EKSPERIMENTĀLO PĒTĪJUMU IZVĒRTĒJUMS

Promocijas darba ietvaros literatūras apskatā ir paveikta salmu, koksnes un kūdras tipa biomasas un to komponentu elementārā un ķīmiskā sastāva detalizētā un statistiskā analīze, kas nosaka būtiskas atšķirības termiskās sadalīšanas un gaistošo vielu veidošanās kinētikā. Ievērojot dažāda tipa biomasas gaistošo vielu sastāvu un veidošanas ātrumus, tika analizēta liesmas frontes struktūra un veidošanas dinamika, ievērojot dažādu termo-ķīmiskās konversijas reakciju mehānismus. Tā kā eksperimentālajā iekārtā tika pielietots īpašs virpuļplūsmas režīms, tiek aprakstīta virpuļviesuļa veidošanās nosacījumi, tās struktūra un dinamika. Lai lasītājam veidotu priekšstatu par liesmas elektrisko dabu, tiek sniegta informācija par liesmas jonizācijas galvenajiem procesiem un reakcijām kopā ar jonu veidošanās ātrumiem un koncentrācijām. Literatūras apskata noslēgumā ir izklāstīts elektriskā lauka un liesmas mijiedarbības mehānisms un matemātiskā analīze, lai iegūtu izpratni par procesiem, kas nosaka degšanas un siltuma ražošanas procesu efektivitāti un šo procesu kontroles iespējas elektriskajā laukā.

## 1.1. Granulētās augu biomasas degšanas process

Granulētās augu valsts izcelsmes cietā kurināmā degšanas process ir sarežģītāks, salīdzinot to ar gāzveida vai šķidrā kurināmā degšanas procesu, jo biomasas degšana ietver savstarpēji saistītus procesus: biomasas sasildīšanu, žāvēšanu, galveno komponentu (hemicelulozes, celulozes, lignīna) termisko sadalīšanos, gaistošo vielu veidošanos, to uzliesmošanu un termo-ķīmiskās pārveidošanās, kā arī cietās fāzes pārvērtības ar divu fāžu reakcijām uz pārņemotās biomasas virsmas [7], [29]–[34].

Darbā galvenokārt tika analizēta elektriskā lauka ietekme uz granulētu kviešu salmu biomasas gazifikācijas produktu uzliesmošanu un degšanu, salīdzinot ar elektriskā lauka iedarbības efektu uz koksnes un kūdras biomasas degšanas procesiem. Lai prognozētu šo procesu attīstību, nepieciešama detalizēta biomasas elementārā un ķīmiskā sastāva analīze, izvērtējot tās ietekmi uz termiskās sadalīšanās procesu un gazifikācijas gāzes sastāvu.

### 1.1.1. Ligno-celulozes biomasas elementārā sastāva īpašības

Dažādas izcelsmes biomasas degšanas procesa veidošanos, kā arī degšanas produktu sastāvu nosaka to elementārais un ķīmiskais sastāvs, kas būtiski atšķiras no cietā fosilā kurināmā elementārā un ķīmiskā sastāva, līdz ar to izmainot degšanas procesa veidošanos.

Pirmkārt, augu valsts izcelsmes biomasas elementārā sastāvā ir daudz kopējā skābekļa (1. tab.), kurš ietilpst organisko savienojumu hidroksīl, karbonīl un karboksīl grupās. No tā ir secināms, ka biomasas degšanas procesiem ir nepieciešams mazāk skābekļa, salīdzinot ar fosilo kurināmo degšanas procesiem. Otrkārt, biomasas sastāvā ir mazāk sēra un sēra saturošo savienojumu ( $w_S \gg 0,3\%$ ) [35], kas uzlabo dūmgāzu sastāvu attiecībā pret kaitīgām emisijām.

Tomēr ir jāatzīmē, ka dažāda tipa lauksaimniecības augu izcelsmes biomasai, piemēram, salmu, augu lapu vai čaulu biomasai, ir palielināts slāpekļa (līdz  $\approx 3\%$ ) un pelnu saturs (no  $5\%$  kviešu salmiem līdz  $20\%$  rīsu miziņām) [9], [35]–[37], kas var izraisīt negatīvu ietekmi uz degšanas produktu sastāvu.

Eksperimentālajā darbā tika lietota dažāda veida augu valsts izcelsmes biomasas: kviešu salmu, skujkoku un augstā purva kūdra, kuru elementārā un ķīmiskais sastāva dati no dažādiem literatūras avotiem ir apkopoti 1.–2. tabulās, veicot sastāva statistikas analīzi (dati tika ņemti pēc iespējas līdzīgiem eksperimentālajiem paraugiem, gan pēc to izcelsmes, gan arī pēc īpašībām).

1. tabula

**Biomassas vidējais elementārais sastāvs un siltuma īpašības**

Biomasa	C, %	H, %	N, %	O, %	Ash, %	H <sub>2</sub> O, %	HHV, MJ·kg <sup>-1</sup>	Atsauce
Salmi <sup>1</sup>	37–47	5–7	0,3–2	38–42	5–9	4–18	17–18,5	[38]–[43]
Koksne <sup>2</sup>	48–52	5–7	0,1–0,5	42–46	0,1–1	6–15	19–20,5	[9], [44]–[46]
Kūdra <sup>3</sup>	44–60	5,5–6,5	0,5–3,0	30–42	1–5	13–30	21–23	[47]–[49]

1 – kviešu salmi (*wheat straw*); 2 – skujkoku koksne (*softwood*); 3 – purva kūdra (*raised bog peat*).

Pēc 1. tabulas datiem secināms, ka kopējā oglekļa saturs augu valsts biomasai palielinās atkarībā no tās vecuma un augšanas tempa [29], [30]. Jo, piemēram, koku augšanas ātrums ir daudz mazāks, salīdzinot ar zāles biomasu, tāpēc koksnes biomasas vecums parasti ir stipri lielāks un oglekļa saturs tajā (pārsvarā, koksnes kodolā) arī ir lielāks [9], [30], kas nosaka koksnes siltuma ražošanas īpašību uzlabošanas degšanas procesā. Kūdras biomasai oglekļa saturs mainās atkarībā no kūdras sadalīšanas pakāpes, kura savukārt ir atkarīga no vairākiem parametriem: uzglabāšanas temperatūras un laika, parauga paņemšanas dziļuma un vides mitruma. Jo dziļāka un vecāka ir kūdra, jo vairāk tā ir degradējusi, jo vairāk būs tās kopējā oglekļa saturs [50].

Intensīvās augšanas dēļ, lauksaimniecības biomasai (piem., kviešiem) ir nepieciešams liels daudzums dažādu minerāļu, kas uzkrājas cietajās auga daļās, palielinot salmu biomasas kurināmā pelnu saturu (1. tab.). Lauksaimniecības augu biomasai piemīt būtiskās atšķirības pelnu sastāvā, jo lauksaimniecības biomasu kultivē, lai uzlabotu tās barības īpašības, līdz ar to piebaro augus ar minerālmēslojumiem. Kviešu salmu biomasas pelnos ir sastopams palielināts K<sub>2</sub>O, CaO un SiO<sub>2</sub> minerālvielu saturs [9], [38], kurš ietekmē pelnu termisko pārvērtības procesu, veidojot jaunus cietās fāzes savienojumus [36]. Minerālmēslojumu pielietojums lauksaimniecībā ir iemesls arī palielinātam kopējā hlora saturam biomasā (līdz pat  $2\%$ ) [39], kurš izraisa HCl un KCl (lidojošo pelnu) emisiju veidošanos kviešu salmu degšanas procesā [43], [51]. Palielinātā kopējā slāpekļa saturs lauksaimniecības biomasai ir saistīts ar nitrātu minerālmēslojumu izmantošanu, turklāt slāpekļis lauksaimniecības biomasā ir sastopams arī dažādu amīnu (aminoskābes, olbaltumvielas) savienojumu veidā [52].

Kūdras biomasai pelnu saturs ir atkarīgs gan no augsnes sugu daudzveidības purvā, gan no difūzijas procesiem, kuri notiek grunts ūdens kustības dēļ. Piemērām, mitrā meža kūdrai pelnu saturs var sasniegt līdz 40–50 %, kaut gan purva kūdrai pelnu saturs ir daudz mazāks. Pelnu saturs purva kūdras sastāvā palielinās ar uzglabāšanas laiku, tomēr nav atkarīgs no paraugu ņemšanas dziļuma [48].

### 1.1.2. Biomasas ķīmiskais sastāvs un to atsevišķu komponentu īpatnības

Elementārais sastāvs viena tipa biomasai var atšķirties atkarībā no dažādiem apstākļiem, kas var būtiski ietekmēt biomasas termoķīmiskās pārvērtības. Tāpēc biomasas termoķīmisko pārvērtību salīdzināšanai ir svarīgi izvērtēt tās izcelsmes sākuma nosacījumus. Savukārt jebkuras augu valsts (lignocelulozes) biomasas ķīmiskā sastāvā ir trīs galvenās komponentes: celuloze, hemiceluloze un lignīns. Šo komponentu sadalījums un ķīmiskā struktūra nosaka biomasas termiskās sadalīšanas ātrumu [53], [54], gaistošo vielu daudzumu [55], kā arī līdzsvaru starp endotermiskajiem un eksotermiskajiem efektiem biomasas termo-ķīmiskā sadalīšanas procesā [56]. Līdz ar to, veicot komponentu dažādu īpašību ietekmes analīzi uz termiskās sadalīšanas procesiem, nepieciešams pārskatīt ligno-celulozes biomasas komponentu struktūras īpatnības un atšķirības.

Augu šūnu sienas struktūra atgādina stiegrotu dzelzsbetonu, kur celuloze darbojas kā dzelzs stieņi, bet hemiceluloze, kā apvākojošs cements. Šūnas sastāv no makro-audumiem, kuri savukārt sastāv no celulozes ar hemicelulozes uzslāņošanās, kur hemicelulozes relatīvais daudzums pieaug virzienā līdz šūnu apvalkam. Savukārt lignīns gandrīz pilnībā aizņem pārējo telpu un salīmē kopā atsevišķas šūnas [29], [30].

Celuloze (4. att.) ir galvenā augu šūnu sastāvdaļa, tāpēc tās saturs dažādiem augiem un augu daļām svārstās aptuveni no 30 % līdz pat 90 % (kokvilnā). Pateicoties labi sakārtotai kristāliskai struktūrai, tā ir izturīga pret ķīmiskām iedarbībām. Celulozes *n*-elementārā daļa ir ogļhidrāts – D-glikoze (*n* ir vairāk par 10 000), kurai stehiometriskā formula ir  $(C_6H_{10}O_5)_n$ . D-glikozes polimērveidīgā sakārtotā struktūra piešķir augiem arī lielo mehānisko izturību. Vairāk par celulozes struktūru var lasīt *P. Basu* un *M. Ochoa-Villarreal et. al.* [30], [57] darbos.

Hemicelulozes  $(C_5H_8O_4)_n$  ir amorfu vielu grupa ar nesakārtotu sazarotu struktūru un vāju estera saites stiprumu (3. pielik. 2. att.). Hemiceluložu grupas molekulas arī ir polimērveidīgas molekulas, bet ar mazu polimerizācijas pakāpi ( $\approx 100$ – $200$ ) [30], tāpēc tām, atšķirībā no celulozes, ir tieksme vieglāk sadalīties ķīmiskās vai termiskās mijiedarbības rezultātā. Hemicelulozes sastāvā var ietilpt dažādi ogļhidrāti, piemērām ksiloze, mannoze, glikoze, arabinoze, galaktoze, acetil grupas un citi [30], [57]–[59]. 3. pielik. 2. attēlā (A) ir redzams, ka kviešu salmiem hemicelulozes pamata struktūru veido gluko-urono-arabinoksilāns (*Glu-Uro-Ara-Xyl*) jeb arabino-gluko-urono-ksilāns (*Ara-Glu-Uro-Xyl*), kurš sastāv līdz 73 % no ksilāna, 13 % arabināna, līdz 15 % glikozes, vai 8 % galktozes un 3,5 % glikozes maisījuma [60], [61]. Skujkoku koksnei, savukārt, hemicelulozes struktūru veido galakto-gluko-mannāns (3. pielik. 2. att. – B, *Gal-Glu-Man*), kuram ir 55–65 %

mannozes, 17–23 % glukozes un 8–15 % galaktozes [60], [62]. Hemicelulozes sastāda vidēji no 15 % līdz 30 % no augu sausā masas [30], [62]–[64].

Lignīns ir sarežģīts stipri sazarots trīsdimensionāls polimērs, kurš sastāv no p-hidroksifenil (3. pielik. 3. att. – A), gvjacil (3. pielik. 3. att. – B) un siringil daļām (3. pielik. 3. att. – C) [15], [65]–[67]. Dominējoša funkcionālā daļa lignīna monomēros ir benzola gredzens, tomēr atsevišķu sastāvdaļu daudzums dažāda veida lignīniem var atšķirties. Kviešu salmu lignīns satur visas trīs nosauktās sastāvdaļas līdzīgās daļās (attiecībā vidēji 100 / 80 / 60) [68], tomēr skujkoku koksnes lignīns sastāv vairāk no gvjacila un siringila [67]. Lignīna struktūra un tās ietekme uz dažādām īpašībām vēl tiek pētīta, tomēr ir zināms, ka, pateicoties savai sazarotai struktūrai, lignīns ir stipri termiski un ķīmiski izturīgs (nav šķīstošs pat sērskābē). Tipiskā skujkoku koksne satur 20–25 % lignīna, lapkoku koksne satur 18–25 % lignīna, bet zāle līdz 15 % no sausā masas [30], [67], [68].

Galveno ķīmisko komponentu relatīvā attiecība var mainīties dažādiem augiem vai arī augu daļām, piemēram kviešu salmu hemicelulozes daudzums ir vidēji par 10 % lielāks, salīdzinot ar rapšu salmiem [69]–[71]. Kviešiem celulozes daudzums stumbrā ir vidēji par 5–7 % lielāks, salīdzinot ar parējām augu daļām. Lignīns visvairāk ir atrodams augu lapās, savukārt hemicelulozes daudzuma sadalījums augu sastāvdaļās stipri neizmainās [72].

Ķīmiskā sastāva izmaiņas dažādās biomasās palīdz pamatot arī elementāra sastāva daudzveidību. Piemēram, palielināto kopējā oglekļa saturu skujkoksnes biomasā, salīdzinot ar oglekļa saturu kviešu salmu biomasā (1. tab.), nosaka lielāks celulozes un lignīna daudzums koksnē (2. tab.). Celulozei palielināto oglekļa saturu nosaka augstāka polimerizācijas pakāpe, bet lignīnam – aromātisko savienojumu klātbūtne [66]–[68]. Lielāks lignīna saturs koksnes biomasā palielina arī tās blīvumu un mehānisko izturību, kas ietekmē termiskās sadalīšanas ātrumu un siltuma ražošanas vienmērīgumu degšanas kamerā. Respektīvi, zinot ķīmisko sastāvu un blīvumu biomasai, ir iespējams izvērtēt arī gaistošo vielu tuvināto daudzumu, biomasas sadalīšanas ātrumu un pat degšanas kopējo laiku. Analīze par tās ķīmiskā sastāva nozīmi gaistošo vielu veidošanā tiks veikta nākamajā apakšnodaļā. Turpmāk ir nepieciešams definēt arī kūdras biomasas struktūras īpatnības, jo tā būtiski atšķiras no pārējo darbā apskatītās augu valsts izcelsmes biomasu struktūras un ir vērtējama kā starpposms pārejai no biomasas uz fosilo kurināmo.

2. tabula

### Biomasas vidējais ķīmiskais sastāvs (pēc sausās masas)

Biomasa	Celuloze, %	Hemiceluloze, %	Lignīns, %	Citi šķīstošie, %	Atsauce
Salmi	33 – 41	24 – 31	16 – 20	3 – 6	[39], [40], [42], [59], [73], [74]
Koksne	43 – 55	15 – 25	27 – 30	2 – 6	[62], [64], [75]–[77]
Kūdra	2 – 7	13 – 22*	7 – 12	24 – 36**	[37], [47]–[49], [55]

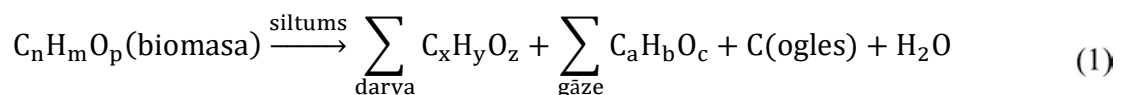
\* – daļēji sadalītā veida ogļhidrāti; \*\* – humīnskābes, fulvoskābes un citas šķīstošās vielas.



No 2. tabulas datiem izriet ka, kūdras ķīmisko komponentu daudzums un to relatīvās attiecības ir stipri mainīgas un nav viennozīmīgi saistītas ar elementārā sastāva atšķirībām dažādas izcelsmes biomasām. Kaut gan stipri acetilētās hemicelulozes daudzums kūdras sastāvā ir pietiekoši augsts (2. tab.), tās polimerizācijas pakāpe biodegradācijas procesā stipri samazinās, tāpēc samazinās arī kūdras kopējais skābekļa saturs (1. tab.). Tāpat – celulozes un lignīna samazinātais saturs neatbilst kopēja oglekļa palielinātam daudzumam. Savukārt, kūdrā ir novērojams palielināts citu šķīstošo komponentu daudzums, galvenokārt humīnskābes un fulvoskābes, kuru veidošanās ir saistīta ar celulozes un lignīna biodegradācijas procesiem un kuru mehānisms pašlaik nav pilnībā izpētīts [48], [50]. Aplūkojot humīnskābes un fulvoskābes hipotētiskās struktūras (3. pielik. 4. att.), paliek skaidrāks, kā palielināts kopējā oglekļa saturs kūdrā ir saistīts ar struktūras dehidratāciju un vairāku poli-aromātisko struktūru veidošanos humīnskābēm (A). Humīnskābes struktūrā var arī redzēt krietni samazināto skābekļa atomu skaitu attiecībā pret kopējo oglekļa atomu skaitu, kas samazina kopējā skābekļa saturu kūdras elementārajā sastāvā. Pat stipri oksidētās fulvoskābes struktūrā (B) var noverot, kā relatīvais skābekļa atomu skaits tomēr ir mazāks (18 pret 27), salīdzinot to, piemēram, ar celulozi (5 pret 5).

### 1.1.3. Komponentu oksidatīvā termiskā sadalīšanās

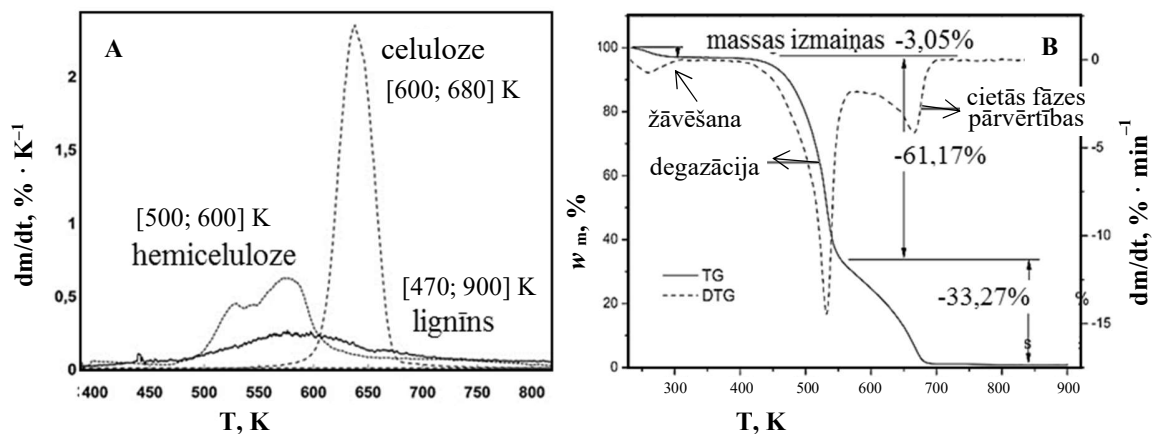
Biomassas termiskās sadalīšanās procesu (pirolīzi jeb gazifikāciju) var raksturot kā endotermisko un eksotermisko procesu kopumu, kuru ierosināšanai ir nepieciešama papildus siltuma padeve biomasā. Turklāt biomassas termiskās sadalīšanos nevar aprakstīt ar vienu empīrisko ķīmisko formulu (1. reakc.), jo biomassas komponentu termiskās sadalīšanas mehānismi joprojām tiek papildināti, nav precīzi noteikti [29], [67], [78], [79], un ir atkarīgi no vairākiem faktoriem (karsēšanas temperatūras un ātruma, reakcijas centru veidošanās un reakcijas kinētikas):



Biomassas termiskās sadalīšanās process oksidatīvā vidē parasti sastāv no trīs atsevišķiem posmiem: biomassas karsēšanas un žāvēšanas ( $\Delta w = 3\text{--}11\%$ ), degzācījas jeb gaistošo vielu veidošanās ( $\Delta w = 60\text{--}80\%$ ) un pārrogļotās cietās fāzes konversijas ( $\Delta w = 14\text{--}33\%$ ) (1. att. – B) [14], [34], [54]. Biomassas karsēšana un žāvēšana ir fizikāls process, un, pat ievērojot, ka dati par siltuma vadības un ietilpības koeficientiem dažādām biomasām un kurināmā formēšanas veidiem (granulas, briketes) var mainīties, šim procesam rezultātu var tuvināti izrēķināt. Savukārt degzācījas un pārrogļotās cietās fāzes konversijas procesi dažādām biomasas veidiem ir stipri atšķirīgi, ko būtiski ietekmē elementārā un ķīmiskā sastāva atšķirības. Dotā brīdī ir jau izveidoti biomassas termiskās sadalīšanas simulācijas modeļi [80]–[82], tomēr šo modeļu precizitātes izvērtēšanai ir nepieciešami definētie sākuma parametri, kurus iegūst no eksperimentālo pētījumu rezultātiem, tāpēc tiek uzskatīts, ka termiskās sadalīšanas procesu cietam kurināmajam joprojām nav izdevies modelēt. Lai paskaidrotu kviešu salmu, skujkoku koksnes un kūdras termiskās sadalīšanas procesu īpatnības, ir nepieciešams aplūkot to atsevišķo sastāvdaļu sadalīšanās procesu.

Biomases termiskās sadalīšanas procesu dažādām ķīmiskām sastāvdaļām var izvērtēt, analizējot paraugu masas izmaiņas inertā vidē, jo oksidatīvā vidē sadalīšanas process paātrinās vairākās reizēs [14], [31] un atsevišķu sastāvdaļu sadalīšanas posmus jau ir grūtāk atdalīt (1. att. – B), vai nevar atdalīt vispār, cietās fāzes ķīmisko pārvērtību dēļ [83], [84].

Biomases galveno sastāvdaļu masas zudumu termogravimetriskie mērījumi ir apliecinājuši, ka hemicelulozes un lignīna termiskās sadalīšanās process sākas attiecīgi pie  $T \approx 500$  K [78], [79], [85] un  $T \approx 470$  K [13], [31], [67], un ir saistīts ar termiski mazāk stabilo grupu atšķelšanos [78], [86], [87]. Savukārt celulozes aktīvā termiskā sadalīšanās, stipri sakārtotas struktūras dēļ, notiek pie  $T \approx 600$ – $680$  K [88]–[90] (1. att. – A). Inertajā vidē hemicelulozes un celulozes termiskā sadalīšanās notiek relatīvi šaurā temperatūru diapazonā, savukārt lignīna termiskās sadalīšanās temperatūru robežas ir ļoti platas ( $T \approx 470$ – $900$  K), bet pats process notiek maz intensīvi (1. att. – A) [89], kas ir pamatojams ar lignīna stipri sazaroto aromātisko struktūru (3. pielik. 3. att.), kurai piemīt stipras saites un labas termiskās enerģijas izkliedes īpašības [66]–[68].



1. att. Biomases TG/DTG dati inertajā (A) un oksidatīvā vidē (B) [14], [89].

Oksidatīvā atmosfērā hemicelulozes un celulozes termiskās sadalīšanas temperatūras robežas sašaurinās (primārais posms hemicelulozēm no  $T \approx 500$ – $610$  K uz  $T \approx 500$ – $570$  K un procesa ātrums stipri palielinās [14], [54], [78] (1. att. – B). Kaut gan 60 % no celulozes masas sadalīšanas procesā ātri pāriet gāzveida fāzē, līdz 35 % – paliek cietā pārģotā fāzē, un gaisa atmosfērā notiek lēna ogles gruzdēšana (1., 3. tab.,  $K_{reakc}$ ) [90]. Kviešu salmu hemicelulozei skābekļa klātbūtnē arī veidojās sekundārais sadalīšanas posms pie  $T \approx 690$ – $740$  K [78], kurš var pārklāties ar lignīna aromātisko gredzenu sadalīšanas posmu [54], jo salmu hemicelulozes struktūrā ir novērojams arī neliels aromātisko funkcionālo grupu skaits (3. pielik. 2. att. – A).

Temperatūru robežās (3. tab.), kurās notiek komponentu termiskā sadalīšanās, to aktivācijas enerģija ( $E_A$ ) un ātruma konstantes ( $K_{reakc}$ ) var mainīties atkarībā no oksidētāja daudzuma (2. att. – B) [34], [78], [88], kā arī no biomasas daļiņu izmēra [33]. Aktivācijas enerģija ir faktiskā barjera, kuru jāpārsniedz, lai uzsāktu termisko sadalīšanos, un šis salīdzinājums ļoti labi raksturo dažāda veida biomasas termiskās sadalīšanas kinētikas īpatnības. Ir noteikts, ka biomasas

sastāvdaļu savstarpējās mijiedarbības dēļ, termiskās sadalīšanas aktivācijas enerģija ir augstāka, salīdzinot ar to atsevišķo sastāvdaļu aktivācijas enerģijām [90]. Šķiedru struktūra veido kompozītmateriālu, kuram piemīt sevišķās īpašības, turklāt arī paaugstināta pretestība pret sadalīšanos. *Mamleev et al.* novēroja, ka aktivācijas enerģija samazinās un tuvinās atsevišķu komponentu aktivācijas enerģijas lielumam, ja komponentes termiskās sadalīšanas process jau notiek, tomēr pie procesa uzsākšanas, tā var stipri atšķirties. Dažādas izcelsmes biomasām galveno sastāvdaļu daudzums un struktūra mainās (2. tab.), līdz ar to mainās arī to aktivācijas enerģija. Tāpēc noteiktās izcelsmes un sastāva biomasas termiskā sadalīšanas procesa paredzēšana bez eksperimentālajiem kinētikas parametriem ir praktiski neiespējama un stipri neprecīza [80]–[82].

3. tabula

**Biomasas sastāvdaļu termiskās sadalīšanas kinētiskie dati**

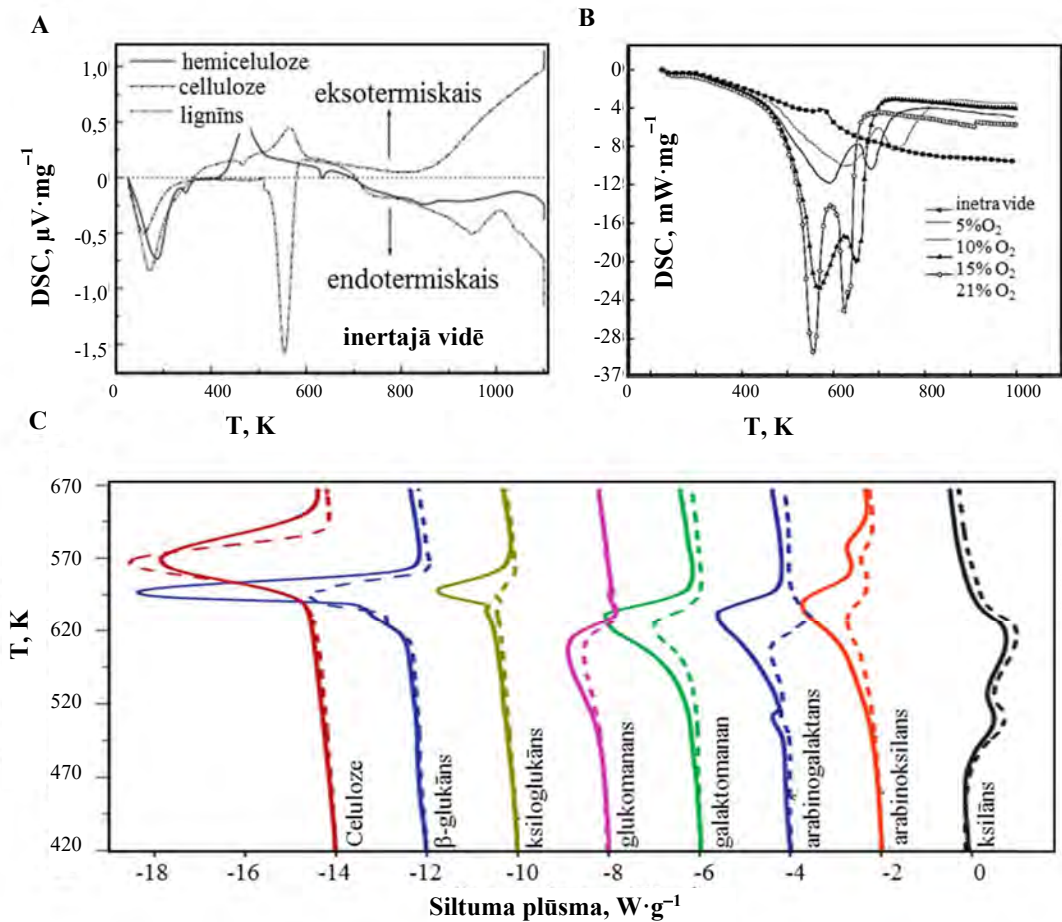
Sastāvdaļas	Kinētiskās konstantes			Atsauce
	$K_{reakc}, \text{min}^{-1}$	$E_A, \text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$	$T, \text{K}$	
Celuloze	$a \approx x \cdot 10^{14-18}$ $b \approx x \cdot 10^{8-12}$	175 – 240 $\approx$ 200 130 – 180	$\approx$ 570 – 630 $\approx$ 600 – 790	[30], [88], [90]–[94]
<i>Glu-Uro-Ara-Xyl</i> *	$\approx x \cdot 10^{4-5}$ $\approx (1,5-2,5) \cdot 10^{15}$	50 – 95 180-210	$\approx$ 470 – 620 $\approx$ 670 – 740	[78], [88], [91]
<i>Gal-Glu-Man</i> *	$\approx x \cdot 10^{3-4}$	$\approx$ 50 – 112	$\approx$ 490 – 610	[79], [95]
Lignīns	$\approx (3-6) \cdot 10^4$ $\approx x \cdot 10^{20-25}$	$\approx$ 30 – 100 174 – 360	$\approx$ 470 – 570 570 – 850	[67], [84], [88], [91], [96]

\* – kviešu salmu un skujkoku koksnes hemicelulozes; <sup>a, b</sup> – primārais un sekundārais sadalīšanas posmi.

Dažādu biomasas komponentu termiskās sadalīšanās procesā veidojas endotermiskie ( $\Delta H > 0$ ) vai eksotermiskie ( $\Delta H < 0$ ) siltuma efekti. Šādu efektu siltuma bilances izmaiņas dēļ, kopējā procesa uzturēšanai dažādām biomasām ir nepieciešams mainīt termiskās sadalīšanās ierosināšanai nepieciešamo siltuma daudzumu. Visām biomasas komponentēm primārais siltuma efekts ir endotermisks, jo notiek ūdens iztvaikošanas, kas patērē daudz enerģijas (2. att. – A, līdz  $T \approx 373 \text{ K}$ ) [56].

Sekundārais kviešu salmu sadalīšanās siltuma efekts, kas veidojas pie  $T \approx 500-570-620 \text{ K}$  un ir saistīts ar hemicelulozes ksilāna termisko sadalīšanos, ir eksotermisks (2. att. – A) [56], tomēr turpmāko hemicelulozes sadalīšanas procesu var ietekmēt citu hemicelulozes sastāvdaļu endotermiskā sadalīšanās (2. att. – C) [78], [79]. Aromātisko struktūru klātbūtnes dēļ (3. pielik. 2. att. – A) pie augstākām temperatūrām endotermiskais efekts ir novērojams arī kviešu salmu hemicelulozes cietās fāzes konversijā. Aromātiskā molekulas daļa, tāpat kā lignīnam, ir vairāk stabila, tāpēc tās pārvērtības notiek tikai pēc 620 K, kad vērojama *Glu-Uro-Ara-Xyl* karbonizācija. Skujkoku hemicelulozes (*Gal-Glu-Man*) var gandrīz pilnīgi un vienmērīgi (3. tab.) pāriet gaistošo vielu fāzē [54], [79], savukārt siltuma efekts visā sadalīšanas procesā ir negatīvs ( $\Delta H > 0$ ) (2–C att.). Turpretī celuloze degazācijas posmā ( $T \approx 600-670 \text{ K}$ ) patērē ļoti daudz enerģijas (2. att. –

A, C), un sadalīšanas process tai notiek ļoti strauji (3. tab.,  $K_{reakc}$ ), tā kā šajā biomasas sadalīšanas temperatūru apgabalā inertajā vidē kopējais siltuma efekts jebkurā gadījumā būs negatīvs ( $\Delta H > 0$ ). Tomēr oksidatīvā vidē gaistošo vielu un pāroģlotās cietas fāzes oksidēšanas rezultātā izdalās liels siltuma daudzums (līdz  $\Delta H = -33 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) [56]. Šādi primārā sadalīšanas posma siltuma bilancē ienāk arī oksidēšanas reakciju eksotermiskie efekti (2. att. – B), kuri palīdz līdzsvarot un pārvarēt holocelulozes (celulozes un hemicelulozes ogļhidrātu) sadalīšanas procesa endotermisko efektu.



2. att. Biomasas un sastāvdaļu kalorimetriskie grafiki [14], [34], [56], [79].

Lignīna degazācijas eksotermisko sadalīšanas posmu, kas vērojams temperatūru intervālā no 470 K līdz 670 K, nosaka metoksi funkcionālo grupu atšķelšanās [13], [67], [87], bet tālāko, endotermisko – aromātisko struktūru pakāpeniskās sadalīšanās (2. att. – A) [56], inertajā vidē nedaudz samazinot biomasas kopējas termiskās sadalīšanās otrā posma siltuma efektu, kas otrā posmā ir novērojams arī pie nosacījuma, ja biomasas termiskās sadalīšanās notiek oksidatīvā vidē (2. att. – B) [88].

Kaut gan kūdras termiskās sadalīšanas procesi ir pētīti vairākos darbos, tiem nepievērš tik daudz uzmanības, kā augsnes izcelsmes biomasu termiskās sadalīšanās procesiem, nešķirojot savdabīgo komponentu termiskos sadalīšanās posmus un šo posmu siltuma efektus [97]. Daļēji tas

ir saistīts ar kūdras sarežģīto un grūti prognozējamo ķīmisko sastāvu, tomēr liela nozīme relatīvi mazai interesei par kūdras termiskās sadalīšanas posmiem un to siltuma efektu, ir vispasaules ierobežojumi kūdras izstrādei un izmantošanai enerģētikas tirgū, saistītie ar purvu un dabas aizsardzības vietējiem likumiem [47]. Tomēr var prognozēt, ka kūdras daļēji sadalīto ogļhidrātu sadalīšanas process pēc kinētikas atgādinās hemicelulozes sadalīšanās procesu, turklāt heterociklisko aromātisko savienojumu kopas (humīnskābes un fulvoskābes) sadalīšanas process līdzināsies lignīna sadalīšanas procesam [31].

#### 1.1.4. Gaistošo vielu un cietās pārrogļotās fāzes veidošanās un tās daudzums

Augu valsts izcelsmes biomasas komponentu termokīmiskās sadalīšanās rezultātā veidojās gaistošas vielas un cietā karbonizētā (pārrogļotā) masa. Gazifikācijas produktos, atkarībā no dažādiem apstākļiem, t.s. – temperatūra, gaisa pārsvars un citi, veidojās daudz dažādu ķīmisko vielu. Viena ķīmisko savienojumu grupa veicina un attīsta degšanas procesu ( $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_6$ ) [56], [89], cita – piesārņo vidi, kaitē aparatūrai un dabai ( $CO$ , skābes, aldehīdi, fenoli, furāni un citi) [13], [15], [98], [99]. Biomasas gazifikācijas parasti notiek vidē pie ierobežotas gaisa padeves – pie  $\alpha \approx 0,3-0,6$ . Šādos apstākļos biomasas termiskās sadalīšanās procesā izdalās ļoti daudz videi un veselībai nedraudzīgo vielu [15], [99], tomēr, intensificējot procesu (2. att. – B), var panākt tīrākas gāzes ražošanu [33], [78], [80], [100], ar lielāku sadegšanas siltumu un efektivitāti [53], [101]. Lai reducētu kaitīgo vielu veidošanos izplūdes gāzēs, un palielināt degošo vielu veidošanos, nepieciešams pārzināt šādu vielu termokīmiskās konversijas mehānismus un reakciju apstākļus.

Izmantojot termogravimetrijas datus, pēc divu dažādu masas izmaiņas maksimumu vērtībām var tuvināti spriest par gaistošo vielu un saistītā oglekļa daudzumu biomasā [88], tomēr precīzāk gaistošo vielu daudzumu var noteikt pēc apvienotās termogravimetrijas un infrasarkanās spektroskopijas metodes, vai pēc apvienotās masspektrometrijas un hromatogrāfijas metodes [14]. Gaistošas vielas pārsvarā veidojās biomasas komponentu primārā termiskās sadalīšanas posmā [56], savukārt sekundārā posmā oksidējās cietā pārrogļota fāze (1. att.) [67], [78], [90]. Sekundārā sadalīšanas posma analīze dod priekšstatu par saistītā oglekļa daudzumu biomasā, jo, vadoties pēc cietās pārrogļotās fāzes elementārās analīzes datiem [102], tā līdz 95 % pēc masas sastāv no oglekļa atomiem.

Dažādu biomasas un to atsevišķu komponentu gaistošo vielu un saistītā oglekļa satura statistika ir sniegta 4. tabulā. Gaistošo vielu daudzums nosaka liesmas veidošanas kinētiku un dinamiku, bet cietās pārrogļotās fāzes daudzums nodrošina siltuma enerģijas vienmērīgu izdalīšanos un procesa pašuzturēšanos ar uzlaboto gaistošo vielu konversiju un aizdegšanos. Pēc literatūras datiem var secināt, ka celulozei gaistošo vielu veidošanās daudzums stipri atkarīgs no karsēšanas intensitātes [90]. Turklāt pie optimāliem apstākļiem gaistošo vielu izdalīšanās daudzums var būt tik intensīvs [103], ka to aizdedzināšanai nepieciešama papildus siltuma padeve, kuru, ievērojot stipri endotermisko celulozes degazācijas procesu [56], cietā pārrogļotā fāze nodrošināt nevarēs un degšanas process būs nestabils.

Salmu hemicelulozei gaistošo vielu daudzums ir aptuveni par 10 % mazāks (4. tab.), salīdzinot to ar koksnes hemicelulozi, jo salmu hemicelulozes struktūrā ir atrodama aromātiskā funkcionālā grupa [60], kuras sadalīšanās, salīdzinājumā ar polisaharīdiem, notiek augstākās temperatūrās [15]. Šī iemesla dēļ salmu hemicelulozes sastāvā palielinās arī saistītā oglekļa daudzums. Savukārt skujkoku koksnes hemicelulozes saistītā oglekļa saturs ir zemāks, tāpēc koksnes hemicelulozei ir tieksme vieglāk un vienmērīgāk pāriet gāzveida fāzē [54], [79]. Gan salmu, gan koksnes hemicelulozes gaistošo vielu satura svārstības ir mazākas, salīdzinot to ar celulozes gaistošo vielu daudzuma izkliedi. To nosaka hemicelulozes palielināta tieksme pāriet gāzveida fāzē, pateicoties zemākai sadalīšanas procesa uzsākšanas temperatūrai un aktivācijas enerģijai (3. tab.).

4. tabula

**Biomasa un to sastāvdaļu gaistošo vielu un pārņērtās fāzes daudzums**

Sastāvdaļas / Biomasa	Gaistošās vielas w, %	Saistīts ogleklis w, %	Atsauce
Celuloze	37 – 93	6 – 20	[29], [90], [101], [103], [104]
<i>Glu-Uro-Ara-Xyl</i> *	70 – 76	3 – 22	[78], [79], [89]
<i>Gal-Glu-Man</i> *	80 – 85	5 – 15	[79], [103], [105]
Lignīns	43 – 76	23 – 57	[67], [89], [101], [103]
Kviešu salmi	67 – 76	7 – 19	[41]–[43], [74], [98]
Skujkoku koksne	69 – 76	11 – 24	[15], [54], [88], [106]
Kūdra	36 – 65	24 – 38	[47], [49], [55]

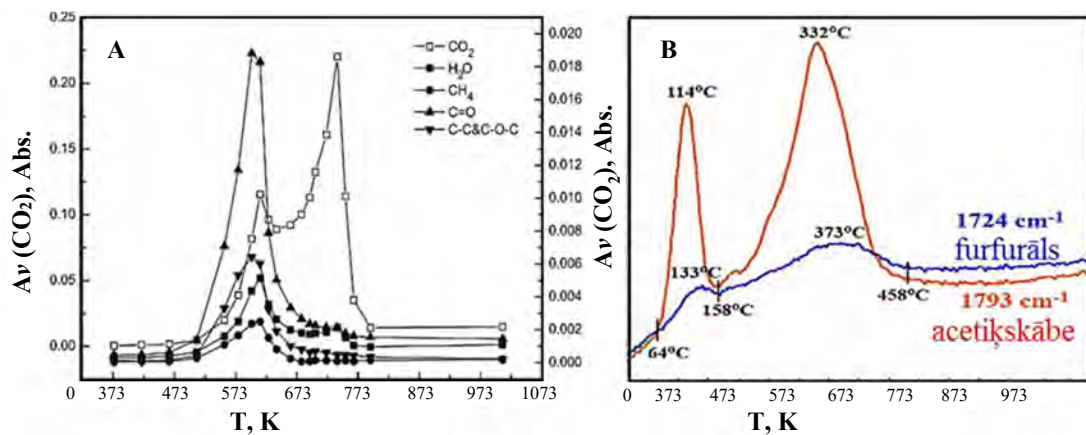
\* – kviešu salmu un skujkoku koksnes hemicelulozes.

Lignīnam gaistošo vielu saturs ir viszemākais, bet saistītā oglekļa daudzums - visaugstākais (4. tab.), kas ir secināms arī pēc tā ķīmiskās uzbūves, jo lignīns satur ļoti daudz aromātisko funkcionālo grupu, bet maz termiski mazāk stabilo grupu [66]–[68]. Tāpēc lignīna saturs biomasā spēlē svarīgāko lomu cietās pārņērtās masas konversijas posmā [15]. Skujkoku koksnes saistītā oglekļa palielināto saturu salīdzinājumā ar salmu biomasu var pamatot arī ar palielinātu lignīna saturu koksnes biomasā (2. tab.). Aromātiskās funkcionālās grupas daudzuma ietekmi uz saistītā oglekļa daudzumu novēro arī kūdrai, kurai ir visaugstākais oglekļa relatīvais skaits (3. pielik. 4. att.) un visaugstākais kopējā oglekļa daudzums pēc masas (1. tab.). Vienīgā atšķirība ir tā, ka kūdrai augstu saistītā oglekļa saturu nodrošina humīnskābe, nevis lignīns.

Kopsavilkumā var secināt, ka, jo gaistošo vielu daudzums ietekmē liesmas kinētikas un dinamikas veidošanās, koksnes liesmas veidošanās ātrums būs visstraujākais, tomēr liesmas garums stacionārajā stāvoklī pēc garuma var būt līdzīgs salmu biomasas liesmai. Savukārt kūdras biomasas liesmas garums būs visīsākais, tomēr, augstā saistītā oglekļa satura dēļ, kūdrai sagaidāms vislētākais termiskās sadalīšanās pilnais cikls ar vislielāko siltuma izdalīšanos.

### 1.1.5. Biomasas gazifikācijas procesa gāzveida vielu veidošanās kinētika un to daudzums

Literatūrā aprakstīts gaistošo vielu un saistītā oglekļa daudzums dažādām biomasām var būt līdzīgs, atsevišķu gāzveida vielu veidošanas kinētika var atšķirties dažāda ķīmiskā sastāva dēļ. Pētījumos par biomasas degšanas procesiem parasti nepievērš uzmanību gazifikācijas produktu sastāvam, balstoties tikai uz kopējo gaistošo vielu daudzumu. Bieži vien, pat pārrēķinot gaistošo vielu daudzumu pēc celulozes un hemicelulozes daudzuma, netiek ievērots, ka arī holoceluloze satur saistīto oglekli. Lai saprastu degošo gazifikācijas produktu gāzveida komponentu veidošanas kinētiku, turpmāk, apakšnodaļā ir apskatīts gaistošo vielu veidošanās mehānisms, dažādu biomasas sastāvdaļu termiskās sadalīšanās procesā.

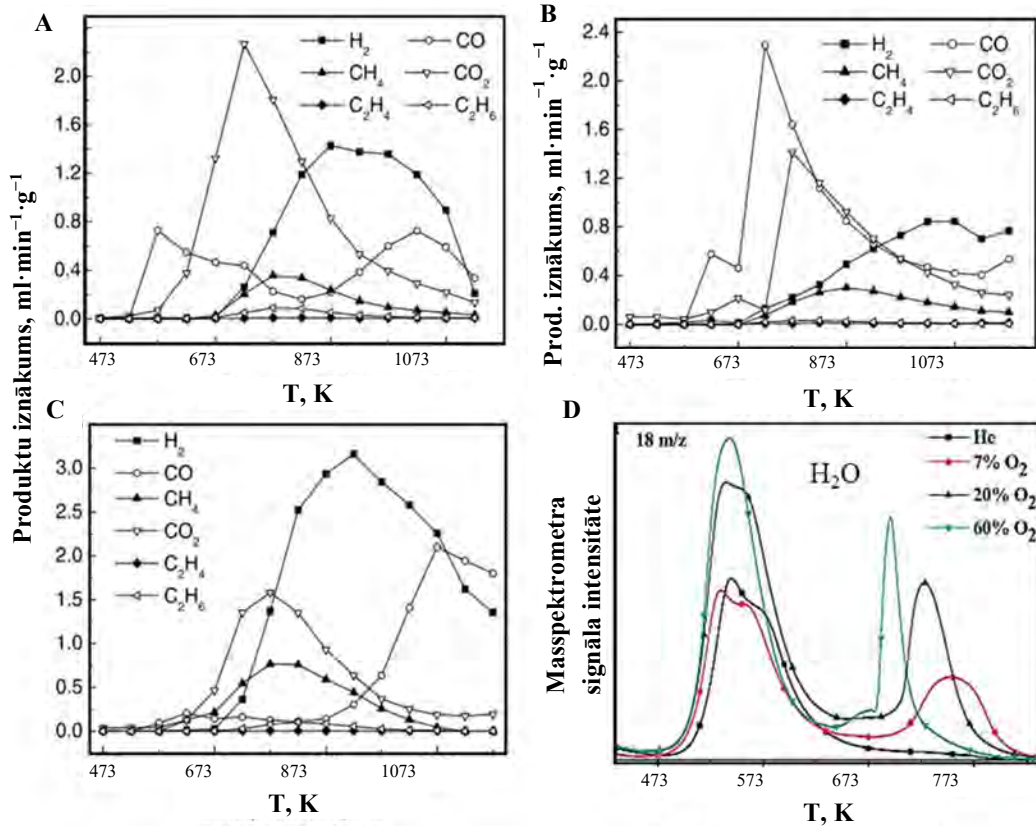


3. att. Koksnes biomasas degšanas procesa gaistošo vielu maisījuma sastāva izmaiņas atkarībā no temperatūras [13], [14].

Lignocelulozes biomasas termiskās sadalīšanās pirmais eksotermiskais maksimums (2. att. – A) ir saistīts ar intensīvo CO<sub>2</sub>, ūdens, (3. pielik. 1. att. – B, D), skābes un aldehīdu (3. att. – A, B) grupas savienojumu izdalīšanos. Primārais biomasas sadalīšanās posms bieži notiek kopā ar biomasas žāvēšanu, kad izdalās liels daudzums ūdens tvaika, kurš kopā ar skābajiem primārās biomasas sadalīšanās produktiem veido korozijas izraisošo kondensātu veidošanos uz katla metāla elementiem. Ir noteikts, ka skābeklis biomasas sadalīšanās procesā kalpo kā katalizators, tāpēc gazifikātorā ir nepieciešams nodrošināt vismaz 10 % skābekļa gaisa padevi, jeb  $\alpha$  līdz 0,5 (2. att. – B), kad skābie sadalīšanās produkti tiks pakļauti tālākām pārvērtībām. Hemicelulozes sadalīšanās procesā, kas sasniedz maksimālo intensitāti pie 540 K, notiek pakāpeniska CO (3. pielik. 1. att. – A) izdalīšanās, kas saistīta ar karbonil (C–O–C) grupu šķelšanos. Šajā posmā notiek ksilāna molekulu sašķelšanās un oligomēru ogļhidrātu veidošanās [15], [78]. Tālākās ksilāna pārvērtības (640–720 K) notiek ar acetil grupu dekarboksilēšanu, kas veicina garākas virknes hemiceluložu struktūras sadalīšanos, kuru rezultātā izplūdes gāzēs izdalās arī CO<sub>2</sub> [56], [79].

Celulozes sadalīšanās procesa endotermiskais minimums ir novērojams pie 620 K (2. att. – A) un ir attiecināms ar straujā un komplicētā depolimerizācijas procesa [15], [29] uzsākšanos, kura rezultātā veidojās “aktīvā celuloze” jeb levoglukosāns [107] un liels daudzums CO (4. att. – B)

[56]. Šim depolimerizācijas procesam biomasas termiskās sadalīšanas procesā ir vislielākā aktivācijas enerģija (pat līdz  $\approx 250 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ) (3. tab).



4. att. Biomasas sastāvdaļu – hemicelulozes (A, D), celulozes (B) un lignīna (C) termiskās sadalīšanas produktu sastāva izmaiņas atkarība no temperatūras [56], [78].

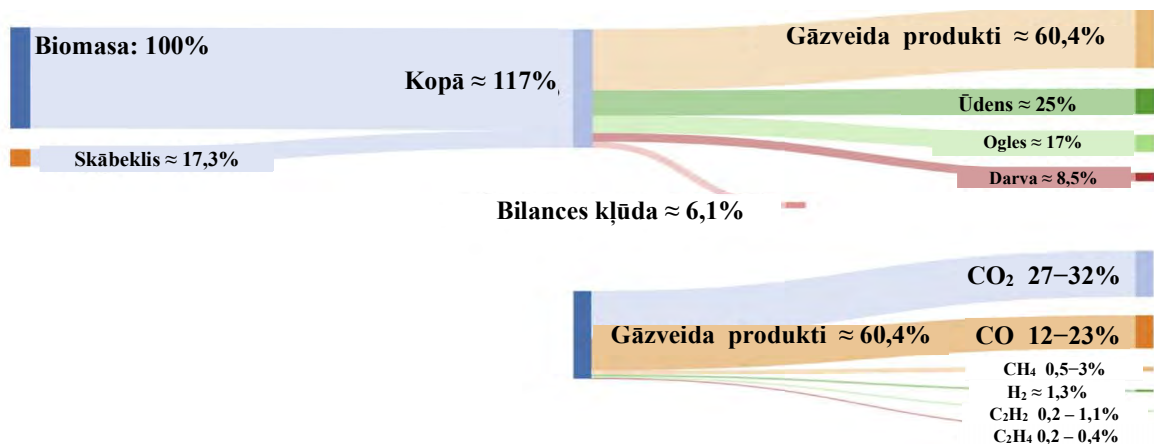
Sekundāro pārvērtību posms celulozei sākas pēc 650 K. Šis process ir izteikti endotermisks (2. att. – A) un ir saistīts ar  $\text{C}_2$ – $\text{C}_5$  virknes nepiesātināto un karbonilēto molekulu izdalīšanās [108], [109], kuras termiski sadaloties veido  $\text{CO}$ , acetaldehīdu, acetonu, furānu un citas vielas (4. att. – B) [15], [56]. Temperatūrās virs 650 K jau notiek straujā jauktā hemicelulozes un celulozes sadalīšanās, tomēr 4. attēlā var redzēt, ka biomasas gazifikācijā pie zemākām temperatūrām  $\text{CO}$  pārsvarā veidojās celulozes depolimerizācijas procesā, bet  $\text{CO}_2$  straujš pieaugums ir saistīts galvenokārt ar hemicelulozes dekarboksilēšanas procesu (4. att. – A, B). Pie augstākām temperatūrām vairāku polisaharīdu sadalīšanas notiek līdzīgi – ar levoglukosāna veidošanos, tāpēc hemiceluložu un celulozes sadalīšanas produkti būs līdzīgi pēc sava ķīmiskā rakstura [60], [104].

Vērtīgāko procesu – dehidrogenēšanas un krekinga procesu attīstīšanās notiek pie augstākām temperatūrām – virs 850 K. Šie procesi ir cieši saistīti ar ūdeņraža un metāna izdalīšanos (4. att. – A) [56]. Lignīna eksotermiskā sadalīšanās sakās pēc  $\approx 450 \text{ K}$  un sasniedz savu maksimumu pie 650–720 K (2. att. – A), kad vērojama ar  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  un  $\text{CH}_4$  izdalīšanās [13], [56] (4. att. – C). Lignīna molekulā ir daudz metoksi funkcionālo grupu (3. pielik. 3. att.), tāpēc pirmais eksotermiskais termiskās sadalīšanas posms notiek ar termiski nestabilās funkcionālās metil grupas



atraušanos un pārveidošanās par metānu [56], [86], [87]. Tālākā lignīna sadalīšanās notiek ar benzola gredzena kreklinga un lignīna ogles veidošanas [15]. Šī procesa rezultātā gāzes maisījumā veidojās daudz ūdeņraža (4. att. – C), fenolu un oksidēto alifātisko ogļūdeņražu (spirti, aldehīdi, skābes un peroksīdi). Lignīna sadalīšanās augstākajās temperatūrās turpinās ar lielu siltuma izdalīšanos (2. att. – A), jo notiek cietās pārogļotās fāzes krekings un oksidēšanās, kuru rezultātā izplūdes gāzēs paaugstinās CO daudzums (4. att. – C) [13], [56].

Turpinoties biomasas termiskās sadalīšanās procesam, notiek nepiesātināto alifātisko ogļūdeņražu, furānu, furfurānu, furanonu, fenolu, hinonu, benzolu un citu pārejas procesa savienojumu sadalīšanās ar oksidēšanos vai reducēšanos līdz vienkāršākajiem ogļūdeņražiem vai oglekļa oksīdiem [12]–[15], [29]. Šajā procesa attīstības stadijā biomasas sadalīšanas produkti pārveidojās par visvienkāršākajiem ogļūdeņražiem vai to radikāļiem:  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$  [56], [78]. Tālākā šo savienojumu reakcijas notiek pēc mehānisma, kurš ir aprakstīts 1.2.1–1.2.2. nodaļā. Endotermiskie biomasas sadalīšanas procesi sasniedz līdzsvaru ar eksotermiskiem oksidēšanas procesiem, un kopējais degšanas process kļūst pašuzturošs [56], [78].



5. att. Dažādas biomasas gazifikācijas produktu bilance oksidatīvā atmosfērā [102], [110].

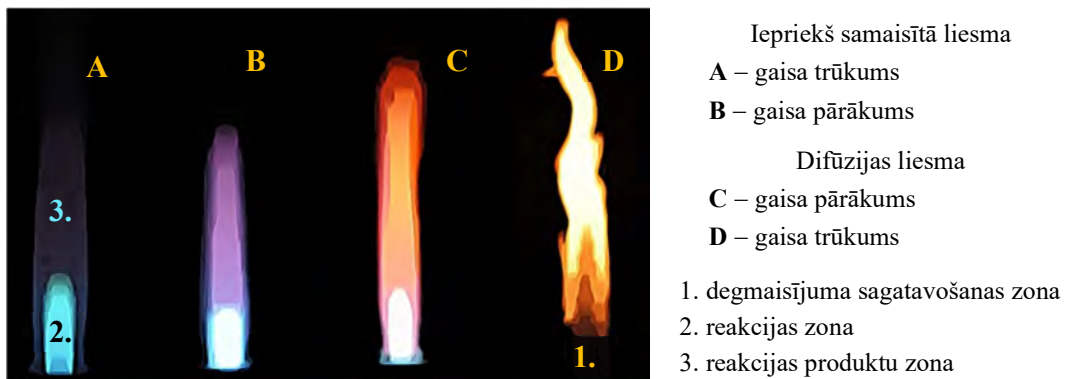
Kopsavilkumā var secināt, ka biomasas gazifikācijas produktu sastāvs ir mainīgs, tomēr tā galvenās daļas vienmēr ir  $\text{CO}_2$  ( $V \approx 16\%$ ),  $\text{CO}$  ( $V \approx 18\%$ ),  $\text{H}_2$  ( $V \approx 14\%$ ),  $\text{CH}_4$  ( $V \approx 4\%$ ),  $\text{C}_2\text{H}_2$  ( $V \approx 1\%$ ) un  $\text{C}_2\text{H}_4$  (līdz  $0,5\%$ ; pie  $\alpha \ll 0,1$ ) [89], [111]. Savukārt oksidatīvā atmosfērā šo sastāvdaļu relatīvais daudzums mainās uz vairāk oksidēto produktu pusi –  $\text{CO}_2$  un  $\text{CO}$ , kā norādīts 5. attēlā, kas savukārt apgrūtina aizdegšanos, jo  $\text{CO}$  oksidēšana ir cieši saistīta ar  $\text{OH}$  radikāļu veidošanos ūdeņraža degšanas procesā, turklāt oksidatīvā atmosfērā ūdeņradis mēdz ļoti ātri pārveidoties plūsmas sākumā, tādā veidā palēninot  $\text{CO}$  oksidēšanos.

Apvienojot visu iepriekšminēto šajā apakšnodaļā, var secināt, ka biomasas degšanas procesa ierosināšanu un tās ātrumu nosaka fizikālie žāvēšanas procesi (kuri atkarīgi vairāk no cietā kurināmā formas, lieluma un blīvuma) un endotermiskie degzācīcijas procesi. Lai uzturētu un paātrinātu šos procesus ir nepieciešams pievadīt papildus siltuma daudzumu, bet ne mazāk kā  $250\text{--}300\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ , jo pievadītā siltuma daudzums nosaka biomasas karsēšanas ātrumu un gaistošo

vielu veidošanās ātrumu. Plūsmas temperatūra nosaka gazifikācijas produktu ķīmisko sastāvu un vielu pārveidošanas ātrumu, tāpēc temperatūru biomasas pirolīzes slānī ir nepieciešams uzturēt vismaz pie 670 K. Siltuma līdzsvars starp endotermiskiem biomasas sadalīšanas procesiem un gaistošo vielu konversijas procesiem, nosaka gazifikācijas produktu aizdegšanās ātrumu, kas savukārt ietekmē liesmas veidošanas kinētiku un dinamiku – jo vairāk gaistošo vielu veidojās gazifikācijas procesā, jo intensīvāka ir liesma. Cietās pārrogļotās fāzes oksidēšanas uzturēšanai ir nepieciešams lielāks skābekļa daudzums, kuru nepieciešams pievadīt tieši pie ogles virsmas, jo pārrogļotā fāze līdz 95 % sastāv no oglekļa atomiem. Savukārt cietās fāzes oksidēšanas procesā vienmērīgi izdalās liels siltuma daudzums (līdz 33 MJ·kg<sup>-1</sup>), ar kuru palīdzību biomasas degšanas procesā tiek līdzsvaroti endotermiskie biomasas degzācības procesi, šādā veidā nodrošinot biomasas degšanas pašuzturošo procesu un liesmas veidošanās.

## 1.2. Liesmas struktūra un kinētika

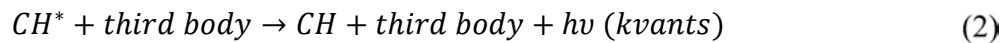
Liesma faktiski ir ķīmiskās reakcijas izstarotās enerģijas redzamā daļa. Tāpēc liesmas krāsa, struktūra, garums un platums (6.att.) mēdz mainīties atkarībā no degmaisījuma sastāva un ārējiem apstākļiem (temperatūras, ārējiem spēkiem). Liesmas struktūra izmainās arī atkarībā no degvielas un oksidētāja padeves veida degšanas kamerā, veidojot iepriekš samaisītās (A, B) vai difūzās liesmas (C, D).



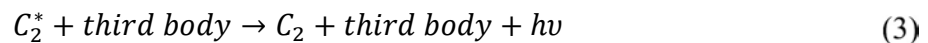
6. att. Dažāda veida liesmas veidošanas kinētikas shematiskais zīmējums.

Liesmas struktūru, sastāvu, temperatūru, izplatīšanās ātrumu un degšanas produktu sastāvu būtiski ietekmē arī gaisa pārsvara koeficients ( $\alpha$ ). Stehiometrisko degšanas procesu, kas veidojas pie  $\alpha = 1$  (A–3), raksturo pilnīgā degvielas sadegšana, sasniedzot maksimālo degšanas zonas temperatūru un maksimālo liesmas izplatīšanās ātrumu. Ja degšana notiek pie ierobežotas gaisa padeves ( $\alpha < 1$ ) vai gaisa padeves pārsvara ( $\alpha > 1$ ), novēro liesmas struktūras vai krāsas izmaiņas. Pēc liesmas starojuma krāsas un tās intensitātes var netieši spriest, par liesmas veidošanās apstākļiem un tās kinētiku. Tomēr, lai pareizi analizētu liesmas veidošanās kinētiku, ir nepieciešams izvērtēt galvenās reakcijas, kas ietekmē liesmas starojuma veidošanos un tā spektrālo sastāvu. Klasisko konisko liesmas struktūru veido gāzveida komponentu difūzija, konvektīvās

plūsmas ātruma momenta un gravitācijas spēku savstarpējā mijiedarbība. Liesmai var atšķirt trīs galvenās zonas: 1. zona - degmaisījuma sagatavošanas zona, 2. zona - reakcijas (degšanas) zona, 3. zona - dūmgāzu (reakcijas produktu) zona (6. att.). Liesmas konusa centrā notiek degmaisījuma sagatavošana un iesildīšana. Parasti degmaisījuma sagatavošanas zonu sauc par auksto liesmas zonu, jo temperatūra tajā nerasniedz 770 K. Redzamā liesma ir ķīmiskās reakcijas efekts, bet pati degšanas reakcija notiek plānā slānī pie liesmas redzamā konusa apmales, kuru sauc par liesmas fronti. Tā kā ķīmiskā reakcija telpiski notiek virzienā no produktiem uz neizreaģējošām izejvielām, tad arī pati liesma tiecās degmaisījuma virzienā, un liesmas fronte cenšas pārklāt visu degmaisījuma tilpumu [112], [113]. Stehiometriskās liesmas zila krāsa (6. att. – B) veidojās  $CH^*$  radikāļu hemiluminiscences rezultātā [114]:



Atkarībā no degmaisījuma sastāva un degšanas parametriem redzamās liesmas koniskā forma un tās garums var mainīties. Piemēram, palielinot plūsmas ātrumu, liesma kļūst vairāk izstiepta, un otrādi, samazinot ātrumu, liesmas konuss kļūst šaurāks. Mainot degmaisījuma sastāvu – samazinot gaisa pārsvaru, liesmai veidojās divas un vairākas dažādas krāsas un formas reakcijas zonas (6. att. – A), ko pamato sevišķā degšanas kinētika dažādās liesmas vietās. Degmaisījumam, ar gaisa iztrūkumu reakcijas zona novietojas zemāk un tās nokrāsa ir zaļa, tomēr neizreaģējošās degvielas degšanas zona (zilā) izvietosies augstāk un tā forma būs vairāk izstiepta. Zaļās liesmas reakcijas zonas krāsu nosaka ierosinātā  $C_2$  radikāļa hemiluminiscence [115]:



Gaisa iztrūkumā samazinās arī oglekļa (II) oksīda (CO) degšanas ātrums un tas tiek iznests tālāk plūsmā no reakcijas zonas, tāpēc liesmā var veidoties sarkani-violetā zona, (6. att. – C), kuras starojumu nosaka CO oksidēšanas reakcija [116]:



Pie ierobežotas gaisa padeves liesmā novēro arī intensīvu kvēpu daļiņu veidošanos (6. att. – D). Kvēpi ir poliaromātisko vielu kopas nodaļiņas (PAH) un to aglomerāti, kuri veidojās neizreaģējošās degvielas rekombinācijas un kondensācijas procesos (sk. 1.2.2. apakšnodaļā). Liesmas starojumu ar palielināto kvēpu veidošanos nosaka galvenokārt oglekļa ( $I \approx T^4$ ) termiskais starojums [117]–[119].

Liesmas struktūra ir stipri atkarīga arī no degvielas un gaisa maisījuma plūsmas režīma: laminārā ( $Re < 500$ ), kad masas kustības procesi notiek molekulārās difūzijas un konvekcijas dēļ, vai turbulentā ( $Re > 3000$ ), kad kustības procesi attīstās molekulārās un turbulentās difūzijas dēļ (t.s. makroskopiskas virpuļa kustības) [112], [120]. Gaistošām vielām nonākot plūsmā pēc biomasas termiskās sadalīšanās, notiek to koncentrācijas sadalījuma izmaiņas, kuras ir atkarīgas no plūsmas parametriem [121]. Biomasas degšanas process parasti notiek bez iepriekšējās gaisa un degvielas samaisīšanas, jo gazifikācijas gāzveida produkti, kuri nosaka biomasas degšanas procesa veidošanos, tiek izdalīti no biomasas tās termiskās sadalīšanās procesā [14]. Virpuļviesuļa plūsmas dinamikas apstākļos (sk. 1.3. nodaļā) pie liesmas pamatā gaistošās vielas vairāk koncentrējās un

reaģē ar skābekli virpuļviesuļa centrā [121], veidojot virpuļviesuļa kodolu. Šajā zonā var noverot īsās zilganzaļas liesmas daļu, pēc kuras uzreiz seko garā sarkandzeltenā kvēpu veidojošās liesmas daļa (6. att. – C), jo biomasas degšanas procesā plūsmā aizplūst daudzums cietā oglekļa daļiņu, kuru starojums nodrošina liesmai sarkano krāsu. Šādas liesmas struktūrā zilās un zaļās zonas ir grūti konstatēt, jo tās pārklājās ar kvēpu veidojošu liesmas zonu un  $\text{CH}^*$  radikāļi tiek saistīti kvēpu veidošanas procesā [117]–[119].

### 1.2.1. Vienkāršāko gaistošo vielu degšanas mehānismi un reakciju kinētika

Kā jau minēts 1.1.5. apakšnodaļā, biomasas termiskās rezultātā plūsmā veidojas gāzifikācijas gāzveida produkti, kuru galvenās sastāvdaļas ir ūdeņradis ( $\text{H}_2$ ), oglekļa (II un IV) oksīds ( $\text{CO}$  un  $\text{CO}_2$ ). Tehnoloģiskā procesā tiek reģistrēts arī metāns ( $\text{CH}_4$ ), etilēns ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ) un acetilēns ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) [102], [110].

Liesmas garumā vienlaicīgi notiek vairāki ķīmiskie procesi, kas atšķiras pēc dabas, mehānisma un pēc saviem kinētiskajiem parametriem (ātruma, temperatūras vai jutīgumā pret spiedienu un tml.), tomēr galvenos procesus, kas nosaka degšanas procesa veidošanos, var sadalīt divās daļās: degmaisījuma sagatavošana (degvielas un oksidētāja samaisīšanās, sildīšana, krekings, pirolīze, aukstā oksidēšanās), kas notiek liesmas aukstajā zonā, un degmaisījuma aizdegšanās [112]. Degmaisījuma degšanas zona ir telpiski atdalīta no degmaisījuma sagatavošanas aukstās zonas un tā raksturojas ar eksotermisko reakciju veidošanos, kura nodrošina siltuma plūsmu biomasas termiskās sadalīšanas procesa uzturēšanai un degmaisījuma sagatavošanai [112], [113].

Biomasas termiskās sadalīšanās gāzveida produktu oksidēšanas reakcijas pārsvarā ir sazarotās ķēdes reakcijas, kurām reakcijas ātrumu galvenokārt nosaka reakcijas mehānisms un aktīvo centru daudzums [112]. Klasisks sazaroto ķēdes reakciju piemērs ir ūdeņraža oksidēšanas reakcijas, kurās galvenais reaģents ir atomārais ūdeņradis (5. tab.), kas veidojas molekulārā ūdeņraža termiskās sadalīšanās procesā un pat nelielos daudzumos uztur ķēdes reakciju veidošanos [122].

Degšanas ātrumu ierobežo limitējošā reakcija. Ūdeņraža degšanas procesā limitējošā ir 5. reakcija, kas raksturojas ar augstāko aktivācijas enerģiju (5. tab.). Ūdeņraža degšanas ķīmisko reakciju ātrumu nosaka reaģējošo vielu koncentrācijas izmaiņa laika vienībā, kuru aprakstīt, izmantojot vienādojumu [122]:

$$K_{reakc} = \frac{d[\text{H}_2\text{O}]}{dt} = 2A \cdot [\text{H}] \cdot [\text{O}_2] \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (5)$$

kur  $K_{reakc}$  – reakcijas ātrums,  $A$  – pirms eksponenciālais faktors,  $[\text{H}_2\text{O}]$ ,  $[\text{H}]$  un  $[\text{O}_2]$  – reaģenta daudzums,  $E_a$  – aktivācijas enerģijas,  $R$  – universālā gāzes konstante,  $T$  – temperatūra, bet reizinātājs “2” ir saistīts ar to, ka procesā veidojās divas ūdens molekulas.

Aktivācijas enerģija un reakcijas kārtā ir atkarīga no degvielas-gaisa attiecības. Pēc *Law C. K.* [123] pie gaisa padeves pārsvara un stehiometriskas gaisa padeves ūdeņraža-gaisa degmaisījuma aktivācijas enerģija nemainās, tomēr tā ir divās reizēs mazāka kā maisījumam, kas

raksturojas ar ierobežotu gaisa padevi. Savukārt reakcijas kārtā degmaisījumam pie gaisa padeves pārsvara ir mazāka nekā pie stehiometriskas vai ierobežotas gaisa padeves maisījumā.

5. tabula

**Ūdeņraža degšanas reakcijas mehānisms ar skābekli**

Atsauce		<i>Miller</i> [124]		<i>Marinov</i> [125]		<i>Cantera</i> ©	
Reakcija		<i>A</i> , mol·cm <sup>-3</sup> ·s <sup>-1</sup>	<i>E<sub>A</sub></i> , kJ·mol <sup>-1</sup>	<i>A</i> , mol·cm <sup>-3</sup> ·s <sup>-1</sup>	<i>E<sub>A</sub></i> , kJ·mol <sup>-1</sup>	<i>A</i> , mol·cm <sup>-3</sup> ·s <sup>-1</sup>	<i>E<sub>A</sub></i> , kJ·mol <sup>-1</sup>
$H + O_2 \rightarrow OH + O$	(6)	$2,6 \cdot 10^{16}$	71	$2,0 \cdot 10^{14}$	-	$5,1 \cdot 10^9$	69
$O + H_2 \rightarrow OH + H$	(7)	$3,9 \cdot 10^4$	26	$5,1 \cdot 10^4$	26	$1,8 \cdot 10^{10}$	37
$2OH + 2H_2 \rightarrow 2H_2O + 2H$	(8)	$4,5 \cdot 10^{13}$	5	$8,5 \cdot 10^{11}$	5	$2,5 \cdot 10^{13}$	3
$H + O_2 + 3H_2 \rightarrow 2H_2O + 3H$	(9)	summārā reakcija					

Adiabatiskos apstākļos novēro reakcijas ātruma palielināšanos, jo siltums, kas izdalās reakcijas laikā, paaugstina temperatūru, bet temperatūrā paātrina reakciju. Ideālos apstākļos adiabatiskā procesā temperatūra sasniedz savu maksimumu un reakcija līdzsvarojās. Ūdeņraža līdzsvarotās stehiometriskās degšanas gadījumā liesmas frontes izvietojums būs pilnīgi noteikts un saistīts ar liesmas izplatīšanas ātrumu, kurš katrai degvielai ir savādāks [112], [113]. Nenoslēgtā sistēmā pastāv siltuma zudumi, un siltums no reakcijas zonas tiek aizvadīts konvektīvā un starojuma siltuma apmaiņas rezultātā, tāpēc liesmai pēc aizdegšanas pie pārējiem nemainīgiem parametriem veidojas atšķirīgs stacionārais režīms. Analizējot 5.tabulas kinētikas datus, var secināt, ka ūdeņraža degšanas reakcijas notiek ļoti intensīvi un reakcijas apstākļi mazāk ietekmē rezultātu pateicoties intensīvai ķēdes reakcijai degšanas frontē. Dažādi skaitliskie aprēķini apliecina, ka ūdeņraža koncentrācija strauji samazinās jau degšanas kameras pamatnē [126], [127]. Šo procesu padziļināta izpēte (*Gülde L. Ömer*) ļauj secināt, kas pastāv trīs dažādi ūdeņraža-gaisa maisījumu degšanas mehānismi (*Miller, Mariov, Cantera*©), kas raksturojas gan ar atšķirīgu reakcijas virzienu, gan arī ar atšķirīgām kinētiskām konstantēm [122].

Arī biomasas gazifikācijas produkta CO degšanas process raksturojas ar sazarotām ķēdes reakcijām un eksperimentāli ir noteikts, ka CO nereaģē ar molekulāro skābekli vai gaisu pie zemām temperatūrām - līdz pat 970 K. Reālos degšanas apstākļos CO oksidēšanas reakcija notiek neliela ūdens vai ūdeņraža daudzuma klātbūtnē un to ierosina siltums, kas izdalās ūdeņraža degšanas procesā [112], [128].

*Avromenko* un *Lorentzo* piedāvā mehānismu, kurā CO degšanas procesu nosaka OH radikāls, bet ķēdes reakcijas notiek pēc mehānisma, kas dots 6. tabulā. *Dryer* savā pārskatā par oglekļa (II) oksīda un metāna oksidēšanu pie augstām temperatūrām apliecina, ka reakcijas produktos ūdeņraža atoma koncentrācija nav novērota un CO oksidēšana notiek, kad ir iestājies līdzsvars starp O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O un OH. Šo mehānismu papildināja 14. reakcija, kuru piedāvāja *Sugden* 1956. gadā un *Schott* 1967. gadā [128]. Tika secināts, ka 10., 11. un 14. reakciju kopā ar

rekombinācijas mehānismiem līdzsvaro radikālu koncentrācijas reakcijas zonā, veidojot stabilākus produktus, t.s. ūdens tvaiku  $H_2O$ . Tad 15. reakcijas formula visaptveroši attēlo vienkāršoto papildināto CO oksidēšanas mehānismu.

6. tabula

**Oglekļa II oksīda degšanas reakcijas mehānisms ūdeņraža atoma klātbūtnē**

Reakcija		Kinētiskās konstantes		Atsauce
		$A, \text{mol} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$	$E_A, \text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	
$H + O_2 \rightarrow OH + O$	(10)	$2,6 \cdot 10^{16}$	71,3	[124]
$O + H_2 \rightarrow OH + H$	(11)	$3,9 \cdot 10^4$	26,2	[124]
$CO + OH \rightarrow CO_2 + H$	(12)	$3,9 \cdot 10^{(6-10)}$	66,9 – 165,2	[128]
$CO + OH + O_2 + H_2 \rightarrow CO_2 + 2OH + H$	(13)	summārā reakcija		[112]
$OH + H_2 \rightarrow H_2O + H$	(14)	$1,2 \cdot 10^9$	15,2	[128]
$CO + 2OH + O_2 + 2H_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	(15)	summārā reakcija		[129]

Salīdzinot ūdeņraža un CO degšanas procesu kinētiskās konstantes (5. un 6. tab.), var secināt, ka CO oksidēšanas process ir lēnāks par ūdeņraža degšanas procesu, turklāt 12. reakcija ir CO degšanas procesa limitējošā reakcija [128], kuras ātruma vienādojumu var pierakstīt kā [129]:

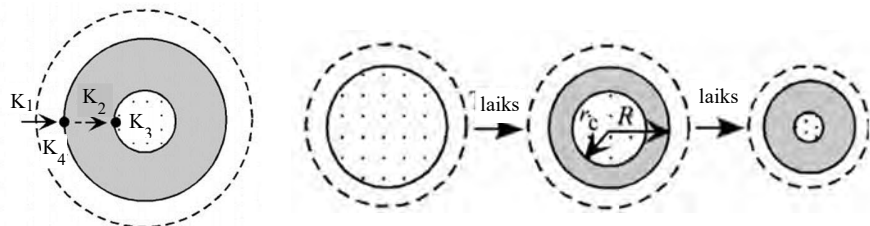
$$K_{reakc} = \frac{d[CO_2]}{dt} = A \cdot [CO] \cdot [H_2O]^{0,5} \cdot [O_2]^{0,25} \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (16)$$

Jaunākie pētījumi papildina CO oksidēšanas mehānismu līdz 33 dažādām reakcijām [130], [131], ņemot vērā oksidēšanas mehānismus, kas veidojas arī pie zemākām temperatūrām - līdz 800 K – CO oksidēšanu peroksīdu ( $OH_2$ ) klātbūtnē, reakcijas, kas saistītas ar formil ( $HCO$ ) radikālu veidošanos un to sadalīšanos pie augstām temperatūrām, kā arī rekombinācijas un ķēdes paraušanas reakcijas. Tika veikta arī CO degšanas procesa ierobežojošās 12. reakcijas analīze, kuru, pateicoties ūdeņraža saitei, nosaka  $HO \cdot CO$  kompleksa veidošanās [131]. CO oksidēšanās reakciju (9.–12.) ātrums ir atkarīgs no temperatūras un šo reakciju ātrums strauji samazinās ja degšanas zonas temperatūra ir zemāka par 800–1000 K [130].

Biomases gazifikācijas procesā veidojas ne tikai gāzveida produkti, bet arī cietā ogļveida fāze (karbonizētais atlikums), kura degšanas procesu nosaka oglekļa gazifikācijas un oksidēšanas reakcijas [132]. Pastāv uzskats, ka mazām cietā kurināmā (ogles) daļiņām degšanas procesu kontrolē ķīmiskās reakcijas, bet daļiņām, kas lielākas par 300  $\mu\text{m}$ , oksidēšanās process ir saistīts ar oksidētāja difūziju, virsmas reakcijām un cietās daļiņas pārvērtībām [133]. Šāda cietā kurināmā degšanas procesa mehānisma analīze tiek veikta, izmantojot kontrakcijas modeli, kura shēma ir norādīta 7.attēlā. Atbilstoši šim modelim cietās daļiņas degšanas procesa veidošanās nosaka virkne savstarpēji saistītu procesu: oksidētāja difūzija pie virsmas ( $K_1$ ), gazifikācijas/deģšanas produktu difūzija virzienā prom no daļiņas, oksidētāja ķīmiskā virsmas reakcija ar pārorgloto (daļēji

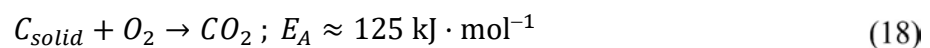
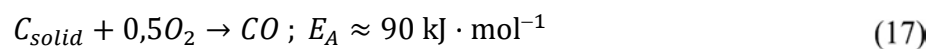
izreaģējošo) virsmu ( $K_4$ ), oksidētāja difūzija cauri pārogletās virsmas slānim ( $K_2$ ), un oksidētāja ķīmiskās reakcijas ar izejvielu ( $K_3$ ) [134], [135].

Pēc daļiņas kontrakcijas modeļa kinētiskiem datiem dažāda veida ogļēm priekšeksponenciālais faktors var būt robežās no  $8,2 \cdot 10^{-3}$  līdz  $9,2 \cdot 10^{-1}$  un koksnes daļiņām aptuveni  $8,6 \cdot 10^{-3}$ , kas ir ļoti mazs salīdzinot ar ūdeņraža un oglekļa monoksīda oksidēšanas ātrumiem (5. un 6. tabulas), bet aktivācijas enerģija šo procesu reakcijām var sasniegt līdz  $\approx 120 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$  [133]. Kinētiskie dati liecina, ka procesa ātrums atkarīgs arī no pārogleto biomasas daļiņu dabas un blīvuma, jo šie parametri ietekmē siltuma vadīšanu un difūziju pārogletā slānī. Procesā limitējošā stādīja šajā kontrakcijas modelī ir oksidētāja difūzija caur pārogleto slāni ( $K_2$ ), jo procesa ātrums ir atkarīgs no slāņa biezuma, bet slāņa biezums atkarībā no cietās daļiņas sastāva laikā dažādām daļiņām var mainīties stipri atšķirīgi. Cietam kurināmajam ar palielinātu minerālvielu saturu pārogletais slānis samazinās ļoti lēni, tāpēc pārogleto daļiņu degšanas process stipri aizkavējās [134]. Respektīvi, salmu mikrodaļiņu degšana var tikt aizkavēta īpašā pelnu sastāva dēļ, izraisot paaugstinātu kvēpu daļiņu veidošanos.

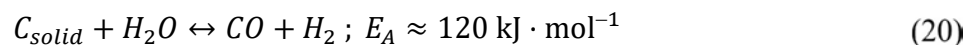


7. att. Ogļveida fāzes daļiņu kontrakcijas modeļa shēma [134], [135].

Pārogleto biomasas daļiņām vai poliaromatisko vielu aglomerātiem ir augsts oglekļa saturs (līdz 95 % [102]), tāpēc šo daļiņu oksidēšanās procesa ķīmisko mehānismu saista galvenokārt ar cietās fāzes oglekļa oksidēšanu un gazifikāciju [135]. *Walker* 1959. gadā [136] izvirzīja hipotēzi, ka cietām oglekļa daļiņām ir iespējamas divas heterogēnās eksotermiskās reakcijas (17–18. reakc.) un divi galvenie oksidēšanas produkti – CO un CO<sub>2</sub>:

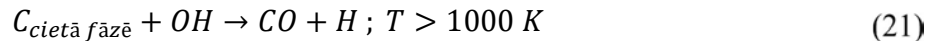


Pie ierobežotas gaisa padeves iespējamas arī reakcijas [133]:

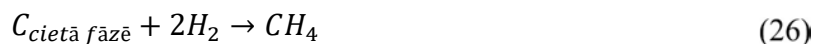


*Marsh* un *Kuo* oglekļa daļiņu oksidēšanas mehānismu papildināja ar ķīmiskas sorbcijas mehānismu un mijiedarbību starp gāzveida fāzes un adsorbētas gāzes molekulām, secinot, ka ķīmiskas sorbcijas rezultātā no virsmas atbrīvojās oglekļa oksīdi, bet uz virsmas paliek ķīmiski saistīts skābekļa atoms, kurš veicina oksidēšanas procesu [137].

Oksidēšanas–reducēšanas reakciju līdzsvars ir jūtīgs pret temperatūras izmaiņām, tāpēc pie temperatūrām virs 1100 K galvenais produkts ir CO. *Basu* 1976. gadā un *Prins* 1987. gadā, eksperimentāli noteica, ka ogles un grafīta degšanas produktos  $[CO] \cdot [CO_2]^{-1}$  attiecība pie temperatūrām 900–1100 K sasniedz aptuveni 0,2–0,5 [136]. Pēc analogijas ar CO oksidēšanu gāzveida fāzē, pieņem arī, ka uz virsmas notiek 21.–24. reakcijas (eksotermiskās) ar radikāliem [133], [136].



Turklāt augstākās temperatūrās CO ātri izreaģē ar OH radikāliem, tāpēc šādu reakcijas mehānismu ir grūti izanalizēt. Vel viena endotermiskā oglekļa oksidēšanas reakcija notiek ar ūdens tvaiku (25.–26. reakc.), tomēr konkurējošais mehānisms šajā procesā noved arī pie metāna veidošanās [137].



Šie biomasas termiskās sadalīšanās gāzveida produktu un cietās fāzes (pārogļoto biomasas daļiņu) degšanas procesu pētījumi un aprēķinu modeļi dod tuvinātu priekšstatu par galveno produktu (CO un H<sub>2</sub>) degšanas procesa kinētiku un reakcijām uz cietās pārogļotās granulu virsmas, gan arī par oglekļa saturošām cietām daļiņām, kuras tiek aiznestas ar plūsmu no cietās vielas virsmas vai arī veidojas pašā liesmā (kvēpi). Ņemot vērā 5. un 6. tabulas datus ūdeņraža un oglekļa monoksīda oksidēšanas reakcijām, var secināt, ka ūdeņradis sadeg liesmas plūsmā gandrīz momentāli, salīdzinot ar CO pārveidošanās procesu, tomēr ūdeņradis piedalās CO oksidēšanas reakcijās, tāpēc to klātbūtne liesmā ir ļoti svarīga. Savukārt vislēnākās reakcijas notiek uz biomasas granulu pārogļotās virsmas. Sarežģīts sorbcijas un difūzijas process, kā arī konkurējošās oksidēšanas–reducēšanas reakcijas apgrūtina pārogļotās cietās fāzes virsmas reakcijas (17.–26. reakc.) un veicina daļiņu (kvēpu) veidošanos liesmā.

## 1.2.2. Oglūdeņražu degšanas mehānismi un reakciju kinētika

1.2.1. apakšnodaļā apskatīto biomasas gazifikācijas produktu veidošanās kinētika sniedz vērtīgu informāciju par galveno gāzveida produktu (CO, H<sub>2</sub>) degšanas procesu veidošanos, kas praktiski nav saistīta ar elektriski lādēto daļiņu – jonu veidošanos liesmā [138], [139]. Kā jau minēts 1.1.5. apakšnodaļā, biomasas komponentu termiskās sadalīšanās rezultātā veidojas arī degošie ogļūdeņraži (metāns, etilēns, acetilēns) [102], [110]. Daži ogļūdeņraži, piemēram, metāns – var veidoties radikāļu vai oglekļa reducēšanas procesos [137], bet citi – nepiesātinātie, tādi kā etilēns vai acetilēns, var veidoties biomasas sastāvdaļu sadalīšanās procesā [29], kā arī radikāļu

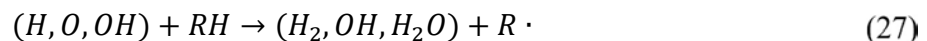


polimerizācijas rezultātā [140]. Šādu gazifikācijas produktu veidošanās nelielos daudzumos ir novērota gazifikatora izejā, tuvu biomasas slānim (līdz 50 mm attālumā).

Pētījumi liecina, ka ogļūdeņražu oksidēšanās kopumā ir līdzīga ūdeņraža un oglekļa oksīdu oksidēšanas procesiem, un arī ietver šos procesus kā sastāvdaļu. Tomēr ogļūdeņražu oksidēšana ir daudz sarežģītāka, tāpēc nav iespējams veidot pārlicinošas oksidēšanās mehānisma shēmas, kas pilnībā raksturo procesu. Šobrīd visvairāk reakciju virkņu aptverošie mehānismi ir izstrādāti, pateicoties vairāku vienlaicīgo ķīmisko reakciju modelēšanas pētījumiem [115], [141], [142]. Turklāt vairāku pētnieku darbi apliecina, ka, mainot degšanas procesa apstākļus, mainās reakciju kinētiskie parametri, un kā rezultāts – var mainīties arī reakcijas virziens un to secība [140], [143]. Degšanas kinētiku var pētīt reakcijām atsevišķi, reakciju kopām un secībām, ka arī empīriski veidot summārās ķīmiskās formulas, kas ļauj rēķināt procesu atbilstoši eksperimentālajiem datiem.

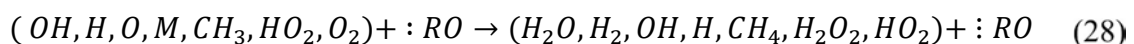
Neskatoties uz visām dažādu ogļūdeņražu degšanas īpašībām, šiem procesiem piemīt rinda kopīgu pazīmju. Temperatūrās virs 620–670 K grādiem liela daļa no lielmolekulāriem ogļūdeņražiem sadalās (krekinga process), veidojot daudz vienkāršākas molekulas vai molekulu daļas (radikāļus). Radikāļi ir molekulu daļas, kuriem trūkst viena vai vairāku ūdeņraža atoma ir ļoti reaģēt spējīgi, tāpēc nevar ilgi eksistēt nesaistītā veidā. Radikāļi var piedalīties dažādās reakcijās, turklāt šo reakciju iznākumu un kinētiku nosaka dažādu radikāļu koncentrācija dažādās liesmas daļās un vides apstākļi (galvenokārt temperatūra).

Piesātinātiem alifātiskajiem ogļūdeņražiem oksidēšanas process sākās ar H, O vai OH radikāļu pievienošanu C–H saitei. Šīs reakcijas rezultātā veidojās radikāls ( $R\cdot$ ), piemēram, reakcijā ar metānu var veidoties  $CH_3$  radikāls [144], bet reakcijā ar acetilēnu –  $C_2H$  [145].



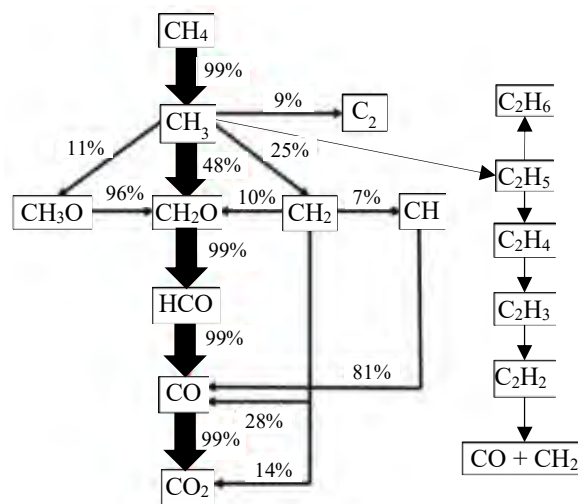
Garākas ķēdes ( $C_3$ – $C_n$ ) radikāļi var termiski sadalīties, veidojot alkēnu un īsāko radikāļu līdz tam momentam, kamēr sāk veidoties visstabilākie radikāļi: metil radikāls ( $CH_3$ ) un etil radikāls ( $C_2H_5$ ) [146].

Tālākās oksidēšanās process notiek pēc sazarotās ķēdes mehānisma. Ir konstatēts, ka vielu pārvērtību rezultātā veidojas daudz radikāļu, kā H, O, OH u.c. [112], [113], kas savukārt var piedalīties gāzveida produktu ( $CO$ ,  $H_2$ ) oksidēšanās reakcijās. Oksidēšanas procesi notiek vairākās pakāpēs, saraujot iekšējās saites un veidojot dažādus starpproduktus. Ogļūdeņražu radikāļi oksidējās degmaisījuma sagatavošanas zonā pie pazeminātām temperatūrām ( $T < 800$  K), veidojot peroksīdus ( $ROOH$ ) vai aldehīdus ( $RHO$ ) [112], [144], [147]. Peroksīdi veidojās skābeklim pievienojoties pie ogļūdeņraža radikāļa, bet aldehīdi un skābes bieži veidojas, oksidējoties pašiem ogļūdeņražiem. Radikāļu, peroksīdu un aldehīdu veidošanās uzlabo ķēdes reakcijas attīstīšanās. Ar (H, O, OH) radikāļu uzbrukumu notiek tālāka gāzes fāzē veidoto spirtu, skābes un aldehīdu oksidēšanās pēc ūdeņraža atšķelšanas reakcijas, veidojot nestabilus oksidētos ogļūdeņražu radikāļus (piem.,  $CH_2O$  un  $HCO$ ), kuri veido  $CO$  [112], [113]:



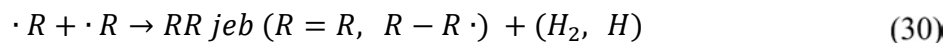


Oksidēšanas procesi ir degšanas reakcijas limitējošā stadija (lēnie procesi), kas ir galvenā kopējā īpašības piesātināto un nepiesātināto ogļūdeņražu degšanā [146]. Reakcijas ar oksīdu veidošanos sauc par pirmsuzliesmošanas reakcijām, kad notiek aktīvo daļiņu uzkrāšanās liesmā pirms notiek degmaisījuma pašai degšanās [112], [113]. Vispārīgi tiešo piesātināto ogļūdeņražu oksidēšanas mehānismu var izsekot ar bultiņām, aplūkojot metāna degšanas mehānismu, kas apkopots 8. attēlā. Šī ir vienkāršotā shēma, kuru ir nepieciešams papildināt ar rekombinācijas un termiskiem ūdeņraža atraušanas procesiem.



8. att. Metāna degšanas mehānisms gaisā ar reakciju iznākumu ( $\alpha \approx 1$ ) [142].

8. attēlā no labās puses ietverts arī radikāļu rekombinācijas, polimerizācijas un reducēšanas mehānisms, kad piesātinātā ogļūdeņraža radikāls ( $R \cdot$ ) var rekombinēties, savienojoties ar citu radikāļu un veidojot garākas ķēdes ogļūdeņražus [112], [144], [147].  $CH_3$  radikāļu rekombinācijas reakcijās var veidoties metāns, vai garākas virknes alkāns / alkēns:



Reakcija tālāk var turpināties ar ūdeņraža atšķelšanos, veidojot nepiesātinātus ogļūdeņražus pēc shēmas aprakstītas 8. attēlā, vai, reaģējot ar citiem nepiesātinātiem ogļūdeņražiem, veicinot garākas nepiesātināto ogļūdeņražu virknes veidošanās, un provocējot kondensācijas reakcijas, veidojot poliaromātisko molekulu un kvēpu rašanās liesmā [140]. Rekombinācijas procesu svarīgums palielinās, apstākļos, ja veidojas degvielas pārsvars, jo tie var iesaistīt līdz pat 80 % no kopējā  $CH_3$  radikāļu daudzuma [146], samazinot  $CH$  radikāļu – galveno liesmas jonizācijas prekursoru, veidošanās liesmā (sk. 1.4.2. apakšnodaļā). 8. attēlā var arī redzēt  $CH$  radikāļa veidošanos virzienu un iznākumu aprēķināto pēc Berklija Universitātē izstrādātās metāna degšanas kinētikas, kurā  $CH$  radikālis tiek veidots liesmā nepārsniedzot 1,7 % no sākotnējā metāna daudzuma, kas dod kopējo priekšstatu par jonu veidošanās pirmo ierobežojumu – dabīgo degšanas reakciju secību un kinētiku, kura turklāt ir atkarīga no vides apstākļiem [142].

*Marques et al.* piedāvāja izvērsto nepiesātināto ogļūdeņražu degšanas mehānismu (4. pielik. 6. att.), kā piemēru attēlojot acetilēna–gaisa maisījuma degšanas virzienu ar vinil ( $C_3H_3$ ) radikāla veidošanos pie degvielas pārsvara reakcijas zonā [115]. Viena no atšķirībām ar metāna degšanas mehānismu ir tā, ka tiek piedāvāts arī ierosinātā  $C_2$  radikāla veidošanas mehānisms, kura hemiluminescences procesā izstarotā gaisma veido liesmas zaļo nokrāsu, ja veidojas degvielas pārsvars reakcijas zonā. Trūkāt šajā mehānismā ierosinātā CH radikāla veidošanās ir saistīta ar  $C_2H$  radikāla klātbūtni [114], apliecinot, ka CH ierosinātā un neierosinātā radikāla veidošanas mehānisms var būt atšķirīgs, un pozitīvo jonu daudzums liesmā nav obligāti saistīts ar kopējo CH radikālu saturu reakcijas zonā. Neievērojot acetilēna un metāna degšanas procesa galvenās atšķirības, to oksidēšanas procesu mehānismi ir līdzīgi [147], turklāt acetilēna maisījuma degšanas mehānismā pie degvielas pārsvara reakcijas zonā novēro arī  $CH_3$  radikāla veidošanos un tām raksturīgas oksidēšanas un rekombinācijas reakcijas.

Etilēna degšanas mehānisms (4. pielik. 6. att.), kas piedāvāts *Zhang et al.* darbā [148], arī apstiprina galveno piesātināto un nepiesātināto ogļūdeņražu degšanas hipotēzi, norādot ka nepiesātinātie ogļūdeņraži cenšas termiski pārvērsties par vienkāršākajiem alkāniem (-ēniem / īniem) un to radikāliem un tikai pēc tam oksidēties, veidojot oglekļa oksīdus. Etilēna degšanas mehānismu līdzīgi metāna un acetilēna degšanas mehānismam, veido trīs galvenie reakciju virzieni: oksidēšanās, rekombinācija un polimerizācija. Savukārt etilēna un acetilēna kvēpu veidošanas mehānismi ir nedaudz atšķirīgi: acetilēnam par kvēpu veidošanos ir atbildīgs  $C_3H_3$  radikāls, bet etilēnam – etil ( $C_2H_5$ ) radikāls, tāpēc etilēna kvēpu veidošanas mehānisms vairāk pielīdzināms metāna kvēpu veidošanas procesam [140].

Apkopojot metāna, etilēna un acetilēna degšanas procesu mehānismus, var secināt, ka visiem šiem ogļūdeņražiem ir novērojami trīs galvenie reakciju virzieni: garākas ķēdes krekings un ķēdes oksidēšanās, ķēdes rekombinācija un polimerizācija. Turklāt metāna degšanas procesā liesmā var veidoties nepiesātinātie ogļūdeņraži, bet nepiesātināto ogļūdeņražu degšanas reakcijās var reducēties metāns, kas nozīmē ka degšanas mehānismi var pārklāties un ir atkarīgi tikai no reakciju kinētikas. Tomēr reakciju kinētiku visvairāk ietekmē tādi ārējie faktori kā degvielas-gaisa attiecība un temperatūra.

### 1.2.3. Ogļūdeņražu liesmas izplatīšanas ātrums

Gaistošo vielu degšanas reakciju virziens ir vērsts uz degšanas produktu veidošanās pusi, tomēr degošo komponentu eksotermisko efektu siltuma izplatīšanas virziens ir vērts gan virzienā uz produktu veidošanās pusi, gan virzienā uz maisījuma sagatavošanas pusi. Siltuma izplatīšanās maisījuma sagatavošanas virzienā nosaka maisījuma aizdegšanas ātrumu un kā rezultāts – liesmas izplatīšanas ātrumu.

Liesmas izplatīšanas ātrums raksturo gaisa un biomasas gazifikācijas produktu maisījuma termokīmisko reakciju procesu:  $U$  – ir liesmas frontes lineārais pārvietošanas ātrums maisījuma plūsmas pretējā virzienā. Laminārajā plūsmā noteikta sastāva degvielas maisījumam šis parametrs var būt uzskatāms kā fizikāli-ķīmiski konstants, jo ir atkarīgs tikai no spiediena un temperatūras.

Liesmas izplatīšanas ātrums pirmajā tuvinājumā ir definējams kā degvielas-gaisa maisījuma tilpuma ( $V_k$ ) plūsma caur liesmas frontes laukuma ( $F$ ) vienību. Atbilstoši *Mikhelson* tuvinātai aprēķinu metodei (balstās uz masas nezūdamības likumu) lineārais liesmas izplatīšanas ātrums ir apgriezti proporcionāls liesmas frontes virsmas laukumam [149]–[151]:

$$U = \frac{V_k}{F} = \frac{V_k}{\pi \cdot r \sqrt{r^2 + l^2}} \quad (31)$$

kur  $V_k$  – kurināmā-gaisa maisījuma tilpuma plūsma;  $F$  – liesmas frontes virsmas laukums;  $r$  – degļa sprauslas rādiuss;  $l$  – liesmas garums.

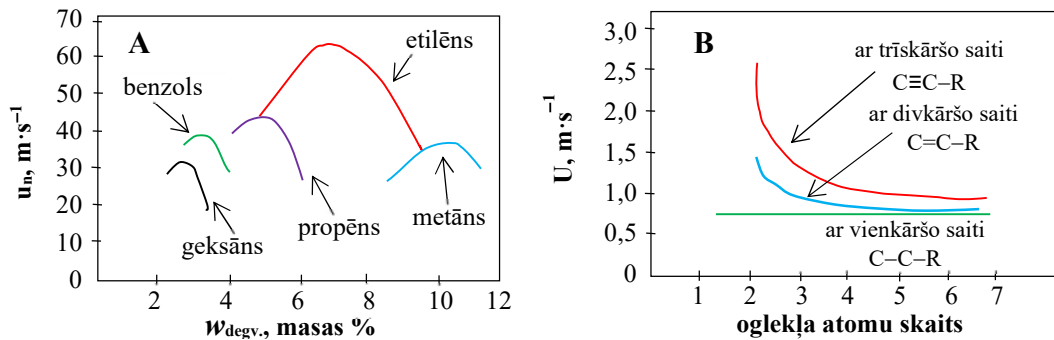
Otrais raksturojošais parametrs ir degšanas zonas biezums ( $\delta$ ), turklāt liesmas izplatīšanas mehānisms tiek raksturots ar siltuma un masas pārnesei procesiem no reakcijas zonas uz neizreaģējošo maisījumu, ko nosaka temperatūras un koncentrācijas gradienti dažādās liesmas zonās [112], [113]. Plašāk par siltuma pārnesei procesiem var izlasīt 1.2.4. apakšnodaļā.

Liesmas izplatīšanas ātrums tiek pētīts ar vairākām metodēm, tomēr rūpnieciski svarīgāka atrāvuma jeb degļa metode. Šajā metodē degmaisījums aizdegas pie degļa malas un izplatās līdz centram, veidojot liesmas simetrisko konusu. Tādam liesmas konusam ļoti svarīgs raksturojošais parametrs ir atvēruma leņķis –  $\psi$ , kuru izvedums izriet no liesmas ģeometrijas un liesmas izplatīšanas ātruma definīcijas (38. formula):

$$\psi = \theta \frac{u_n}{u_{plūsmas}} \quad (32)$$

kur  $\theta$  ir temperatūras attiecība pēc un pirms liesmas konusa,  $u_n$  ir normālais liesmas izplatīšanas ātrums (ķīmiski–kinētiskā konstante), bet  $u_{plūsmas}$  ir degmaisījuma plūsmas ātrums pie izejas no degļa sprauslas [112], [113].

Liesmas izplatīšanas ātrums, kas iegūts ar degļa metodi, mainās atkarībā no degvielas-gaisa attiecības. Dažādu ogļūdeņražu un gaisa maisījumu normālo liesmas izplatīšanas ātrumu maksimumi nobīdās attiecībā viens pret otru. Šādu maksimumu nobīdi nosaka degšanas reakciju virzienu kinētikas atšķirības, kuras piemīt dažādas struktūras degvielām [112], [146]. 9. attēlā (A) ir novērojams, ka normālais liesmas ieplatīšanas ātrums nepiesātināto degvielu degmaisījumiem (etilēns, propēns) ir lielāks par liesmas ieplatīšanas ātrumu piesātinātiem ogļūdeņražiem (metāns, geksāns), kas pamatojams ar vieglāku ūdeņraža atdalīšanos primārā ogļūdeņražu ķēdes šķelšanas posmā (27. reakc.). Pieaugot oglekļa atomu skaitam molekulas ķēdē, nepiesātinātiem ogļūdeņražiem izplatīšanas ātrums samazinās (A, B), bet piesātinātiem gandrīz nemainās, jo garākās ķēdes molekula izmaina degšanas kinētikas virzienu, attīstot ogļūdeņražu ķēdes krekinga reakcijas, kas palielina degošā maisījuma sagatavošanas laiku un līdz ar to aizkavē aizdegšanos [112], [144], [147]. Savukārt garākas ķēdes, bet stipri nepiesātinātā aromātiskā benzola liesmas izplatīšanas ātrums ir nedaudz lielāks par līdzīgā pēc oglekļa skaita, piesātinātā, heksāna, bet mazāks par aciklisko nepiesātināto ogļūdeņražu liesmas izplatīšanas ātrumu.



9. att. Dažādu ogļūdeņražu kurināmo normālais (A) un lineārais (B) liesmas izplatīšanas ātrums [112], [146]

Liesmas izplatīšanās laminārajā plūsmā tiek nodrošināta pateicoties siltuma pārnesei un aktīvo centru difūzijai no degšanas jeb reakcijas zonas degmaisījuma sagatavošanas zonā. Turbulentajā plūsmā liesmas izplatīšanas notiek ne tikai molekulārās pārnesei dēļ, bet arī atsevišķo gāzes daudzuma makrokustību un pulsāciju ietekmē. Pulsāciju ietekme liesma izkropļojas. Kopējais vielu daudzums, kas sadeg turbulentā plūsmā ir lielāks, salīdzinot ar vielas daudzumu, kas sadeg laminārā liesmā. Ātrāks būs arī liesmas frontes kustības ātrums pie neizreagējošā degmaisījuma, tāpēc lineārais liesmas izplatīšanas ātrums palielinās [112], [113].

Šobrīd turbulentās degšanas teorijā ir divi galvenie virzieni – virsmas degšanas teorija un tilpuma degšanas teorija. Šie gadījumi var būt definēti turbulentai plūsmai atkarībā no turbulizācijas mēroga. Stipri turbulentā liesma tuvināti tiek uzskatīta par lamināru, bet ar stipri izkropļotu virsmu, turklāt lineārais degšanas ātrums palielinās pieaugot degšanas frontes virsmai, dažādu savirpuļojumu, izkropļojumu un neviendabīgumu dēļ. Faktiski turbulentās liesmas frontes izplatīšanas ātrums ir lamināras liesmas izplatīšanas ātruma (lineārā) un pulsācijas ātruma summa [112]. Tāpēc apskatot analītiski liesmas mijiedarbību ar elektrisko lauku, eksperimentālajā iekārtā veidotai aerodinamiskai sistēmai var pieņemt lamināras liesmas izplatīšanas ātruma likumsakarības.

#### 1.2.4. Liesmas endotermisko un eksotermisko efektu siltuma bilance

Kā jau minēts iepriekšējā sadaļā, liesmas izplatīšanas ātrumu stipri ietekmē siltuma pārnese procesi virzienā no reakcijas zonas uz degošā maisījuma sagatavošanas zonu, kas nosaka maisījuma komponentu termisko sadalīšanos un oksidēšanās ātrumu ar sekojošo maisījuma aizdegšanos. Eksotermisko un endotermisko siltuma efektu līdzsvara nobīde nosaka liesmas krāsas un garuma izmaiņas [112], [113]. Biomasas degšanas procesos siltuma līdzsvars ir īpaši svarīgs, jo siltuma bilancē, papildus maisījuma veidošanās endotermiskiem efektiem, parādās arī biomasas gazifikācijas procesu endotermiskie efekti, kuri nobīda līdzsvaru un traucē gazifikācijas procesa gāzveida produktu aizdegšanos biomasas termokīmisko pārvērtību sākuma stadijā.

Stacionārajā degšanas procesā, kad degvielas-gaisa maisījuma sastāvs ir nemainīgs, degšanas zonas temperatūras izmaiņas pa liesmas garumu nosaka plūsmas siltuma vadītspēja,

konvektīvā siltuma pārnese un siltuma daudzums, kas izdalās ogļūdeņražu degšanas procesā [112], [152], [153]:

$$\frac{\partial}{\partial l} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial l} \right) - c_p U \frac{\partial T}{\partial l} + \sum H_i \chi_i = 0, \quad (33)$$

kur  $\lambda$  – siltumvadītspējas koeficients, kurš šajā gadījumā atkarīgs no liesmas garuma  $l$ , jo  $\lambda$  ir atkarīgs no temperatūras un gāzes sastāva, bet tie ir parametri, kas mainās liesmas garumā;  $U$  – lineārais liesmas izplatīšanas ātrums jeb degvielas daudzums, kas sadeg liesmas frontes laukumā vienā sekundē ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $c_p$  – izobārā relatīva siltumietilpība, vidējā robežās no  $T_0$  līdz  $T_d$  ( $T_0$  – degšanas maisījuma sākuma temperatūra,  $T_d$  – degšanas temperatūra);  $\rho$  – gāzes blīvums, vidējais robežās no  $T_0$  līdz  $T_d$ ;  $H_i$  –  $i$ -tās reakcijas siltuma efekts;  $\chi_i$  –  $i$ -to reakciju daļa, kas ir beigusies līdz noteiktām liesmas  $l$  šķērsgrīzumam.

Eksotermisko reakciju un konvektīvās difūzijas dēļ, liesmas temperatūra pieaug plūsmas virzienā. Savukārt pirmais 33. vienādojuma loceklis sasniedz savu maksimumu pirms reakcijas zonas un strauji samazinās, sasniedzot savu minimumu uzreiz pēc reakcijas zonas, jo siltuma plūsma ir virzīta uz zemas temperatūras zonu (pirolīzes zonu). Otrais 33. vienādojuma loceklis ir vienmēr negatīvs, jo degvielas un gaisa samaisīšanas zonā siltums vienmēr tiek patērēts maisījuma sildīšanai. Trešais loceklis ir vienmēr pozitīvs, jo liesmā galvenokārt notiek reakcijas ar siltuma izdalīšanos. Visi trīs locekļi paskaidro liesmas siltuma dinamiku – siltums, kurš izdalās ķīmiskas reakcijas laikā siltuma vadības rezultātā tiek pārņemts no zonas ar augstāku temperatūru uz degmaisījumu sagatavošanas zonu ar zemāku temperatūru [112].

Degmaisījuma koncentrācijas izmaiņu diferenciālais vienādojums pēc analogijas ar siltuma bilances vienādojumu ir uzrakstāms formā:

$$\frac{d}{dl} V_{D,i} \rho \frac{dn_i}{dl} - u_n \rho \frac{dn_i}{dl} - K_{reakc} = 0, \quad (34)$$

kur  $V_{D,i}$  – difūzijas ātrums,  $K_{reakc}$  – reakcijas ātrums,  $n$  – vielas molārais daudzums. Šis vienādojums apraksta koncentrācijas izmaiņas difūzijas dēļ (pirmais loceklis), konvekcijas vai kopējas gāzes kustības dēļ (otrais) un vielas patēriņš reakcijas zonā (trešais) [112]. Tā kā reaģējošās vielas daudzums ir proporcionāls temperatūrai:

$$n = n_0 \frac{T_r - T}{T_r - T_0}, \quad (35)$$

kur  $n_0$  vielas sākuma daudzums un  $T_r$  temperatūra pēc reakcijas, nav nepieciešams aprēķināt divus diferenciālos vienādojumus, bet degšanas procesu var pirmajā tuvinājuma raksturot ar siltuma bilances vienādojumu. Tāpēc, aprēķinot 33. un 34. vienādojumu, iegūst normālo liesmas izplatīšanas ātrumu:

$$u_n = \sqrt{\frac{2\zeta H K_{reakc} R T_r^2}{\rho_0^2 C_p^2 (T_r - T_0)^2 E_A}}, \quad (36)$$

kur  $\zeta$  – gāzes molekulas vidējais brīvais noskrējiena ceļš,  $H$  – ir reakcijas siltuma efekts. Bet, tālāk, tā kā:

$$\rho_0 C_p (T_r - T_0) = Q \cdot K_{reakc} \cdot t_l, \quad (37)$$

$$\frac{\zeta}{\rho C_p} = \lambda, \quad (38)$$

kur  $\lambda$  - siltuma vadīšanas koeficients, tad liesmas izplatīšanas ātrums ir:

$$u_n = \sqrt{\frac{\lambda}{t_x}} \cdot \sqrt{\frac{2RT_r^2}{E_{reakc}(T_r - T_0)}}, \quad (39)$$

kur  $t_l$  ir reakcijas laiks, kurš nepieciešams noteiktā daudzuma degvielai pilnīgai sadegšanai.

Ievērojot 39. vienādojumu, ir skaidri redzams, ka liesmas izplatīšanas ātrums stipri atkarīgs no temperatūras un ķīmiskās reakcijas kinētikas ( $E_A$ ). Tāpēc atkarībā no reakcijām, kas notiek dažādās liesmas zonās, liesmas struktūra var mainīties no plānās stehiometriski-zilās liesmas frontes līdz platās dzeltenās liesmas struktūras, kuras krāsu nosaka neizreaģējošu kvēpu daļiņu redzamā gaismas starojuma izkliede plūsmā [115], [140], [142].

Degšanas zonas platumu var aprēķināt arī no siltuma bilances vienādojuma, ievērojot, ka degšanas zonas platumam ir attālums starp punktiem, kur temperatūra liesmā samazinās eksponenciāli [112], [113]:

$$\delta = \frac{\zeta}{c_p \rho u_n} = \frac{\lambda}{u_n} \quad (40)$$

Izmaiņas liesmas plūsmas kinētikā vai dinamikā var ietekmēt liesmas izplatīšanas lineāro ātrumu, jo liesmas izplatīšanas ātrums ir apgriezti proporcionāls liesmas frontes platumam ( $\delta$ ). Šo sakarību sauc par Zeldoviča un Franka-Kamencka apvienoto formulu [149], [151]:

$$U = \frac{\zeta}{c_p \rho \delta} = \frac{\lambda}{\delta}, \quad (41)$$

kur  $\lambda$  – jau ir kurināmā-gāzes maisījuma temperatūras vadības koeficients;  $\delta$  – liesmas frontes biezums. Savukārt degšanas ātrums pieaug ar temperatūru, kas izriet no eksotermisko reakciju ātruma definīcijas jo [112], [113]:

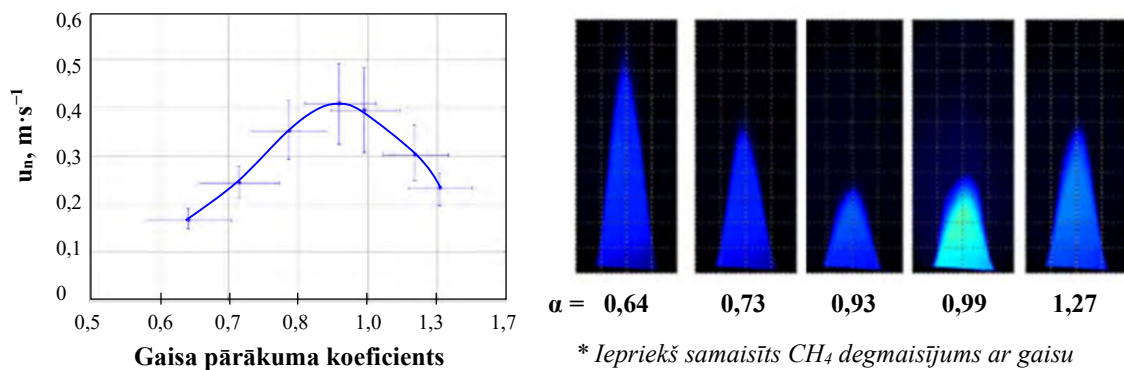
$$K_{reakc} \sim e^{-\frac{E_{reakc}}{RT_r}} \quad (42)$$

Eksperimentāli ir noteikts, ka lineārais liesmas izplatīšanas ātrums ir saistīts ar temperatūru pēc izteiksmes [112], [113]:

$$U \sim T^n, \text{ kur } n = [1,5; 2] \text{ jeb } 1,8 \quad (43)$$

Pēc 43. formulas var secināt, kā liesmas frontes izplatīšanas ātrums ir maksimālais liesmas daļā, kurā ir novērojama augstāka temperatūra, turklāt pēc 34. formulas izplatīšanas ātruma maksimums nobīdīts tajā daļā, kur degmaisījuma sastāvs ir tuvs stehiometriskam, ar nelielu novirzi

maisījuma degvielas pārsvara virzienā [154]. Degvielas-gaisa maisījuma sastāva izmaiņas izraisa degšanas procesa kinētikas izmaiņas, kas savukārt izraisa gan temperatūras sadalījuma izmaiņas liesmā, gan liesmas izplatīšanas ātruma izmaiņas (10. att.). Par piemēru var kalpot liesmas krāsas izmaiņas no zilās – stehiometriskās degšanas zonā līdz zaļai – zonā, kas raksturojas ar degvielas pārsvaru [115]. Pie degvielas pārsvara degšanas process ir nepilnīgs, tāpēc, turpinoties degvielas samaisīšanai ar oksidētāju un to sadegšanai, veidojās reakcijas zona ar atšķirīgu degmaisījuma sastāvu un degšanas procesa kinētiku (6. att. – A). Degšanas produkti, kuriem temperatūra ir līdzīga gāzveida produktu temperatūrai reakcijas zonā, neizstaro gaismu redzamajā spektrā, tāpēc liesmas starojuma izmaiņas saista ar reakcijas kinētiku. Sastāva, temperatūras un reakciju kinētikas izmaiņas laminārajā liesmā notiek vienlaicīgi, kas izraisa arī liesmas izplatīšanas ātruma izmaiņas visā liesmas garumā.



10. att. Lineārā CH<sub>4</sub> liesmas izplatīšanas ātruma atkarība no gaisa padeves pārsvara [154].

Kopsavilkumā par 1.2.3. un 1.2.4. apakšnodaļām vēlreiz jāuzsver, ka siltuma pievadīšana degmaisījuma sagatavošanas zonai ir ļoti nozīmīgs process, kas ietekmē degmaisījuma aizdegšanos un liesmas struktūras veidošanos. Siltuma pārnese degmaisījuma sagatavošanas zonā ir īpaši nozīmīga biomasas degšanas procesos, jo gāzveida fāzes eksotermisko ķīmisko reakciju rezultātā izdalītais siltums tiek patērēts ne tikai degmaisījuma uzsildīšanai un krekinga procesu ierosināšanai, bet daļēji arī uz biomasas sasilīšanu, žāvēšanu, biomasas termiskās sadalīšanās endotermisko procesu ierosināšanu un uzturēšanu. Turklāt liels siltuma daudzums zūd apkārtējā vidē gāzes siltuma vadīšanas un starošanas dēļ [153].

Ievērojot dažādu biomasu ķīmiskā sastāva (2. tab.), gaistošo vielu daudzuma (4. tab.), un biomasas komponentu termiskās sadalīšanas siltuma efektu atšķirības (2. att.), var secināt, ka garas liesmas veidošanos koksnes un salmu biomasas degšanas procesā nosaka intensīva holocelulozes sadalīšanās, veidojot gaistošo vielu plūsmu, kuras aizdegšanos aizkavē endotermiskais sadalīšanās siltuma efekts. Savukārt kūdras biomasas samazinātais, salīdzinot ar koksnes un salmu biomasu, gaistošo vielu daudzums, bet palielinātais fiksētā oglekļa daudzums, nodrošina vienmērīgu degmaisījuma veidošanos ar uzlaboto plūsmas sasilīšanu un rezultātā – ātrāku degmaisījuma aizdegšanos. Tāpēc liesmas garums, ko nosaka kūdras gāzifikācijas procesa gāzveida produktu



degšanas process, ir mazāks, salīdzinot ar liesmas garumu, kas veidojas koksnes vai salmu termoķīmisko pārvērtību procesā.

### 1.3. Liesmas virpuļplūsmas dinamika

Lai nodrošināt uzlabotu biokurināmā degšanas procesu un emisiju kontroli, biomasas degļu ražošanas tirgū pakāpeniski savu vietu ieņem degļi ar gaisa padeves virpuļplūsmām (vertikālām [155], [156] vai horizontālām [157]). Sistemātiski virpuļplūsmu veidošanās pētījumi ir apliecinājuši, ka to izmantošana paver iespējas kontrolēt un intensificēt degšanas procesu dinamiku, kontrolējot degvielas un gaisa plūsmu sajaukšanos un stabilizējot degšanas procesu, lai nodrošinātu pilnīgāku un efektīvāku degvielas sadedzināšanu [158]–[160]. Šo pētījumu rezultātā ir konstatēts, ka liesmas virpuļplūsmas dinamikas un tās struktūras veidošanās, kā arī degšanas procesu stabilitāte virpuļplūsmās ir būtiski atkarīga no virpuļplūsmas intensitātes, kuru nosaka plūsmas virpuļskaitlis (45. form.) degšanas kameras ieejā. Tā palielināšana ( $S > 0,6$ ) izraisa recirkulācijas zonas veidošanos liesmas centrālajā daļā, veidojot karsto degšanas produktu reversās plūsmas veidošanās virzienā uz degļa izeju, kas ierosina un stabilizē degvielas uzliesmošanu un degšanas procesa veidošanos [152], [161]–[164]. Palielinot virpuļskaitli, samazinās liesmas garums, bet palielinās degvielas komponentu temperatūra un to uzturēšanās ilgums recirkulācijas zonā, nodrošinot pilnīgāku degvielas sadedzināšanu [152], [164]. Tomēr ir jāatzīmē, ka virpuļskaitļa nekontrolēta palielināšana ( $S \gg 1$ ) var izraisīt degšanas procesa nestabilitātes veidošanos, ko izraisa recirkulācijas zonas precēsija [152], [164], [165], tāpēc aktualitāti ir ieguvuši pētījumi par virpuļplūsmu stabilizācijas iespējām pie maziem virpuļskaitļiem ( $0,4 < S < 0,6$ ) [159].

Promocijas darba ietvaros eksperimentālās iekārtās konfigurācijas veidošanai tika izmantota vertikāla simetriski-cilindriska konvergējoša sekundārā gaisa virpuļplūsma, ar kuras palīdzību tika nodrošināta labāka gaistošo vielu samaisīšanās ar degšanas kamerā pievadīto gaisu [166]. Plūsmas ātruma aksiālo un azimutālo komponentu eksperimentālie pētījumi kopā ar plūsmas matemātisko modelēšanu ļauj secināt, ka pie sekundārā gaisa padeves caur azimutālām sprauslām, kas novietotas degšanas kameras pamatnē, gaisa virpuļplūsma veidojās galvenokārt pie degšanas kameras sienām, kur plūsmas azimutālais ātrums un virpuļplūsmas intensitāte sasniedz maksimālo vērtību, bet liesmas centrālajā daļā dominē lamināras reakcijas zonas veidošanās. Plūsmas dinamikas veidošanās modelējošie pētījumi cilindriskā kanālā ļauj secināt [167], ka pie tangenciālās gaisa padeves degšanas kameras pamatnē, notiek virpuļplūsmas sadalīšanās, veidojot lejupvērstu virpuļplūsmu virzienā uz granulu virsmu, kur novēro intensīvu gaisa virpuļplūsmas sajaukšanos ar aksiālo gaistošo vielu plūsmu, kas veidojas biomasas termiskās sadalīšanās procesā, veidojot atstarotu gaisa un degvielas maisījumu degšanas kameras centrālajā daļā [160], [168]. Vienlaikus virpuļplūsmas centrālajā daļā virs azimutālā gaisa padeves sprauslas vērojama recirkulācijas zonas veidošanās ar negatīvu plūsmas aksiālo ātrumu [160], [163].

### 1.3.1. Virpuļplūsmas raksturošana - virpuļviesulis

Klasiskā virpuļplūsma tiek veidota kanālā, izmantojot kanāla centrā ievietotas gaisa virpuļplūsmas padeves sprauslas, pie nosacījuma, ja kanāla diametrs ir lielāks par gaisa virpuļplūsmas padeves sprauslas diametru. Šādas virpuļplūsmas struktūras veidošanos nosaka centrālās spēki, izraisot strauju virpuļplūsmas paplašināšanos un plūsmas centrālajā daļā veidojas zonas ar pazeminātu spiedienu (recirkulācijas zona), kas veicina aksiālas reversās plūsmas veidošanos plūsmas centrālajā daļā [152].

Izteikti atšķirīgas virpuļplūsmas struktūras veidošanās ir novērojama, ja gaisa azimutālā plūsma tiek padota pie liesmas pamata (11. att.). Šādai plūsmai ir izteiktā kontrakcija liesmas pamatā ar nelielu izplešanās virzienā uz liesmas centrālo daļu. Veidojoties degšanas zonai, plūsmas azimutālais ātrums pakāpeniski samazinās, veidojot liesmas frontes konusu. Šāda veida struktūru sauc par liesmas virpuļviesuli [121].

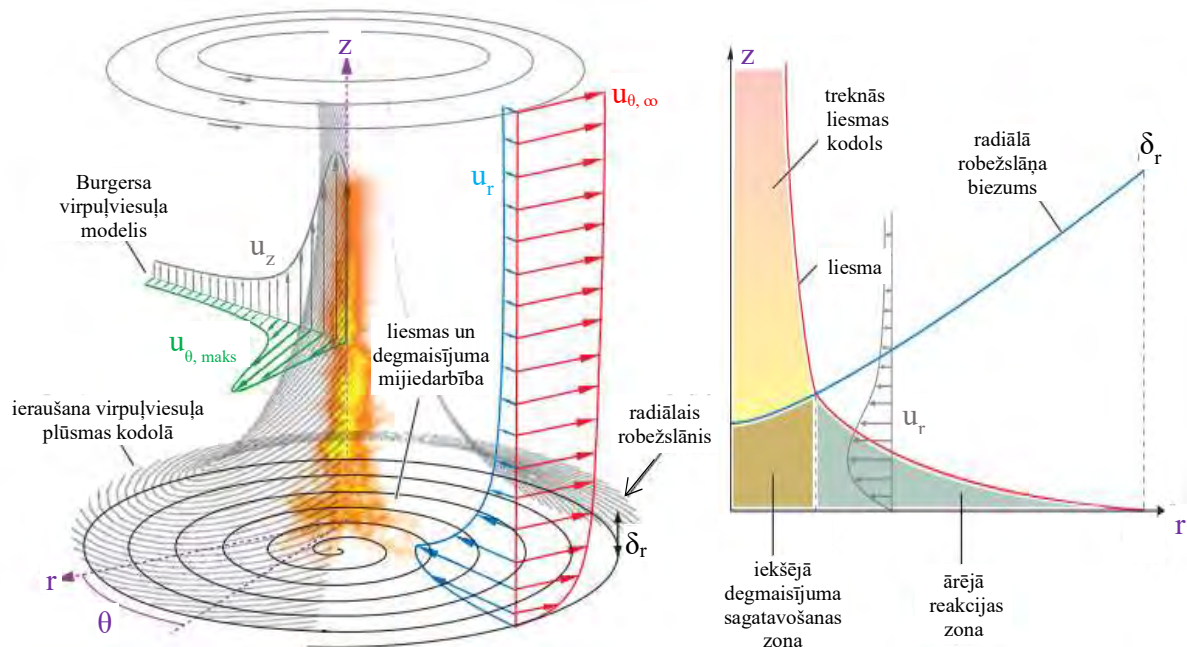
Liesmas virpulis ir viena no rūpnieciski visretāk lietotām plūsmas struktūrām, tomēr to veidošanos var novērot dažādiem vertikālajiem granulu degļiem, kuriem ar leņķi novirzītie gaisa pievadi ir iebūvēti degļa pamatnē, intensificējot gaistošo vielu samaisīšanos ar oksidētāju [155]. Virpuļviesuli raksturo aksiāla, azimutālā, radiālā ātrumu un savirpuļojuma parametru sadalījums cilindriskajās koordinātēs. 11. attēlā ir ilustrēta ātruma komponentu sadalījuma un virpuļviesuļa liesmas struktūras veidošanās, kas raksturojas ar platu radiālo robežslāni, kurā notiek degmaisījuma sagatavošana un samaisīšanās ar radiālo, uz centru virzīto gaisa plūsmu ( $z \leftarrow 0$  un  $u_r \approx \text{maks.}$ ). Šādas plūsmas veidošanos raksturo laminārs liesmas kodols ar degvielas pārsvaru liesmas centrālajā daļā ( $r/r_0 \leftarrow 0$ ), kur azimutālā ātruma komponente ir minimālā ( $u_\theta \approx \text{min.}$ ), bet aksiālā ātruma komponente sasniedz maksimālo vērtību ( $u_z \approx \text{maks.}$ ). Savukārt virpuļplūsmas intensitāte sasniedz maksimālo vērtību liesmas ārējā daļā, kur azimutālā ātruma komponente pieaug līdz maksimālai vērtībai, bet aksiālā komponente pakāpeniski samazinās. Radiālā robežslāņa veidošanās virpuļviesulim nodrošina ārējās reakcijas zonas veidošanos, kur notiek vienmērīga degmaisījuma sagatavošana ar tālāku tā ieraušānu virpuļplūsmas kodolā, kas uzlabo biomasas gaistošo vielu pārveidošanos un aizdegšanos [121].

Virpuļviesuļa ātruma komponentu attiecība palīdz raksturot virpuļplūsmu, izmantojot virpuļplūsmas intensitātes jēdzienu, kuru nosaka plūsmas virpuļskaitļa (45. form.) lielums. Virpuļskaitlis ir bezdimensionāls lielums, ko definē kā plūsmas kustības daudzuma azimutālā momenta ( $G_\theta$ ) aksiālās plūsmas attiecību pret plūsmas kustības daudzuma aksiālo momenta ( $G_z$ ) un sprauslas ekvivalentā rādiusa ( $r = D/2$ ) reizinājumu –  $G_z \cdot r$  [152]:

$$S = \frac{G_\theta}{G_z \cdot (D/2)} = \frac{\int_0^r (u_\theta \cdot r) \cdot \rho u_z \cdot 2\pi r \cdot dr}{\int_0^r u_z \cdot \rho u_z \cdot 2\pi r \cdot dr} \quad (44)$$

Praktiskam pielietojumam virpuļskaitļa aprēķiniem izmanto tuvinātu formulu [160], kas nodrošina labu atbilstību eksperimentālajiem rezultātiem:

$$S = \frac{2 G_\theta}{3 G_z} \approx \frac{2 u_\theta}{3 u_z} \quad (45)$$



11. att. Virpuļviesuļa forma ar ātruma komponentu izmaiņām liesmas garumā [121].

Virpuļviesuļa liesmas virpuļskaitļa maksimālā vērtība ir novērojama pie cilindriskā kanāla sienām. Šāda veida plūsmā, palielinot virpuļskaitli, azimutālais ātrums pieaug virzienā uz cilindriskā kanāla sienām, bet radiālais ātrums virzienā uz plūsmas centru samazinās, samazinot liesmas kontrakcijas efektu. Aksiālais ātrums pie kanāla sienām ir relatīvi liels jau pie maziem virpuļa skaitļiem un strauji palielinās, palielinot virpuļskaitli virs 0,6, samazinot plūsmas aksiālo ātrumu kanāla centrālajā daļā, kur veidojās centrālā toroidālā recirkulācijas zona ar reversu plūsmas aksiālo ātrumu [152], [161], [163], [164], veidojot samērā komplicētu plūsmas struktūru.

### 1.3.2. Virpuļviesuļa matemātiskā analīze

Virpuļplūsmas uzvedību šķidrums dinamikā apraksta Burgersa virpuļviesuļa vienādojumi – *Jan Burgers* vārdā nosaukts precīzs risinājums viskozas plūsmas raksturojošiem Navje-Stoksa vienādojumiem [169]. Burgersa virpuļviesulis raksturo stacionāru, pašlīdzīgu (*self-similar*) plūsmu. Iekšējā, radiālā plūsma tiecas koncentrēt savirpuļojumu šaurā kolonnā ap simetrijas asi. Tajā pašā laikā viskozitātes starpības izraisītā difūzija cenšas izplatīt savirpuļojumu uz plūsmas robežām. Stacionārais Burgersa virpuļviesulis rodas, kad abi efekti ir līdzsvaroti. Burgersa virpuļviesulis ilustrē virpuļveida izstiepšanas mehānismu un var raksturot tādas plūsmas, kur virpuļviesuli nodrošina nepārtrauktā ar konvekciju vadītā virpuļveida gāzes vilkme.

Precīzs telpiskā virpuļviesuļa modeļa risinājums, kurš apmierina Navje-Stoksa vienādojumu nosacījumus ir aprēķināts cilindriskās koordinātēs  $(r, \theta, z)$ , ievērojot aksiālo

simetriju un plūsmas lauku, kas saistīts ar asimetriskā stagnācijas punkta plūstamību (*point flow*) [169]:

$$u_r = -\frac{\sigma r}{2}, \quad (46)$$

$$u_\theta = \frac{\Gamma}{2\pi r} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\sigma r^2}{4\nu}\right) \right], \quad (47)$$

$$u_z = \sigma z, \quad (48)$$

kur  $\nu$  ir kinemātiskā viskozitāte,  $\sigma > 0$  ir parametra deformācijas ātruma tenzors viskozitātes starpību dēļ, jeb ātrums ar kuru mainās katrā no ātruma komponentēm. Klasiskajā Burgersa modelī stacionārajā režīmā, deformācijas ātrums un vektora  $\Gamma$  cirkulācija paliek konstantas. Virpuļviesuļa veidošanās raksturojas ar vienlaicīgu plūsmas aksiālā un azimutālā ātruma komponentes pieaugumu, tomēr radiālā ātruma komponente virzienā no cilindriskā kanāla sienām uz centru pa liesmas garumu pakāpeniski samazinās. Turklāt pati liesma rotē kā vesels ķermenis. Vektora cirkulāciju aprēķina pēc [121]:

$$\Gamma = \oint u \cdot dl = 2\pi \cdot r \cdot u_\theta, \quad (49)$$

Ja  $\sigma > 0$  un  $\Gamma > 0$  un nemainās laikā, plūsma ir nepārtraukta un plūsmas kustības momenta azimutālās komponentes Navje-Stoksa vienādojumu var aprēķināt pieņemot, ka plūsma bezgalībā uzvedās kā potenciāls virpuļviesulis, bet telpā ierobežots vienādojuma risinājums aprakstītu plūsmas rotācijas kustību. Tad plūsmas savirpuļojumu  $\omega$  tad aprēķina pēc [169]:

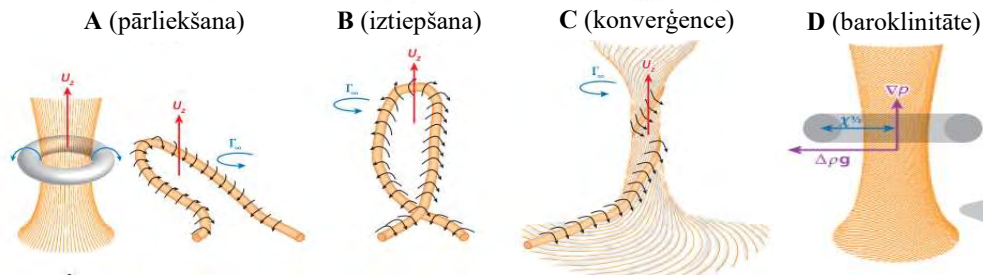
$$\bar{\omega} = \nabla \cdot \bar{u} = \omega \bar{e}_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru_\theta) \bar{e}_z = \frac{\Gamma}{4\pi\nu} \exp\left(-\frac{\sigma r^2}{4\nu}\right) e_z, \quad (50)$$

$$\omega_z = \frac{\Gamma}{4\pi\nu} \exp\left(-\frac{\sigma r^2}{4\nu}\right) \quad (51)$$

Šāds Navje-Stoksa vienādojumu atrisinājums attēlo kā plūsmas savirpuļojums atkarīgs no kustības vektora cirkulācijas, kuru veido azimutālās plūsmas ātrums. Regulējot azimutālās plūsmas kustības ātrumu var panākt virpuļviesuļa savirpuļojuma izmaiņas, izmainot virpuļviesuļa liesmas garumu un formu. Eksperimentālā iekārtā cilindriskās degšanas kameras siena ierobežo plūsmas azimutālo kustību, un veido izstiepto konverģējošo virpuļviesuli ar izteikti cilindrisku liesmas struktūru. Stacionārajā degšanas režīmā virpuļviesuļa parametri praktiski nemainās, ko apliecina arī plūsmas ātrumu komponentu mērījumi dažādos laika intervālos (sk. 2.1.2. apakšnodaļā).

Analizējot savirpuļojumu ar Navje-Stoksa vienādojumiem ( $\omega = \nabla \cdot u$ ) var dziļāk izprast galvenās virpuļviesuļa īpatnības. Dažāda tipa un izmēra virpuļviesuļu veidošanas procesam ir trīs svarīgie faktori: siltuma plūsmas kustība (sk. 1.2.4. apakšnodaļā), virpuļa veidošanas mehānisms, un virsmas velkme, kura veido robežslāni starp radiālo samaisīšanās zonu un centrālo virpuli. Virpuļviesuļa liesma uzvedās kā plūsmas notece, kur veidotā strūkļa dabiski paceļ horizontālo plūsmu radiāli pret centrālo virpuļa kolonu [121]. Svarīgākais elements virpuļviesuļa veidošanā ir

tieši virpuļa veidošanas mehānisms, kuru apzīmē ar dažāda veidā plūsmas savirpuļojuma ietekmējošiem faktoriem: liesmas pārliedšanu un izstiepšanu, baroklinitāti un tilpumspēka ietekmi (12. att.).



12. att. Virpuļviesuļa veidošanas mehānisms ar dažādu mijiedarbības spēku attēlošanu

Pārveidojot Navje-Stoksa un Burgersa vienādojumus *Forthofer* un *Goodrick* 2011. gadā izstrādāja vienādojumu, ar kuru raksturoja minēto faktoru ietekmi uz plūsmas savirpuļojumu [170]:

$$\frac{d\vec{\omega}}{dt} = \underbrace{(\vec{\omega} \cdot \nabla)\vec{u} - \vec{\omega}(\nabla \cdot \vec{u})}_{\text{pārliedšanās un izstiepšanās}} + \underbrace{\frac{1}{\rho^2} \nabla \rho \cdot \nabla p}_{\text{baroklinitāte}} + \underbrace{\nabla \cdot \vec{F}}_{\text{tilpumspēks}}, \quad (52)$$

kur  $F$  apzīmē tilpumspēkus. Pirmais vienādojuma loceklis, kurš apraksta liesmas pārliedšanās un izstiepšanās (12. att. – A, B), nosaka savirpuļojuma pārvietošanos pa liesmas garumu. Savirpuļojums liesmā tiek pārnests ar apkārt plūstošo azimutālā gaisa plūsmu. Šādā gadījumā  $(\vec{\omega} \cdot \nabla)\vec{u}$  paskaidro savirpuļojuma izstiepšanos liesmas ātruma gradientu dēļ. Tādā veidā pakāpeniskā horizontālā virpuļa pāreja vertikālajā virpuļplūsmā veido liesmas virpuļviesuli.  $\vec{\omega}(\nabla \cdot \vec{u})$  faktiski attēlo liesmas spriedzes efektu izstiepšanās vai saspiešanas dēļ, kas izraisa virpuļskaitļa samazināšanos vai palielināšanos. Plūsmas konverģējošais efekts koncentrē plūsmas savirpuļojumu tuvāk liesmas asij (12. att. – C), bet baroklinitāte (12. att. – D) šeit nozīmē savirpuļojumu pateicoties spiedienam un neatbilstošām blīvumu gradientu izmaiņām. Pēdējais vienādojuma loceklis apzīmē savirpuļojuma izmaiņas pateicoties ārējiem tilpuma spēkiem. Gravitācijas velkmes spēki, piemēram, izraisa liesmas izstiepšanos. Dziļāk iepazīties ar pārliedšanās un izstiepšanās efektu teorētisko daļu var darbos *Sharples et al.* (2015. g.) un *Simpson et al.* (2016. g.) [171], [172].

#### 1.4. Jonu veidošanās liesmā

Lai nodrošinātu degšanas procesa elektrodinamisko kontroli, svarīgi ir ne tikai izprast biomasas termokīmisko pārvērtību procesus un degšanas procesu dinamikas veidošanos virpuļplūsmās, bet ir nepieciešama izpratne par procesiem, kas saistīti ar jonu veidošanos biomasas termokīmisko pārvērtību laikā. Jonizācija ir process, kurā atomus vai molekulas pārvērš jonus, pievienojot vai atdalot elektronus no to tālākās orbītas. Jonizācija raksturojās ar aktivācijas

enerģiju, kura pārsniedz potenciāla starpības barjeru starp daļiņas parasto un jonizēto stāvokli. Enerģiju var pievadīt ar elektromagnētisko vilni vai daļiņu sadursmēs [21].

Jonu veidošanās biomasas termokīmisko pārvērtību procesā var būt saistīta arī ar ķīmisko reakciju veidošanos. Biomasas termiskās sadalīšanas rezultātā gāzveida fāzē izdalās ūdeņradis ( $H_2$ ), oglekļa (II un IV) oksīdi ( $CO_2$  un  $CO$ ), etilēns ( $C_2H_4$ ), acetilēns ( $C_2H_2$ ), metāns ( $CH_4$ ) un slāpekļa oksīdi ( $NO_x$ ). Tā kā ūdeņraža un oglekļa oksīda degšanas procesā jonu veidošanās ir nenozīmīga, galvenie jonu veidošanas avoti ir ogļūdeņraži. Metāns un acetilēns pētniecībā ir vispopulārākās gāzes liesmas jonizācijas fenomena izpētei, līdz ar to šajā jautājumā ir pieejami daudzi kvalitatīvi un padziļināti pētījumi [173]–[175]. Kā izriet no liesmas struktūras veidošanās analīzes (sk. 1.2. nodaļā), liesmas struktūras veidošanos nosaka trīs telpiski atdalītas zonas: degmaisījuma sagatavošanas zona, liesmas reakcijas jeb hemiluminiscējošā zona un degšanas produktu difūzijas (dūmgāžu) zona, kur dažādu reakciju skaits ir ievērojami mazāks [112], [113].

Reakcijas zonai ir raksturīga ļoti augsta reaģējošu vielu koncentrācija, kas raksturojas ar ierosinātu  $C_2$  un  $CH$  radikāļu veidošanos ogļūdeņražu liesmās. To daudzums daudzkārt pārsniedz līdzsvara koncentrācijas, un, ņemot vērā to reaktivitāti, ierosināto radikāļu veidošanās, spēlē lielu lomu liesmas dabiskās jonizācijas procesa veidošanā. Dabiskās jonizācijas terminu lieto, lai apzīmētu jonizāciju, kas notiek tīrā ogļūdeņražu liesmā bez piemaisījumiem un bez ārējo spēku ietekmes. Dabiskā jonizācija ir ierobežota ar reakcijas zonu, kuras jonizācijas pakāpe ievērojami pārsniedz gāzes daļiņu jonizācijas pakāpi, ko nosaka termodinamiskais līdzsvars sistēmā [21].

Interesanta dūmgāžu gāzu īpašība ir tā, ka tie bieži satur brīvus radikāļu  $H$ ,  $OH$  un  $O$  pārpalikumus, kuru pārgrupēšanas ātrumu ierobežo lēnie triju ķermeņu sadursmju procesi [115], [142], [148]. Atšķirībā no radikāļiem, kas veidojas ogļūdeņražu reakcijas zonās, radikāļi, kuru klātbūtne ir konstatēta dūmgāzēs, nespēj radīt nekādu manāmo dabisko jonizāciju. Tomēr tie var piedalīties jonizēšanas reakcijās ar metālu piedevām, īpaši sārmainajiem metāliem [139], tādējādi ietekmējot jonizācijas procesa veidošanos.

Jonizācijas mehānismus un jonizācijas reakcijas ir nepieciešams izpētīt, lai spriestu par noteikto jonu veidošanās varbūtību konkrētajā liesmas zonā, turklāt informācijas par jonu dabu un to koncentrāciju palīdz pareizi izvēlēties vietu liesmā, lai ievietotu elektrodu, kurš ar ārējiem elektriskiem spēkiem var izmainīt liesmas veidošanās dinamiku. Turpmākajās apakšnodaļās apskatīti vairāki mehānismi, kas nosaka jonu veidošanos liesmā, ka arī dažādu jonu koncentrācijas sadalījuma veidošanos pa liesmas garumu.

#### 1.4.1. Liesmas jonizācijas mehānismi

Jonu veidošanās parādību liesmā ir mēģināts izskaidrot ar vairākām teorijām, tomēr ir konstatēts, ka jonu veidošanās ogļūdeņražu liesmā ir saistīta ar sarežģītu ķīmisko reakciju kopu [176]–[178]. Gāzes daļiņu ķīmiskā jonizācija degšanas procesā veidojas ķīmiskas reakcijas rezultātā, kurā atbrīvojas pietiekami daudz enerģijas, lai jonizētu izveidotos produktus, veidojot jonus vai jonu, neitrālu daļiņu un elektronu. Ķīmiskā jonizācija ir unikāls process, kas ir atkarīgs ne tikai no temperatūras, bet arī no ķīmiskās saites veida, savienojumu dabas un reaģentu

enerģētiskā stāvokļa. Šis jonizācijas mehānisms ir īpaši svarīgs ogļūdeņražu liesmām, ir sastopams tieši luminiscējošā zonā un ir atzīts kā galvenais jeb primāro jonu veidošanās avots [114], [139]:



kur  $A$  un  $B$  var norādīt uz atomiem, molekulām vai molekulu daļām,  $A^*$  ir atomu, molekulu vai molekulu daļas ierosināts stāvoklis,  $e^-$  ir elektrons.

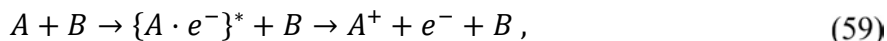
Protona  $H^+$  pārnese ir nākamais svarīgais jonizācijas mehānisms, kurš sastopams tuvāk pirolīzes zonai vai tieši pēc liesmas luminiscējošās zonas. Protona pārnese notiek vai no protonētas molekulas uz neitrālu molekulu (55. reakc.), vai no neitrālas molekulas uz negatīvu jonu (56. reakc.). Protonu pārneses reakcijas siltums var būt tik ir liels, ka produktā var parādīties iekšējā enerģija, kas var būt pietiekama, lai izraisītu disociāciju, zaudējot vienu molekulas fragmentus. Praktiski jebkuru molekulu var ķīmiski jonizēt ar atbilstošu protonu donoru [179].



Ūdeņraža (H) atoma pārneses reakcija atšķirās no protona pārneses ar to (57. reakc.), ka šī reakcija var izraisīt nepiesātinātu pozitīvu vai negatīvu jonu hidrogenāciju. Šī reakcija, kā arī pozitīvo ogļūdeņražu jonu ( $R^+$ ) pievienošanas reakcija (58. reakc.), bieži notiek pie izteiktas degvielas pārsvara gaisa-degvielas maisījumā [179] [180].



Jonizācija ar daļiņu sadursmi (trīcienjonizācija) notiek, ja kinētiskās enerģijas pārvērtību procesā tiek pārsniegts daļiņu jonizācijas potenciāls. Daļiņu kinētisko enerģiju var izmainīt termiski [181] vai ar citādiem līdzekļiem (parasti ar stiprā elektriskā lauka iedarbību). Piespiestā sadursmē viena paātrinātā daļiņa – atoms, molekula (59. reakc.) vai elektrons (60. reakc.), izsūt elektronu no otrās daļiņas, veidojot jonus [180]. Elektrons, kas atduras pret molekulu ar diviem atomiem, var izraisīt gandrīz pilnīgu kinētiskās enerģijas pārvēršanu iekšējā enerģijā [21].



Ja jonizācijai nepieciešamā enerģija ir zemāka par ķīmiskās jonizācijas vai trīcienjonizācijas enerģiju, elektronu pievienošana arī var radīt negatīvus jonus, bet kinētiskā enerģija var būt izkļiedēta starojuma veidā (61. reakc.) vai arī sadursmē ar nereaģējošu trešo ķermeni (62. reakc.). [21].



Elektrona pievienošanai pastāv arī pretējs process – elektrona asociatīvā zaudēšana vai elektrona atvienošanās jonu un neitrālā ķermeņa sadursmes dēļ [179]:



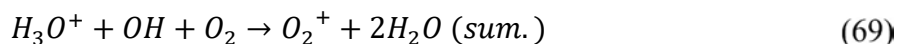
Reakcijas ar joniem un neitrālām molekulām var izraisīt arī ķīmisko pārkārtošanās ar lādiņa pārnesei (64.–65. reakc.). Elektronu pārnese ir novērojama tikai trīs un vairāk atomu molekulām [179] [180].



Trīs ķermeņu sadursmē var veidoties arī jauns savienojums, kurš manto prekursora jona lādiņu (66. reakc.). Tā pat kā elektrona pievienošanas gadījumā trešais ķermenis nepiedalās reakcijā, bet kalpo kā lādēta jona nesējs savu stipro elektrostātisko spēku dēļ [179] [180].



Lādiņa pārnese var notikt arī jonu sadursmēs ar radikāliem. Šis process ietver trīs ķermeņu mijiedarbību, kad, piemēram, sadursmēs ar OH radikālu vienlaicīgi notiek gan ūdeņraža atoma atvienošanās, gan lādiņa pārnese:



Atkarībā no degšanas apstākļiem un pelnu/kvēpu veidošanās liesmā var veidoties arī citi lādiņa nesēji – organiskās vai neorganiskās dabas citās daļiņas (*PAH*), kuriem piemīt īpašība piesaistīt vai emitēt no virsmas elektronus. Šādas daļiņas var piedalīties ķīmiskās reakcijās un lādiņa pārnese ar joniem, ietekmējot jonu kopējo daudzumu liesmā [138].

Jonu veidošanās kinētikā ir svarīgi arī pretējie procesi – jonu piesaiste un to rekombinācija, kuru rezultātā notiek lādiņa pārnese no liesmas uz elektrodu un arī no vienas lādētas daļiņas citai, neitrālai. Jonu rekombinācijas procesu uz elektroda virsmas var uzskatīt vairāk par pozitīvo radītāju, tas ir patvaļīgs process, kurš veidojas gāzes masas pārnesei dēļ uz elektrodu, tomēr rekombinācijas procesi starp daļiņām gāzes plūsmā negatīvi ietekmē liesmas jonizāciju, jo šo procesu dēļ liesmas lādiņa blīvums izteikti samazinās [138]. Kā apgalvoja *Calcote* (1988. g.), stehiometriskām liesmām un liesmām ar  $\alpha \approx 0,9-1,0$  rekombinācijas procesu ātrums maz atšķiras, tomēr, pārsniedzot kvēpu veidošanas robežu ( $\alpha < 0,4$ ), liesmām ar stipru gaisa iztrūkumu jonu rekombinācija stipri paātrinās, un jonu strāvas blīvums krīt. Savukārt liesmā ar gaisa padeves pārsvaru ( $\alpha > 1,2$ ) rekombinācija ir visvājākā, jo samazinās kopējais reaģējošo radikālu, jonu un molekulu daudzums plūsmā, un konsekventi samazinās arī rezultatīvo sadursmju skaits [138]. Kā jau bija minēts, organiskās un neorganiskās sīkdispersās daļiņas, kuras veidojas neoptimālā degšanas procesā vai degvielas piemaisījumu dēļ, var saistīt jonus un elektronus vai vispār neitralizēt tos. Joni var veidot hidrātus tvaika vidē, kondensēties kopā ar kvēpu struktūrām vai



neitralizēties uz metāla virsmām [138]. Gāzveida fāzē vienmēr notiek arī patvaļīgie rekombinācijas procesi, kuri vēl stiprāk izpaužas elektriskā lauka ietekmē – lādētas daļiņas paātrinās elektrisko spēku ietekmē lauka virzienā, savstarpēji saduras un virzās pretēja potenciālā virzienā, reducējoties uz metāliskām elektroda vai kurtuves sienām [21].

Papildus jonu veidošanās ķīmiskajiem mehānismiem, kas rodas gāzes fāzē, pastāv arī mehānismi, kuru rezultātā rodas elektronu emisija (termiskā, lauka ietekmē un fotoemisija) no virsmas [21]. Termiskā emisija ir intensīva molekulu ierosināšana uz virsmas, kā rezultātā elektroni pārvar saites potenciālu un atbrīvojās no materiāla virsmas. Elektriskais lauks papildus var uzlabot elektronu emisiju, orientējot polārās molekulas (pastāvīgais elektriskais lauks), vai iesvārstot molekulāro režģi (mainīgais elektriskais lauks) [87]. Turklāt ir konstatēts, ka šo mehānismu ietekme uz kopējo ogļūdeņražu liesmas jonizāciju ir pārāk zema, lai to varētu izvērtēt, tāpēc vispārīgi ir pieņemts liesmas jonizācijas ķīmiskais mehānisms [138], [182].

#### 1.4.2. Ogļūdeņražu liesmas pozitīvie joni

Promocijas darba ietvaros elektriskā lauka un liesmas mijiedarbības izvērtēšanai vairāk tiek apskatīti liesmas pozitīvo jonu veidošanas virzieni, jo pēc dažiem datiem elektroni liesmā veido līdz 90 % no kopēja negatīvā lādiņa [177], turklāt pozitīvie joni liesmā veidojas daudz vairāk par negatīviem [173], [174]. Negatīvo jonu veidošanas mehānismi aprakstīti 6. pielikumā.

Masas spektrometra izgudrojums *Knewstubb* un *Sugden* pētniekiem 1959. gadā [182] un nedaudz vēlāk *Hand* un *Kistiakowsky* pētniekiem 1962. gadā [114] ļāva identificēt dažādu jonu veidošanos liesmā. Šo pētnieku paralēli veiktie neatkarīgie eksperimentālie pētījumi ļāva secināt, ka primārais jons, kas veidojas ogļūdeņražu liesmā, ir formil katjons ( $\text{CHO}^+$  jeb  $\text{HC}\equiv\text{O}^+$ ). Vēlāk arī *Gardner et al.* [183], [184] pierādīja, ka  $\text{CHO}^+$  jonu var uzskatīt kā primāro jonu, kas veidojas ķīmiskās jonizācijas rezultātā (53.–54. reakc.), vēlreiz apstiprinot *Knewstubb* un *Sugden* hipotēzi par  $\text{CHO}^+$  veidošanos pēc sekojošās reakcijas:



kur metilidēna radikāls (CH) neierosinātā vai ierosinātā stāvoklī reaģē ar skābekļa atomu, veidojot formil katjonu un elektronu. Līdz ar to šobrīd ir vienošanās par galveno ķīmiskās jonizācijas mehānismu ogļūdeņražu liesmā, tomēr, vai reakcija vairāk notiek ar ierosināto vai neierosināto metilidēna radikālu, joprojām ir diskusiju jautājums [185], [138].

*Calcote* savā darbā arī novērojis, ka formil katjons ļoti spēcīgi piedalās jonu-molekulu reakcijās ar protona pārnesei (55.–56. reakc.), kuru dēļ veidojās citi stabilāki joni, piemēram, hidroksonija jons ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ), turklāt paša formil katjona daudzums liesmā strauji samazinās [175]:



Pilnais hidroksonija veidošanās un rekombinācijas mehānisms tika pētīts arī *Green* 1963. g. darbā [186], noskaidrojot, ka hidroksonija jona rekombinācija ir daudz lēnāka par tā veidošanas reakcijām, padarot to par stabilāko pozitīvo jonu liesmā. *Goodings et al.* 1979. gadā eksperimentāli

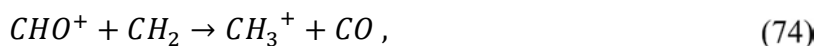
noteica, ka hidroksionija jons [174] un tā hidrāti [187] ir dominējošie joni liesmas plūsmā, savukārt *Prager et al.* 2007. gadā metāna degšanas modelēšanas pētījumi konstatējuši, ka līdz 99 % formil katjona daudzuma ūdens tvaika klātbūtnē var pārveidoties par hidroksionija jonu [177].

*Blades et al.* secināja, ka nepiesātinātu ogļūdeņražu (īpaši acetilēna) liesmā ir novērojama augstāka jonizācijas pakāpe, salīdzinājumā ar alkānu un izoalkānu liesmu, kura nav saistīta ar CH radikālu hemilumiscenci [188]. *Knewstubb* un *Sugden* uzskatīja, ka galvenais iemesls augstākai acetilēna liesmas jonizācijas pakāpei ir propargil katjona ( $C_3H_3^+$  jeb  $CH_2=C=CH^+$ ) īpašais veidošanas mehānisms [138], [174], [185] (pēc 56. reakcijas mehānisma):

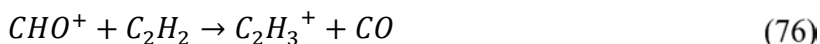


kurā ierosinātais metilidēna radikāls reaģē ar nepiesātināto acetilēna molekulu, veidojot stabilu jona struktūru, pateicoties lādiņa izkliedei starp konjugētām divkāršām saitēm. Savukārt, *Vinckier et al.* 1977. gadā, ar ārējo elektrisko lauku secināja, ka propargil katjons tomēr nav primārais liesmas jonizācijas avots [184]. Pašlaik 86. reakcijas mehānisms tiek uzskatīts kā papildus jonu veidošanas mehānisms liesmā ar degvielas pārsvaru. Turklāt intensīvo acetilēna liesmas jonizāciju joprojām saista (pēc *Shuler* un *Weber*) ar paaugstinātu kvēpu daļiņu veidošanās procesu [138], [139].

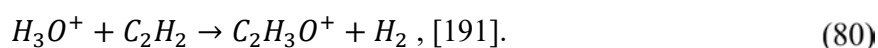
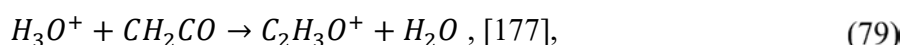
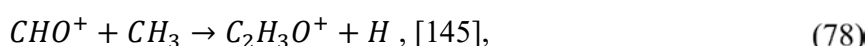
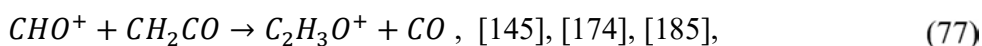
*Eraslan* 1988. gadā piedāvāja propargil jona veidošanās mehānismu (74.–75. reakc.) ar metila jonu ( $CH_3^+$ ) kā starpproduktu [189], kur reakcijā ar metilēna ( $CH_2$ ) radikālu protona piesaistē veidojās metila jons, bet tālāk metil jons reaģē ar acetilēna molekulu [186], [189], kas pieejama gāzes maisījumā kā bāzes kurināmais, vai var veidoties jebkurās gāzes degšanas procesā (pat no metāna) [142]:



Ir konstatēts, ka pat 0,2 % acetilēna koncentrācija liesmā izraisa aktīvo propargil jona veidošanos [186]. Formil jona tiešā reakcija ar acetilēnu noved pie vinīl ( $C_2H_3^+$  jeb  $CH\equiv CH_2^+$ ) jona veidošanās, kuru *Vinckier et al.* novēroja kā stipru signālu eksperimentālos pētījumos ar masas spektrometru [184]:

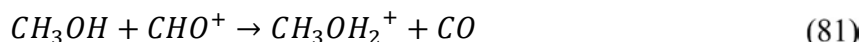


Nākamais pozitīvs jons, kuru vairāki pētnieki atzīmēja pietiekami lielos daudzumos (liesmā ar gaisa padeves pārsvaru) degšanas zonā ir acetil jons ( $C_2H_3O^+$  jeb  $CH_3C\equiv O^+$ ) [175], [178], [190], [191], kurš var veidoties vairākos procesos (77.–80. reakc.), piemēram, formil jona reakcijā ar ketēna radikālu:



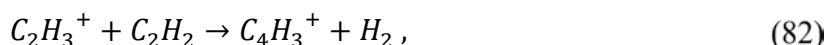
*Nicholson et al.* atzīmēja, ka acetil jons var veidoties kā ūdeņraža atoma pārnēsē (64.–65. reakc.), kā arī lādiņa pārnēsē ar citu jonu (64.–65. reakc.) [116], jo pats acetil radikāls var veidoties liesmā metil ( $\text{CH}_3$ ) vai metilēn ( $\text{CH}_2$ ) radikāla reakcijā kopā ar oglekļa oksīdu ( $\text{CO}$ ) [192].

Degvielas un gaisa samaisīšanas zonā bieži novēro arī organisko spirtu molekulas un to jonus, piemēram, metiloksonija jonu ( $\text{CH}_3\text{OH}_2^+$ ), kurš veidojas protona pārnēses reakcijā pie spirta skābekļa [174]:

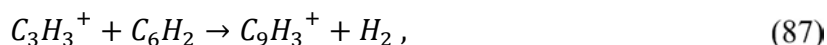
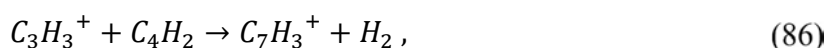
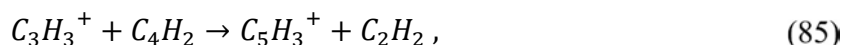
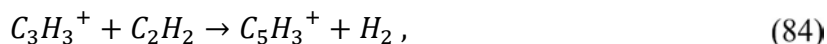


Stehiometriskajā liesmā 85 % no kopēja pozitīvo jonu lādiņa blīvuma ieņem hidroksionija, propargil un acetil joni [145], turklāt *Starik et al.* savos skaitliskās modelēšanas darbos uzskatīja [176], [190], ka pozitīvā lādiņa blīvuma veidošanā savu lomu spēlē arī slāpekļa (II) oksīda ( $\text{NO}^+$ ) joni, kurus arī eksperimentāli propāna liesmā novēroja *Rodrigues et al.* [178].  $\text{NO}^+$  joni ir stabili, jo plūsmā tie parasti atrodami savā hidratētā formā, un to koncentrācija pieaug liesmas plūsmā.

Ir nepieciešams arī minēt lielākas masas ogļūdeņražu jonus, kuri veidojas no pamata joniem, pieaugot oglekļa ķēdei ( $\text{C}_{2n}\text{H}_{2n+1}$ ) vai kondensācijas procesos ( $\text{C}_{2n}\text{H}_{2n-1}$ ) [138], [184], [189]:



Turklāt, treknā degvielu-gaisa maisījumā ķēdes augšanā piedalās arī propargil joni [189]:



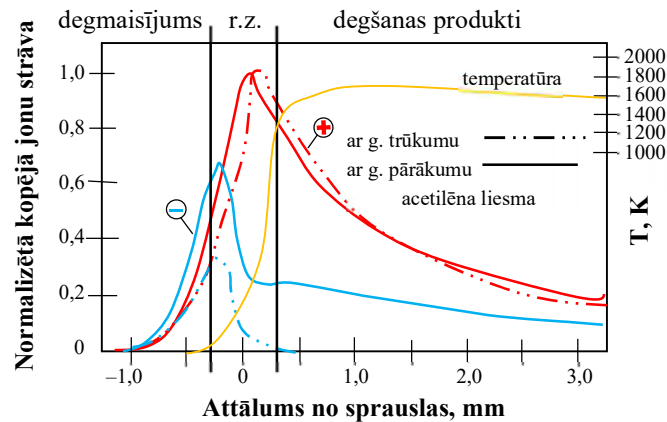
kur, pieaugot oglekļa ķēdei, ūdeņraža saturs molekulā pakāpeniski samazinās, pieaug nepiesātinātu saišu skaits un veidojās molekulārā poliaromatiskā struktūra [138], [193]. Netālu no liesmas reakcijas zonas veidojās tādi joni kā  $\text{C}_5\text{H}_3^+$ ,  $\text{C}_{13}\text{H}_9^+$ ,  $\text{C}_{21}\text{H}_{11}^+$ ,  $\text{C}_{33}\text{H}_{15}^+$  un citas poliaromatiskās struktūras ( $\text{PAH}^+$ ) joni [193]. Šādu struktūru aglomerāti veido lādētas kvēpu daļiņas [138]. Pilnais pozitīvo jonu veidošanās mehānisms ir apkopots shēmā 5. pielikumā.

### 1.4.3. Jonu koncentrācija un sadalījums ogļūdeņražu liesmā

Jonu koncentrācijas sadalījums pa liesmas garumu un platumu [173], [194] daļēji raksturo spēku, ar kuru ārējais elektriskais lauks potenciāli var ietekmēt liesmas veidošanas dinamiku (sk. 1.5.3.–1.5.4. apakšnodaļā). Savukārt jonu veidošanas process ir stipri saistīts ar liesmas reakciju virzienu un kinētiku (sk. 1.2.2. un 1.4.2.–1.4.3. apakšnodaļās), no kā izriet, kā dažādās liesmas vietās ir sagaidāmas jonu strāvas izmaiņas. Šī informācija potenciāli var sniegt zināšanas par optimālo liesmas iedarbības zonu ar elektriskiem laukiem un labvēlīgākus apstākļus maksimālā elektriskā spēka sasniegšanai.

*Calcote et al.* veicis detalizētus acetilēna liesmas jonizācijas mērījumus [175], [185] un konstatējis, ka jonu strāva liesmā var sasniegt aptuveni  $10^{-8}$  A, bet lādiņa blīvums ogļūdeņražu liesmā var sasniegt  $\approx 10^{10}$   $\text{cm}^{-3}$ , tomēr dažādām ogļūdeņražu degvielām jonu koncentrācija var mainīties robežās no  $10^8$  līdz  $10^{12}$   $\text{cm}^{-3}$ . *Goodings et al.* [173], [174] un *Guo et al.* [195] eksperimentālie pētījumi ar metāna–gaisa liesmām, ka arī *Pedersen et al.* [191], *Vinogradov et al.* [196], *Brown et al.* [145], *Starik et al.* [176], [190], *Rodrigues et al.* [178] un citu zinātnieku grupu skaitliskie pētījumi arī norāda lādēto daļiņu blīvuma vērtības, kas ir tuvas šim diapazonam.

*Prager et al.* secināja, ka pozitīvo jonu masas koncentrācija liesmā ir desmit reizēs lielāka nekā negatīvo, turklāt kopējais negatīvi lādēto daļiņu skaits, pateicoties lielam brīvo elektronu skaitam (līdz 90 %) stehiometriskajā liesmā ir tikai uz pusi mazāks salīdzinot ar pozitīvi lādēto daļiņu skaitu [177]. *Goodings et al.*, savukārt, eksperimentāli pierādīja, ka negatīvo daļiņu koncentrācija liesmas reakcijas zonā ir tikai par 30 % mazāka par pozitīvo jonu koncentrāciju, tomēr aiz reakcijas zonas šī starpība mainās no 75 % līdz 50 % (13. att.). Relatīvi nelielā elektronu koncentrācija reakcijas zonā, salīdzinot ar pozitīvo jonu koncentrāciju, ir skaidrojama ar augsto elektronu mobilitāti un to tieksmi ātri difundēt no liesmas reakcijas zonas uz degmaisījuma sagatavošanas zonu vai pretējā virzienā uz karsto zonu, kur tie piedalās jonu-molekulu reakcijās [177], [178]. Tomēr, tā kā liesmas struktūra ir ļoti jutīga pret degšanas apstākļu izmaiņām, dažreiz novēro arī potenciāla sadalījuma izmaiņas liesmā [138].



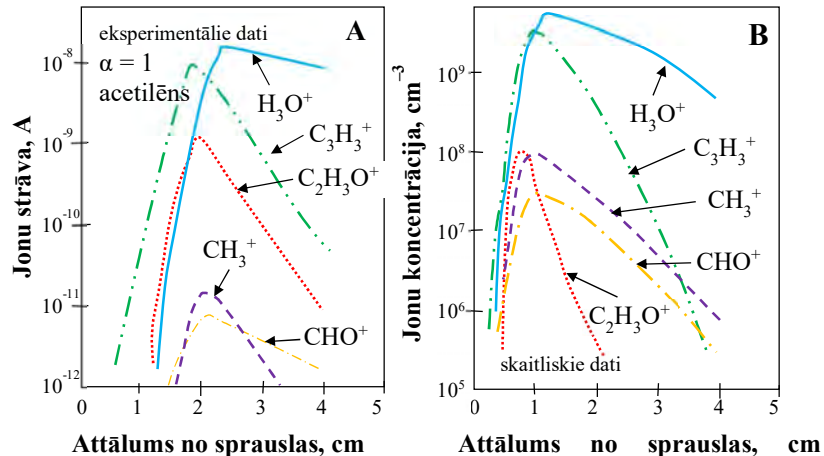
13. att. Pozitīvo un negatīvo lādēto daļiņu strāvas sadalījums pa liesmas garumu [173], [189].

Pozitīvo jonu daudzums metāna liesmā var sasniegt no  $1,3 \cdot 10^{10}$   $\text{cm}^{-3}$  līdz  $4,0 \cdot 10^{10}$   $\text{cm}^{-3}$  [174], turklāt negatīvo daļiņu daudzums pēc *Prager et al.* pētnieku grupas datiem ir aptuveni  $3 \cdot 10^{-9}$  –  $6 \cdot 10^{-9}$   $\text{cm}^{-3}$  [177]. Brīvo jonu masa un to kustīgums ietekmē kopējo elektriski lādēto daļiņu koncentrāciju un lādiņa blīvumu liesmā, turklāt negatīvi lādēto daļiņu kopējo daudzumu veido negatīvo jonu un elektronu kopa, kuriem ir stipri atšķirīgs kustīgums, tāpēc eksperimentālie un skaitliskie dati par kopējo pretēji lādēto daļiņu daudzumu ir tik dažādi.

Vislielākā pozitīvo jonu koncentrācija, atbilstoši *Delfau* un *Michaud* (1979. gads), ir novērojama acetilēna-gaisa liesmās pie  $\alpha \approx [0,9; 1,0]$  un ir vienāda ar  $7,4 \cdot 10^{10}$   $\text{cm}^{-3}$  [138].

*Boothman et al.* salīdzināja piesātinājuma strāvas dažādām ogļūdeņražu liesmām un noskaidroja, ka augstā jonizācijas pakāpe novērojama ne tikai acetilēna, bet arī citu nepiesātinātu ogļūdeņražu liesmās. Piemēram, etilēna liesmā (pie  $\alpha \approx [0,9; 1,0]$ ) piesātinājuma strāva ir divās reizēs lielāka, salīdzinot ar etāna liesmas strāvu [197]. *Lawton* un *Weinberg* arī atzīmēja, ka nepiesātinātiem ogļūdeņražiem piemīt augstāka jonizācijas pakāpe (vājākā jonu veidošanās bija novērojama metāna liesmai), tomēr interesantākais viņu darbā bija secinājums, ka turbulentās liesmās jonu strāva var palielināties pat divas reizes [198]. Šis efekts ir skaidrojams ar degšanas virsmas laukuma palielināšanos (31. form.), un netieši liecina par to, kā joni galvenokārt veidojās liesmas reakcijas zonā vai ļoti tuvu tai.

1955. gadā *Kinbara* un *Nakamura* secināja, ka liesmas jonizācijas sadalījums nesakrīt ar temperatūras sadalījumu, jo jonizācija visstraujāk notiek zaļganzilā liesmas luminiscējošā zonā, kur temperatūra tikai sāk pieaugt (13. att.), tomēr viskarstākajā liesmas zonā, kur ir novērojams zili-violetš (stehiometriskajā liesmā) vai sarkani-dzeltens gaismas starojums, jonu saturs strauji samazinās [182]. Pašlaik ir skaidra sakarība starp jonu strāvas maksimumu piesātinājuma stāvoklī un ierosinātā  $\text{CH}^*$  radikāla hemiluminescences zonas izvietojanos liesmā [114], [188], jo  $\text{CH}$  un  $\text{CH}^*$  radikāli tiek uzskatīti par galvenajiem jonu veidošanas avotiem. *Kinbara*, *Nakamura*, *Kadišev* un *Dokučajeva* 1961. gadā šo sakarību eksperimentāli pierādīja ar aksiālā un radiālā strāvas sadalījuma mērījumu palīdzību [182].

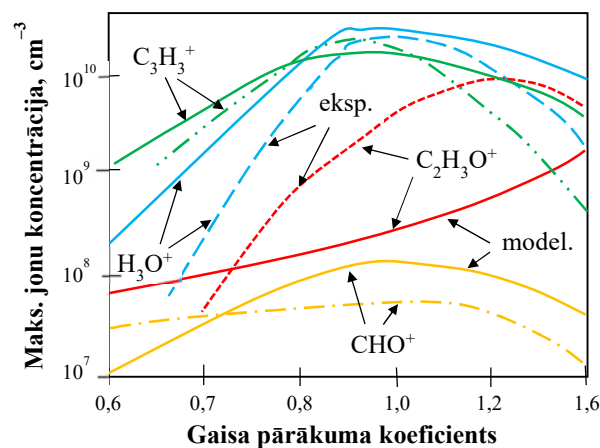


14. att. Jonu koncentrācijas sadalījums pa liesmas garumu [175] [145] [138] [194].

*Calcote et al.* noteica, ka šajā strāvas piesātinājuma zonā atrodas  $\text{H}_3\text{O}^+$ ,  $\text{C}_3\text{H}_3^+$  un  $\text{C}_2\text{H}_3\text{O}^+$  jonu koncentrācijas maksimumi (14. att. – A, B) gan pie gaisa trūkuma gan pie gaisa pārsvara degmaisiņumā [175]. *Knewstubb* un *Sugden* 1959. gadā secināja, ka dominējošais  $\text{H}_3\text{O}^+$  jons veidojas strauji pēc reakcijas zonas [182], savukārt *Calcote*, *Goodings* un *Bohme* papildināja, ka  $\text{H}_3\text{O}^+$  jonu var novērot pietiekoši tālu no degļa izejas (7. pielik. 10. att. – A), pateicoties savai stabilai hidratu kompleksu ( $\text{H}_3\text{O}^+ \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) struktūrai [175], [174]. *Prager et al.* 2007. gadā skaitliski to apstiprināja, ievērojot, ka  $\text{C}_2\text{H}_3\text{O}^+$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}_2^+$  un citu jonu koncentrācijas ir vismaz par 60% mazākas, salīdzinot tos ar  $\text{H}_3\text{O}^+$  jonu koncentrāciju [177]. Salīdzinot iegūtos liesmas jonizācijas

sadalījuma aprēķinu rezultātus ar *Calcote et al.* eksperimentālajiem datiem, *Brown et al.* novēroja eksperimentāla jonu sadalījuma maksimumu nobīdi un nelielu vērtību samazināšanos atkarībā no liesmas siltuma zudumu daudzuma, konstatējot, ka, lai gan liesmas jonizācija nav atkarīga no temperatūras [182], tā ir atkarīga no siltuma pārneses degmaisījuma sagatavošanas zonā [145]. Šo secinājumu apstiprināja daļēji oksidēto ogļūdeņražu jonu, piem.,  $C_2H_3O^+$  un dažādu hydrogenēto jonu, piem.,  $CH_3OH_2^+$ , būtiskās koncentrācijas konstatēšana degmaisījuma sagatavošanas zonā (7. pielik. 10. att. – A). [174].

Savā eksperimentālajā darbā par negatīviem joniem *Goodings* un *Bohme* novēroja, ka negatīvo jonu daudzums liesmā ir par 40–60 % mazāks, salīdzinot ar pozitīvo jonu kopējo daudzumu [173]. Tomēr *Prager et al.* secināja, ka liesmas reakcijas zonā negatīvo lādiņu pārsvarā veido elektroni, bet negatīvo jonu koncentrācija ir aptuveni desmit reizēs mazāka par pozitīvo jonu koncentrāciju [177]. Zondes metodes mērījumi liecina [185], ka elektronu koncentrācija sasniedz pozitīvo jonu koncentrācijas vērtību tikai plānā reakcijas zonas slānī, bet tālāk, pēc reakcijas zonas, elektroni pēc trīs ķermeņu pievienošanās mehānisma (62. reakc.) ātri pārveidojas par stabilākiem negatīviem joniem (6. pielik. 9.att.). Eksperimentāli reakcijas zonā tiek konstatēti tādi joni kā  $OH^-$ ,  $O_2^-$ ,  $O^-$ ,  $CHO_2^-$ ,  $C_2HO^-$  un  $C_2H^-$  (7. pielik. 11.att.), kuri veidojas lādiņa vai protona pārneses procesā, bet tālāk liesmas plūsmā vislielāko koncentrāciju sasniedz  $CO_3^-$  [173]. *Starik et al.* skaitliskajā modelēšanā konstatēja, ka liesmā var veidoties oglekļa oksīdu joni ( $CO_3^-$  un  $CO_4^-$ ), slāpekļa oksīdu joni ( $NO_2^-$  un  $NO_3^-$ ), kuru daudzums ir pietiekams, lai summā kopā ar elektroniem un pozitīviem joniem sasniegtu liesmas elektrisko neitralitāti [176]. *Rodrigues et al.* darbā no negatīvajiem joniem arī visvairāk tiek atzīmēti  $CO_3^-$  un  $HCO_3^-$  [178].



15. att. Jonu koncentrācija acetilēna liesmā atkarībā no degvielas-gaisa attiecības [145], [199]

Dabagāzes vai propāna gāzes degļos ir iespējams nodrošināt degšanas režīmus, kas ir tuvi stehiometriskam, tomēr biomasas degšanas procesā dažādos degšanas posmos mainās liesmas sastāvs, tāpēc ir svarīgi zināt kā mainās dažādu jonu sadalījums pie dažāda gaisa pārsvara (15. att.). *Goodings* un *Bohme* noskaidroja ka, galvenā atšķirība liesmām ar gaisa trūkumu, ir intensīvā  $C_3H_3^+$  veidošanās.  $C_3H_3^+$  jona koncentrācija šādām liesmām ir 600 reizēs lielāka (7. pielik. 10. att. – B)

par citu pozitīvo ogļūdeņražu jonu koncentrāciju [174]. Tomēr pēc *Pedersen et al.* modelēšanas rezultātiem  $\text{H}_3\text{O}^+$  jonu koncentrācija arī paliek izteikti augsta [191]. Maksimālā jonu koncentrācija ir novērojama parasti pie  $\alpha$  no  $\approx 0,9$  līdz  $\approx 1,1$  [145], [199]. Atbilstoši *Michaud* un *Delfau* (1980. gads)  $\text{CH}_3\text{CO}^+$  ir dominējošais jons pie stiprā gaisa pārsvara, bet, ja degvielas–gaisa attiecība tuvojās stehiometrijai, liesmā veidojās vairāk  $\text{H}_3\text{O}^+$  un  $\text{H}_3\text{O}^+(\text{H}_2\text{O})$ . Taču degmaisījumā ar degvielas pārsvaru lielmolekulārie joni ( $\text{PAH}^+$ ) aizvieto oksidētus jonus (7. pielik. 12. att.) [189].

Biomases degšanas procesā izdalās ļoti daudz kvēpu daļiņu un lidojošo pelnu, savukārt pats process ir tālu no stehiometriskā. *Keil* un *Gill* 1984. gadā secināja, ka sasniedzot kritisko degvielas–gaisa attiecības robežu ( $\alpha \approx 0,4$ ), sākas kvēpu veidošanās, un palielinās lielmolekulāro ( $\text{PAH}^+$ ) jonu koncentrācija, bet mazāko jonu koncentrācija liesmā samazinās. Liesmā ar izteiktu degvielas padeves pārsvaru kopējo pozitīvu jonu blīvumu veido joni ar masu, kura lielāka par 300 *amu* (atoma masas vienības) jeb  $5 \cdot 10^{-22}$  g. *Olsons* un *Calcote* 1981. gadā novērojuši, ka lielo jonu koncentrācijas attiecība pret mazo jonu koncentrāciju palielinās samazinot gaisa pārsvaru. Šis fenomens tiek pētīts, attēlojot koncentrācijas izmaiņas atkarībā no liesmas degvielas–gaisa attiecības tikai tiem joniem, kuru masa ir lielāka par  $\text{C}_3\text{H}_3^+$  jonu masu (7. pielik. 12. att.). Rezultāti rādīja izteiktu pāreju uz lielākiem joniem, krustojot kvēpu veidošanas robežu. Interesanti atzīmēt, ka šī pāreja kļūst izteiktāka, veicot aprēķinu daudz smagākiem joniem [189]. Tā kā liesmā ar augstu kvēpu saturu lādētas daļiņas vairāk veidojās kvēpu reakcijās lādiņa pārnesei procesā ar ogļūdeņražu joniem vai elektroniem, kvēpu daļiņas var tikt uzlādētas atbilstoši pozitīvi un negatīvi [200], [201], tomēr nemainīgs paliek fakts, ka liesmā ar augstu kvēpu saturu par galveno lādiņu nesēju var kalpot arī pašas kvēpu daļiņas. Savukārt, pēc eksperimentālajiem datiem kvēpu veidojošās liesmas jonu strāva ir stipri mazāka par jonu strāvu stehiometriskām liesmām vai liesmām pie nelielā gaisa trūkuma [138].

## 1.5. Elektriskā lauka tilpuma spēks

Liesmas dinamikas izmaiņas elektriskajos laukos ar lielu lauka intensitāti (līdz  $30 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ ), bet mazu strāvas stiprumu (līdz 10 mA) var pamatot ar trijiem dažādiem mijiedarbības mehānismiem: jonu vējš, t.i. jonu un iesaistīto neitrālo molekulu kustība lauka virzienā, elektriskā lauka enerģijas pārvērtības par siltuma enerģiju, vai tiešā elektriska lauka ietekme uz degšanas procesa ķīmisko reakciju kinētiku [182]. Vairāki mūsdienu pētījumi [202]–[205] ir nonākuši pie secinājuma, ka elektriskā lauka ( $E_\varphi < 3 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ ) enerģija, kas pievadīta liesmai, ir daudz zemāka par siltumu, kas izdalās degšanas reakcijās liesmas frontē. Savukārt pētījumi apliecina arī, ka liesmas izplatīšanas ātrums un degšanas kinētika nav atkarīgi no elektriskā lauka intensitātes [206], [207], bet liesmas ģeometrijas izmaiņas ir vairāk atkarīgas no elektriskā lauka jonu un iesaistīto neitrālo molekulu izraisītas kustības – “jonu vēja”.

Veidojot elektrisko lauku telpā starp diviem elektrodiem, kas novietoti ārpus liesmas, joni tiek pārnesti no liesmas uz elektrodu, turklāt atsevišķu jonu pārnesei attālums ir atkarīgs no jonu kustīguma un dzīves laika. Elektrisko lauku katrā telpas punktā raksturo ar intensitāti  $E_\varphi$ , bet spēku,

kas ietekmē uz lādiņa vienību, raksturo elektriskais tilpuma spēks  $F_\varphi$  ar pieņēmumu, ka laukā ievietotais lādiņa nesējs neietekmē pašu elektrisko lauku. Elektriskais tilpuma spēks ir proporcionāls lauka intensitātei  $E_\varphi$ , jonu koncentrācijai  $n_\pm$  un lādiņam  $q_\pm$ , turklāt lauka intensitāte ir proporcionāla elektroda potenciāla izmaiņām dažādos virzienos ar mīnus zīmi [21]:

$$\pm F_\varphi = q_\pm E_\varphi n_\pm = q_\pm (-grad \varphi) \quad (88)$$

Šis vienādojums ir spēkā tikai vakuumā, tomēr jebkāda cita vide raksturojās ar dielektrisko caurlaidību, tāpēc telpā starp elektrodiem elektriskais lauks nav pastāvīgs un samazinās virzienā no elektroda uz ārpusi. Reālajos apstākļos elektriskā lauka intensitātes izmaiņas telpā un elektrodu forma stipri ietekmē elektriskā tilpuma spēka vektora virzienu un vērtību, tāpēc visaugstākā elektriskā tilpuma spēka vērtība ir pie elektroda virsmas [208]–[212]. Elektriskās tilpuma spēka izmaiņas noteiktajā virzienā, neievērojot konvekciju un difūziju, var tikt aprakstītas ar jonu strāvas  $j$  vienādojumu, kur  $\mu_\pm$  ir jonu kustīgums:

$$j = q_\pm n_\pm \mu_\pm E_\varphi = [q_\pm n_\pm \mu_\pm = const] \sim \Delta\varphi \quad (89)$$

Ja daļiņas lādiņš ir  $q_\pm$ , bet masa ir  $m$ , tad ātrumu  $u_{el}$ , ar kuru daļiņa sāk kustību no miera stāvokļa elektriskā lauka tilpuma spēka ietekmē, nosaka lauka dažādu telpas punktu potenciālu starpība [21]:

$$u_{el} = \sqrt{\frac{2q_\pm \Delta\varphi}{m}} = \sqrt{\frac{2j}{m_\pm n_\pm \mu_\pm}} \quad (90)$$

Noslēgtajā sistēmā vakuumā, izmērot jonu strāvas stiprumu starp diviem elektrodiem, ar 90. vienādojuma palīdzību var novērtēt maksimālo ātrumu, kuru var iegūt lādētās daļiņas ar noteikto masu un kustīgumu, tomēr nenošlēgtajā sistēmā gāzu maisījumā notiek lādēto un neitrālo daļiņu sadursmes, kuru rezultāta daļā no enerģijas tiek zaudēta [208]–[212]. Savukārt liesmas apstākļos notiek nepārtrauktas lādēto daļiņu veidošanas, mijiedarbības un rekombinācijas procesi (sk. 1.4.1–1.4.3. apakšodaļā), kuri traucē aprēķināt šādu neizolētu procesu sistēmu izmantojot šādu vienkāršoto vienādojumu.

### 1.5.1. Strāvas piesātinājuma ietekme uz elektrisko tilpuma spēku

*Volt–Amper* raksturlīkņu analīze ir ļoti svarīga, lai novērtētu elektriskā lauka tilpuma spēku, jo veido priekšstatu par apskatāmas liesmas jonizāciju un piesātinājuma strāvas sasniegšanu, kad tālākā lauka intensitātes paaugstināšana vairs nav optimāla. Analizējot *Volt–Amper* raksturlīknes ir iespējams noteikt dielektriķa izlādes robežvērtību, maksimālo jonu strāvu, kuru var radīt noteiktajos apstākļos analizējamā liesma, un palīdz atrast lauka efektīvāko iedarbības vietu liesmā, lai uzlabot elektriskā tilpuma spēka iedarbību uz lādētām daļiņām [213].

Elektriskajā lauka radīto tilpuma spēku ir iespējams regulēt, mainot pieliktā lauka intensitāti. Pieaugot elektriskā lauka intensitātei – pieaug arī elektriskā strāva, kura veidojas lādēto daļiņu rekombinācijas rezultātā uz elektroda virsmas (89. form.). Pēc 16. attēla strāvas pieaugums

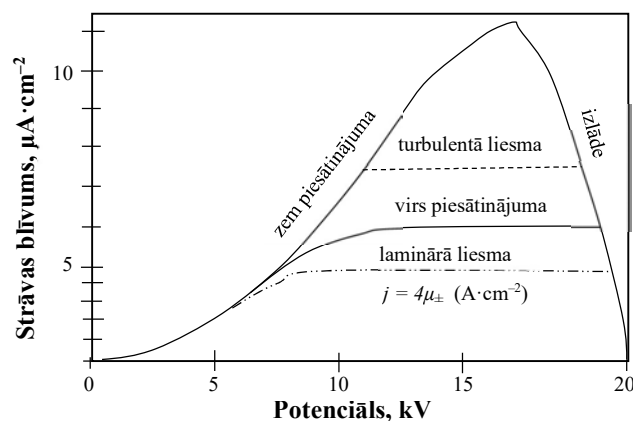


turpinās līdz maksimumam, kurš ir raksturīgs katrai noteiktajai liesmai atkarībā no degvielas tipa, gaisa pārsvara koeficienta un plūsmas režīma. Tālāka elektrodu potenciāla paaugstināšana neizraisa strāvas pieaugumu, kamēr nav sasniegta sekundārā jonizācija vai izlāde. Šo maksimumu sauc par piesātinājuma strāvu. Piesātinājuma apgabalā strāva uzrāda tikai nelielas izmaiņas ar pieliktā sprieguma palielināšanu. Šajā brīdī elektriskais lauks savāc visus jonus, kas veidojas reakcijas zonā un nav zaudējuši savu lādiņu rekombinācijas reakcijās [198]. Maksimālo iespējamo jonu strāvu pirms izlādes var tuvināti aprēķināt:

$$j_{max} = \frac{E_{\varphi_b}^2 \mu_{\pm}}{8\pi \Delta x_{q_{\pm}}}, \quad (91)$$

kur  $E_{\varphi_b}^2$  ir elektriskā lauka intensitāte pirms izlādes, un  $\Delta x_{q_{\pm}}$  ir tāds attālums starp elektrodiem, kurš, mijiedarbojoties ar liesmu, izsauc pilnu jonu ekstrakciju, izraisot liesmas nodzišanu [214]. Pēc 91. formulas var secināt, ka maksimālo  $F_{\varphi}$  spēka iedarbību var panākt pie piesātinājuma strāvas un pēc iespējas mazāka attāluma starp elektrodiem. Turklāt kurināmā daba un degšanas kinētika stipri ietekme dažādu jonu veidošanās un to kustīgumu (sk. 1.4.4. apakšnodaļā).

Ir dokumentēts, ka piesātinājuma strāva katram kurināmajam ir atšķirīga, jo tās lielumu nosaka dotā kurināmā liesmas jonizācijas pakāpe dotajos apstākļos [215]. Turklāt maksimāli sasniedzama strāva  $\approx 0,25 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$  ir ierobežota ar maksimālo elektriskā lauka intensitāti pirms izlādes, kura teorētiski vienāda aptuveni ar  $30 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$  [214]. Savukārt praksē, atkarībā no attāluma starp elektrodiem un vides temperatūras, ir iespējams panākt  $0,03\text{--}0,10 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$  lielu strāvu [198]. Promocijas darba ietvaros elektriskā lauka intensitāte tika nodrošināta tādā apjomā, lai ierobežotu sekundāro jonizāciju vai izlādes veidošanos, turklāt elektriskā lauka efekti, kuri potenciāli varētu izraisīt degšanas kinētikas izmaiņas, ir reducēti laukā ar intensitāti zemāku par  $3 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$  [206], [207].



16. att. Liesās metāna liesmas *Volt-Amper* raksturlīkne [198].

Palielinot elektriskā lauka intensitāti, jonu strāva pieaug paraboliski (16. att.). Šajās lauka intensitātes robežās jonu veidošanās liesmā ir stiprāka par jonu rekombināciju uz elektroda virsmas. Tā kā lauka intensitāte turpina palielināties, dažādu jonu rekombinācijas reakciju virzienu

skaitis samazinās, padarot noteiktus kinētiskos ceļus neatgriezeniskus. Savukārt, jonu ekstrakcija no degšanas zonas ierobežo to veidošanās liesmā. *Lawton* un *Weinberg* pētīja maksimālo jonu strāvu dažādos gadījumos eksperimentāli un matemātiski noteica, ka telpiskais potenciāla sadalījums  $\varphi$  tieši saistīts ar liesmas frontes izvietojumu  $x$  un jonu veidošanās ātrumu  $K_j$  [198]:

$$\varphi = \int_0^x E_\varphi dx = \left( \frac{\pi K_j e^-}{\mu_\pm} \right)^{1/2} x^2 \quad (92)$$

Tāpēc noteiktā attālumā starp elektrodiem  $\Delta x$  jonu veidošanās ātrums būs mazāks  $K_j$  par jonu ekstrakciju (atkarīga no dažādu jonu kustīguma  $\mu_\pm$ ) no šī telpas punkta, un elektriskā vadāmība šajā punktā strauji krīt. Šī parādība izraisa lauka sprieguma kritumu uz liesmas frontes virsmas. Ir konstatēts, ka, palielinot elektriskā lauka intensitāti līdz strāvas piesātinājumam, sprieguma kritums uz liesmas frontes ir tik liels, ka spēj samazināt lauka intensitāti šajā punktā līdz nulles vērtībai. Sprieguma krituma efektu var samazināt, paaugstinot lauka intensitāti virs piesātinājuma robežas, tomēr pilnībā sprieguma kritumu novērst nevar, jo tas ir novērojams pat tuvu izlādes robežai. Sprieguma krituma izvērtēšana ir svarīga, optimizējot elektriskā lauka iedarbību uz degšanas procesiem, jo šis efekts liesmas frontē var samazināt elektrisko tilpuma spēku, kas ietekmē jonu masas kustību lauka virzienā.

### 1.5.2. Daļiņu kustīguma ietekme uz elektrisko tilpuma spēku

Masas spektroskopijas pētījumi pierādīja, ka hidroksionija jons ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ) nav vienīgais jons, kurš veidojas liesmas frontē, bet ir stabilāks un reģistrējams visā liesmas garumā [186]. Lādēto daļiņu kustīgums ietekmē gan sprieguma sadalījumu (92. form.), gan kopējo jonu strāvu (89. form.).  $\text{H}_3\text{O}^+$  jonu un tā hidratu jonu ( $\text{H}_3\text{O}^+ \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) kustīgums ir robežās no  $2,14 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  līdz  $2,68 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , turklāt jo vairāk hidratēts ir hidroksionija jons, jo zemāks ir tā kustīgums [216]. Šis nosacījums ir patiesi arī pārējiem joniem, saistoties ķīmiskajā mijiedarbībā ar citām molekulām, piemēram,  $\text{C}_3\text{H}_3^+$  joniem ar *PAH* daļiņām. Pieaugot jonu izmēram samazinās to kustīgums, jo jonu kustīgums elektriskajā laukā atkarīgs no daļiņu masas un sadursmju šķērsgriezuma. Tāpēc vislielākais kustīgums piemīt elektroniem: no  $2,5 \cdot 10^3$  līdz  $4,0 \cdot 10^3 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  pēc *Wilson et al.* [138], [217]), kā vismazākām daļiņām liesmas frontē. Ievērojot likumsakarības, kas iegūtas pateicoties jonu mobilitātes spektrometrijas metodei [218], ir izveidots vienādojums, kurš apraksta jonu kustīguma atkarību no jonu lādiņa, jonu masas, gāzes temperatūras un daļiņu ģeometriskām formām:

$$\mu_\pm = \frac{3q_\pm}{16V_{\text{Avogardo}}} \sqrt{\frac{2\pi}{k_B T \left( \frac{m_{\text{neitr.gāz.}} \cdot m_{\text{jona}}}{m_{\text{neitr.gāz.}} + m_{\text{jona}}} \right)} \frac{1}{\Omega_{\text{IMS}}}}, \quad (93)$$

kur  $q_\pm$  ir jonu lādiņš,  $V_{\text{Avogardo}}$  ir nesējgāzes kopējais molekulu skaits vienā tilpuma vienībā,  $k_B$  ir Bolemana konstante,  $T$  ir temperatūra,  $m_{\text{neitr.gāz.}}$  ir nesējgāzes masa,  $m_{\text{jona}}$  ir jonu masa, un  $\Omega_{\text{IMS}}$  ir vidējā impulsa pārnese šķērsgriezumā, kurš sfēriskām daļiņām ir aprēķināms kā

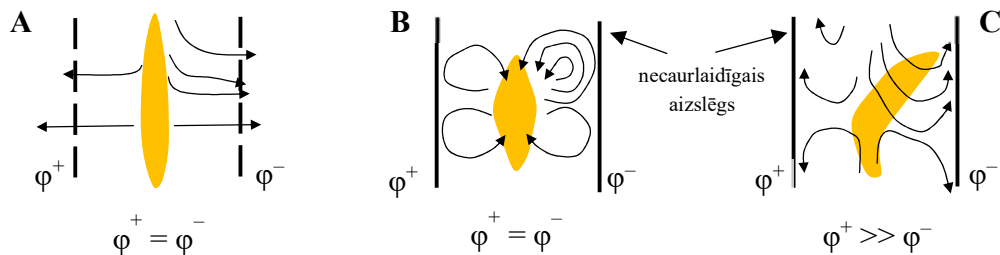
$$\Omega_{IMS} = \sigma = \pi \Delta x_{sadursmes}^2, \quad (94)$$

kur  $\sigma$  ir ģeometriskā sadursmes projekcija jeb sadursmes šķērsriezums, bet  $\Delta x_{sadursmes}$  ir attālums starp divu sadurošo daļiņu centriem.

Elektriskā laukā ietekmē kopējais daļiņu sadursmju skaits pieaug, jo elektriskais tilpuma spēks ietekmē lādēto daļiņu masas pārvietošanos, sekmējot to sadursmju varbūtību telpā [205], [219]. Turklāt lielāks lādēto daļiņu kustīgums nevar pats nodrošināt izteiktāku “jonu vēja” efektu, jo lielākais kustīgums piemīt mazākajām daļiņām, kuriem ir mazs sadursmes šķērsriezuma laukums ar citām daļiņām un liela reaģētspēja. Tāpēc elektrons sadursmju laikā ar neitrālajām daļiņām nevar nodrošināt efektīvu kustības impulsa apmaiņu, bet var izraisīt citas ķīmiskās pārvērtības, kas samazina to dzīves laiku.  $H_3O^+$  un  $C_3H_3^+$  joni savukārt ir spējīgi sadursmes laikā nodod pietiekoši lielu kustības impulsu, ierosinot neitrālo daļiņu kustību lauka virzienā [198].

### 1.5.3. “Jonu vēja” ātrums

Iepriekšējās sadaļās tika izskaidrota elektriskā lauka un liesmas mijiedarbības mehānisma un dažādu parametru ietekme uz elektrisko tilpuma spēku. Kā jau definēts, “jonu vējš” ir lādēto un neitrālo daļiņu sadursmju rezultātā inducētā gāzu masas kustība elektroda virzienā. Jonu vēja teorija apgalvo, ka liesmā sastopamie joni un elektroni paātrinās, reaģējot uz Lorenca spēku, kuru nodrošina ārējais lauks. Lādētās daļiņas tiek pārnestas lauka virzienā un tiek pakļautas elastīgām sadursmēm ar neitrālām molekulām bez ķīmiskām pārvērtībām, tādējādi izraisot neitrālo gāzes daļiņu paātrinājumu un pārnesi lauka virzienā, izmainot plūsmas dinamiku, liesmas formu un struktūru (17. att.). *Lawton* un *Weinberg* 1968. gadā novēroja, ka jonu vējš var izraisīt arī lokālu virpuļu veidošanos un plūsmas nestabilitāti. Zīmējumā ir attēloti gadījumi, kad ar elektrisko lauku inducēts jonu vējš brīvi plūst caur elektroda sietiņu (A), veidojot nepārtrauktās plūsmas līnijas, kad jonu vējš izraisa virpuļus (B), atstarojoties no necaurspīdīgām elektroda sienām, un kad pozitīvā elektroda potenciāls ir stiprāks par negatīvā elektroda potenciālu [214].



17. att. Jonu vēja un liesmas mijiedarbības raksturīgie modeli [28], [214].

Maksimālais ātrums, kuru var sasniegt viena lādētā daļiņa vakuumā ir aprakstīta ar 90. vienādojumu. Vidējais ātrums tiek izteikts no Lorenca spēka vienādojuma un ir proporcionāls elektriskā lauka intensitātei. Šis vidējais ātrums ir definēts kā jonu dreifa ātrums, un tas ir izteikts ar

$$u_d = \mu_{\pm} E_{\varphi}, \quad (95)$$

kur  $u_d$  ir jonu dreifēšanas ātruma vektors [21]. Vispārīgi ir pieņemts, ka jonu vēju pārsvarā izraisa elektriskā lauka ierosinātā  $H_3O^+$  jonu pārnesē lauka virzienā. Lai aprēķināta “jonu vēja” maksimālo ātrumu pieņem, ka visa iespējamā enerģija — gan gravitācijas, gan elektriskā — tiek pārvērsta kinētiskajā enerģijā. Rezultējošais vienādojums pie tāda nosacījuma ir:

$$u_{elec} = \sqrt{\frac{2j\Delta x_{\pm}}{\rho\mu_{\pm}}}, \quad (96)$$

kur  $\Delta x_{\pm}$  ir attālums līdz pozitīvam vai negatīvam elektrodam. Idealizētajā gadījumā (stehiometriskā liesma, novērojams strāvas piesātinājums) ir iespējams aprēķināt maksimālo jonu vēja ātrumu [21]:

$$u_{el,max} = \frac{E_{\varphi}}{\sqrt{8\pi q_{\pm}}} = 5,5 \text{ m/s} \quad (97)$$

Turklāt pēc šīs formulas parēķinātais teorētiskais maksimālais jonu vēja ātrums  $u_{e,max}$  A. Tinajero darbos sasniedz  $1,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  [204], [213], turklāt eksperimentāli mērītais ātrums ir mazāks un nepārsniedz  $0,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  [219]. Motuleviča et al. secinājums no eksperimentālā darbā par konceptīvas siltuma pārneses intensifikāciju papildina šos datus ar nosacījumu, ka jonu vēja efekts elektriskajā laukā ir novērojams tikai, ja neitrālās gāzes šķērsplūsmas ātrums nav lielāks par  $5\text{--}10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  [182]. Pētot plazmas uzvedību elektriskajā laukā, V. S. Karnani arī secināja, ka pretēji lādēto jonu un elektronu daļiņas veido pretēji virzītās viļņveida kustības. Šādu pretēji virzītu kustību veidošanas laikā daļiņas sadurās un atsevišķu daļiņu kustības ātrums samazinās, samazinot šādi kopējo elektriskajā laukā radīto “jonu vēja” efektu. Tāpēc atšķiras maksimālā “jonu vēja” teorētiskā un eksperimentālā vērtība, jo liesmas plūsmā vienmēr pastāv gan pozitīvi, gan negatīvi lādētas daļiņas, kuru savstarpējai mijiedarbībai skaitliskos parēķinos bieži nepievērš uzmanību. Tieši tādēļ līdzstrāvas elektriskā lauka efekts ir uzskatītam par izteiktāku, salīdzinot ar mainīgās strāvas elektriskā lauka ietekmi, jo pretēji lādēto daļiņu kustības viļņi dzesē viens otru [202], [213].

#### 1.5.4. Elektriskā lauka tilpuma spēka ietekme uz liesmu

Tā kā liesma ir īpašā elektriskā sistēma ar telpiski nodalīto pozitīvo un negatīvo lādiņu, tad elektriskajā laukā, var novērot liesmas konfigurācijas izmaiņas: paralēlajā laukā var novērot liesmas garuma izmaiņas [210], [220], bet perpendikulārajā laukā (17. att. – B, C) – liesmas nolieces (kad pieliktais elektriskais lauks nav simetrisks) vai paplašināšanos [182], [214].

Vienādojumi, kas apraksta elektriskā lauka iedarbību uz vāji jonizētu gāzi ir atšķirīgi termiskajā un netermiskajā režīmā. Kā kritēriju, lai atšķirtu šos divus režīmus, bieži izmanto reducētā elektriskā lauka kritēriju  $E_{\varphi}/N$ , kur  $N$  ir gāzes maisījuma molekulu daudzums. Iepriekšējā netermisko lādiņu analīze metāna-gaisa avotos liecina, ka elektroni un joni ir termiskā līdzsvarā ar neitrālajām gāzēm, ja reducētā elektriskā lauka kritērijs ir augstāks par  $140 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$ . Tomēr mazas

intensitātes elektriskām laukam  $E_\varphi/N$  kritērija vērtība ir zema ( $E_\varphi/N < 10 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$ ), tāpēc uzskata ka režīms ir termiskais [221].

Visbeidzot, modeli vājam pieliktajam spriegumam regulē Eilera saglabāšanas vienādojumi, kuri apraksta reakcijas plūsmas uzvedību elektrohidrodinamisko spēku klātbūtnē. Tas ietver attiecīgi masas (98. form.), impulsa (99. form.), kopējās enerģijas (100. form.) un sugu blīvuma saglabāšanu (101. form.) pēc *Poinsot* un *Veynante* [222].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (98)$$

$$\frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \otimes \vec{u} + p \mathbf{I} - \boldsymbol{\tau}) = \rho \sum_i^N w_i \vec{F}_i \quad (99)$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} H + \vec{h} - (\boldsymbol{\tau} - p \mathbf{I}) \cdot \mathbf{U}) = - \sum_i^N H_i \dot{m}_i + \rho \sum_i^N w_i \vec{F}_{\varphi,i} \cdot (\vec{u} + \vec{V}_{D,i}) \quad (100)$$

$$\frac{\partial \rho w_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho (\vec{u} + \vec{V}_{D,i}) w_i) = M_{r,i} \dot{m}_i \quad (101)$$

Augšup izklātie vienādojumi aprēķina blīvuma  $\rho$ , 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 pēc sistēmas stāvokļa vienādojuma.  $\vec{h}$  ir entalpijas plūsma aprēķinātā pēc siltuma vadīšanas Furjē likuma.  $\boldsymbol{\tau}$  un  $\mathbf{I}$  ir atbilstoši viskozitātes stresa (*viscous stress*) un identitātes tenzori (*identity tensors*), bet  $\vec{u} \otimes \vec{u}$  ir divu vektoru telpu tenzora reizināšanas rezultāts.  $M_{r,i}$  ir  $i$ -tās ķīmiskās vienības molārā masa,  $\vec{V}_{D,i}$  ir difūzijas ātrums,  $\dot{m}_i$  ir  $i$ -tās ķīmiskās vienības molārais veidošanas ātrums, bet  $H_i$  ir  $i$ -tās ķīmiskās vienības entalpija, savukārt  $\vec{F}_{\varphi,i}$  ir elektriskais tilpuma spēks, kurš iedarbojās uz ķīmisko  $i$ -to vienību plūsmā. Ievērojot, ka blīvuma gradienti lādēto daļiņu blīvējumā ir nenozīmīgi, elektrohidrodinamisko spēka iedarbību uz  $i$ -tās vienības tilpumu var aprakstīt ar [198]:

$$\vec{F}_{\varphi,i} = \sum_i^N q_{\pm,i} \vec{E}_\varphi n_{\pm,i}, \quad (102)$$

kur  $q_{\pm,i}$  un  $n_{\pm,i}$  ir  $i$ -tās lādētās daļiņas lādiņš un daudzums, bet  $\vec{E}_\varphi$  ir elektriskā lauka vektors aprēķināts pēc Gausa likuma:

$$\nabla \cdot \vec{E}_\varphi = -\nabla^2 \varphi = \frac{\sum_i q_{\pm,i} n_{\pm,i}}{\epsilon_0}, \quad (103)$$

kur  $\varphi$  ir elektriskais potenciāls un  $\epsilon_0$  ir vakuuma elektriskā caurlaidība. Elektriskā lauka tilpuma spēka vektors parādās impulsa un enerģijas vienādojumos (99.–100. form.), taču tika noteikts, ka tā ieguldījums kopējā enerģijas saglabāšanas vienādojumā ir niecīgs. Visvairāk no daļiņas lādiņa ir atkarīgs difūzijas ātrums  $\vec{V}_i$ , savukārt lādētās daļiņas difūzijas ātruma izmaiņas elektriskajā laukā

pēc 101. vienādojuma ietekmē  $i$ -tās lādētās daļiņas masas daļas izmaiņas laikā un telpā. Neitrālajam daļiņām difūzijas ātrumu apraksta Fika likums, turklāt lādētām daļiņām ir nepieciešams ieverot arī papildus masas dreifa plūsmu dažāda elektriskā kustīguma  $\mu_{\pm,i}$  dēļ:

$$\rho w_i \vec{V}_{D,i} = -\rho V_{D,i} \frac{M_{r,i}}{M} \nabla \chi_{\pm,i} + q_{\pm,i} \rho w_i \mu_{\pm,i} \vec{E}_{\varphi}, \quad (104)$$

kur  $\chi_{\pm,i}$  ir  $i$ -tās lādētās daļiņas molārā daļa, bet  $V_{D,i}$  ir tās termiskās difūzijas koeficients izteikts ar  $\lambda \cdot (\rho c_p)^{-1}$ , kur  $\lambda$  ir siltuma vadības koeficients un  $c_p$  ir izobārā gāzes maisījuma siltuma ietilpība.  $M$ , savukārt, ir gāzu maisījuma molārā masa [223].

Pēc 104. vienādojuma ir secināms, ka elektriskā lauka ietekme uz gāzes plūsmu notiek vektoriāli, tāpēc elektriskā lauka tilpuma spēka ietekmes virziens ir ļoti nozīmīgs. Elektriskā lauka tilpuma spēks var gan uzlabot lādēto daļiņu difūzijas ātrumu, gan aizkavēt to. Piemēram, paātrinot ambipolāro elektronu difūziju degmaisījuma sagatavošanas zonā, var uzlabot degmaisījuma reakcijas ātrumu un aizdegšanos. *Salvador et al.* atzīmē, ka izvietojot katodu (–) virs liesmas un saņemot degli, novēro liesmas iztīpšanās, bet izvietojot anodu (+) virs liesmas novēro liesmas garuma samazināšanos [210]. Iepriekšējie pētnieku darbi pieņēma, ka liesmas garuma izmaiņas notiek pateicoties siltuma gradienta izmaiņām (100. formula) pirms un pēc liesmas frontes (40. formula), jo elektriskais tilpuma spēks ietekmē siltuma un masas apmaiņu pateicoties jonu un inducēto neitrālo molekulu virzītai kustībai. Paralēlā elektriskā laukā ietekmē, ar “jonu vēja” un siltuma plūsmas izmaiņu palīdzību, ir iespējams samazināt liesmas atrašanās efektu no degļa sprauslas [28], [182]. Liesmas konusa garuma izmaiņas pie sprauslas izejas izraisa liesmas atvēršanās leņķa palielināšanos vai samazināšanos, kurš ir apgriezti proporcionāli saistīts ar degmaisījuma plūsmas ātrumu (38.–39. formula) [112]. Normālais ātrums konkrētajam degmaisījumam ir fizikāli-ķīmiskā konstante. Atbilstoši Mihelsona formulējumam elektriskais tilpuma spēks izmaina arī liesmas frontes laukumu [149]–[151].

Kaut gan elektriskā lauka tiešā ietekme uz degšanas reakciju kinētiku šodien ir uzskatāma par niecīgu, tomēr negatīvo  $O^-$  un  $O_2^-$  paātrinātā difūzija degmaisījuma pirolīzes zonā var uzlabot degmaisījuma priekšapstrādi (27.–28. reakc.) un paātrināt ķēdes reakcijas aktivācijas centru veidošanos [112], [182]. Kaut arī mūsdienās ir pieņemts, ka elektriskais tilpuma spēks ietekmē liesmas struktūru tikai pateicoties “jonu vējam” [202]–[205], tomēr pilnībā citu efektu (elektriskā lauka enerģijas pārvērtības par siltuma enerģiju un tiešā elektriska lauka ietekme uz degšanas ķīmisko reakciju kinētiku) iedarbību izslēgt nevar. Vairāki pētnieki atzīmēja arī uzlaboto aizdegšanos dažādas fāzes kurināmām, pieliekot paralēlo elektrisko lauku [182], [224], [225], kas arī var būt saistīts ar uzlaboto siltuma pārnešanos degmaisījuma sagatavošanas zonā (40. formula).

Pastāv arī uzskats, ka jonu elektriskais tilpuma spēks kopā ar jonu radīto vēju intensificē oksidēšanas un gazifikācijas produktu slāņa noraušanu no heterogēnās virsmas (šķidrums vai cietās daļiņas). Papildus liesmas jonizēšanas efektam heterogēnās degšanas gadījumā notiek arī šķidrās/cietās fāzes virsmas uzlādēšanās, kas palielina šo daļiņu uzturēšanās laiku degšanas zonā un uzlabo to sadegšanu [182], [201], [226]. Elektriskais lādiņš, pilieniem vai cietām daļiņām, var tikt

saņemts no uzlādētā elektroda vai no liesmas joniem [138], [193]. Ir zināms, kā cietās daļiņas efektīvi uztver elektronus no liesmas, samazinot liesmas jonizācijas strāvu, kā arī labi elektrolizējās stipri intensīvā elektriskā lauka ietekmē pie katoda virsmas. Šo parādību enerģijas ražošanas industrijā pielieto elektrostatiskajos filtros [212].

Ir nozīmīgi, ka ar elektrisko tilpuma spēku radītais “jonu vējš” uzlabo konvektīvo siltuma atdevi virsmām. *E.M. Stepanov* savā eksperimentālajā darbā salīdzināja saņemtas un neitrālās plāksnēs uzsildīšanas ātrumu atkarībā no izvietošanas attiecībā pret pozitīvi uzlādēto degli [182]. Saņemtas plāksnes uzsildīšanas ātrums bija daudz lielāks salīdzinot ar neitrālo plāksni, turklāt siltuma atdeves atkarība no attāluma starp liesmu un plāksni bija izteikti lineāra, bet neitrālai vairāk paraboliska. *E.M. Stepanov* arī atzīmēja, ka elektriskā lauka iedarbības efektivitāte samazinās, palielinot plāksnes attālumu no liesmas simetrijas ass, bet pretējais gadījums ir novērojams, pārvietojot plāksnes liesmas līdzplūsmā, kaut gan elektriskā lauka intensitāte nesamazinās. Palielinot elektriskā lauka intensitāti, uzsildīšanas ātruma maksimums nobīdās tuvāk pie pozitīvi lādētā degļa sprauslas. Uzsildīšanas ātruma palielināšanās notiek ar elektriskā lauka intensitātes samazināšanos (potenciāls nemainīgs – mainās tikai attālums starp elektrodiem). Par elektriskajā laukā uzlaboto konvektīvo siltuma pārnesi no liesmas apkārtējai videi savos eksperimentālajos darbos liecināja arī *Chien et al.* [227] *Yagodnikov et al.* [228] un *Nelson et al.* [229] [230].

## 2. EKSPERIMENTĀLĀS IEKĀRTAS IZGATAVOŠANA, TESTĒŠANAS METODOLOĢIJA UN VALIDĀCIJA

Otrajā promocijas darba galvenajā nodaļā ir aprakstītas gan eksperimentālo pētījumu un tehnoloģiskās aprobācijas iekārtas, mērinstrumenti un metodoloģija. Iekārtu un instrumentu apskats ietver periodiskās darbības mazas jaudas (4 kW) eksperimentālās iekārtas (sk. 2.1. nodaļā) un nepārtrauktas darbības rūpnieciskās (līdz 20 kW) iekārtas (sk. 2.4. nodaļā) aprakstu, uz kuras tika veikta līdzstrāvas elektriskā lauka iedarbības tehnoloģiskā aprobācija. 2.1.1. apakšnodaļā ir raksturota elektriskā lauka konfigurācija pie dotā elektroda formas un izvietojuma, ka arī aprēķināta lauka intensitāte pie noteiktiem elektrodam pieliktajiem potenciāliem. 2.1.2. apakšnodaļa ietver virpuļplūsmas dinamikas veidošanās aprakstu eksperimentālajā iekārtā un tās validēšanu pēc analogijas ar priekšizpētē izmantotās mazās jaudas (1,5 kW) eksperimentālās iekārtas validāciju, kuras dinamikas veidošanās, plūsmas struktūra un tās raksturojošie parametri (aksiālais ātrums, tangenciālais ātrums, virpuļskaitlis) bija izpētīti un aizstāvēti vairākās starptautiskās zinātniski-pētnieciskās konferencēs [231]–[233]. Degšanas procesa veidošanās raksturojošie sākuma parametru un izejas parametru mērīšanas metodoloģija ir sniegta 2.1.3. apakšnodaļā, kurā ir plaši izklāts par pētījumā izmantotiem mērinstrumentiem, pielietojuma robežām, mērījumu precizitāti un kļūdām, ka arī par eksperimentu atkārtojamību un nenoteiktību.

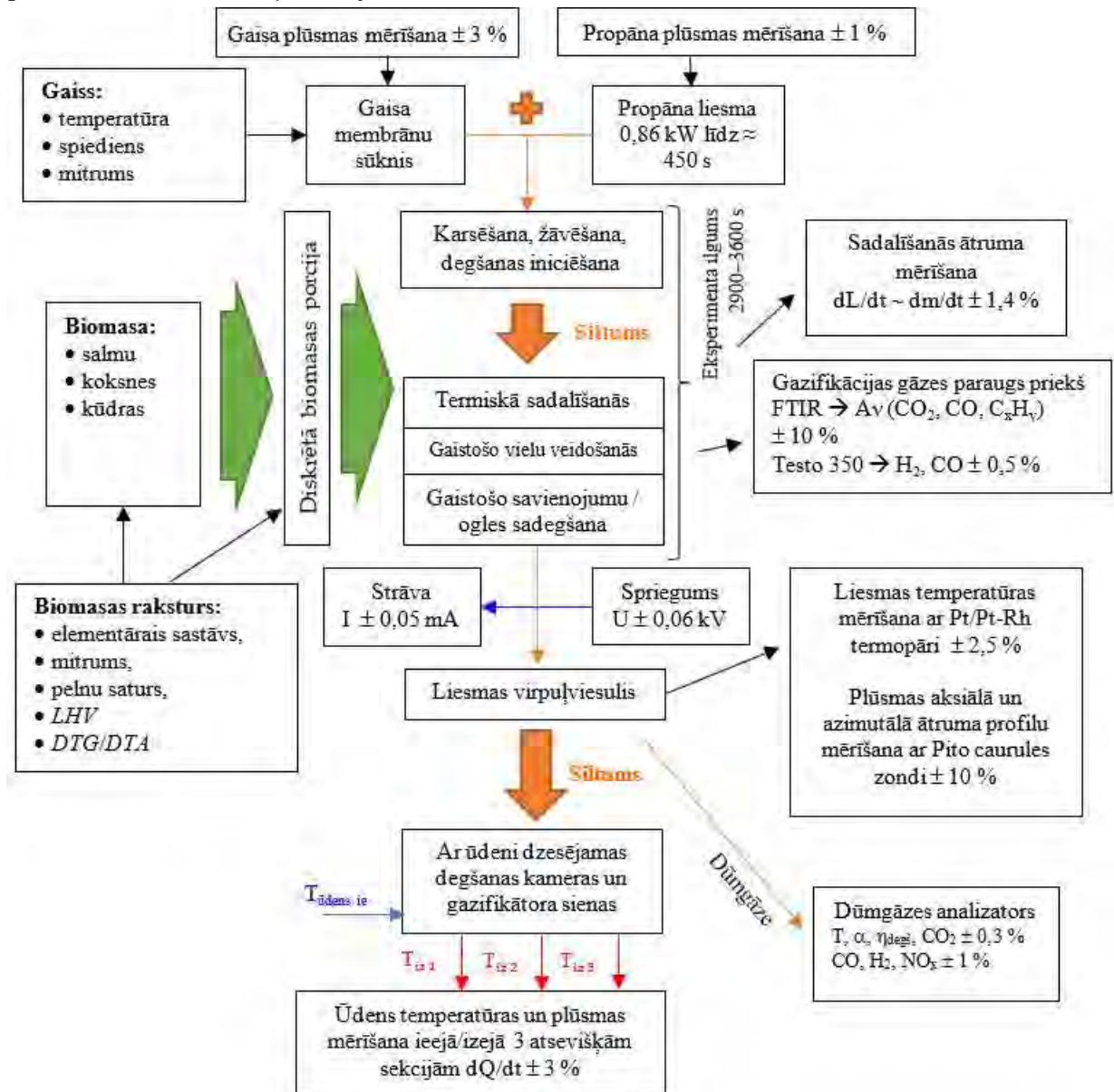
Elektriskā lauka un liesmas virpuļplūsmas mijiedarbības efektu novērtēšanai ir nepieciešama informācija par dažādas izcelsmes biomasas paraugu elementāro un ķīmisko sastāvu, termiskās sadalīšanas kinētiku, kā arī informācija par degšanas procesu dinamikas veidošanos degšanas kamerā un to atšķirībām dažādas izcelsmes biomasas paraugiem bez ārējā elektriskā lauka. Eksperimentālajiem pētījumiem izmantoja komerciālās biomasas granulas (salmu, koksnes un kūdras), bet biomasas paraugu raksturojošie parametri (elementārais sastāvs, mitrums, pelnu saturs, ķīmiskais sastāvs pēc *FTIR*, *LHV*, *DTG/DTA*, pirolīzes produktu sastāvs) bija noteikti LV KĶI institūtā (2.2.1. apakšnodaļa).

Gaisa padeves aerodinamiskā režīma izvēle balstījās uz diviem kritērijiem. Pirmkārt, virpuļplūsmas režīmam pēc galvenajām pazīmēm jābūt tuvam virpuļplūsmas režīmam, kas bija izmantots eksperimentālā priekšizpētē, izmantojot mazas jaudas (līdz 1,5 kW) eksperimentālo iekārtu. Otrkārt, virpuļplūsmas režīmam jānodrošina dažādas izcelsmes biomasu pašuzturošo degšanas procesu kontrolējamā stacionārā stāvoklī. Aerodinamiskā režīma izvēlei bija veikti priekšizpētes eksperimentālie pētījumi, mainot primārā un sekundārā gaisa padevi iekārtā, kuru rezultāti ir sniegti 8. pielikumā. Savukārt eksperimentālai iekārtai ar jaudu līdz 4 kW optimālā aerodinamiskā režīma izvēle  $G_z/G_0 = 30/40 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$  pamatojās uz LUFU iepriekš veiktajiem plūsmas dinamikas pētījumiem par virpuļplūsmas raksturu un īpašībām iekārtā ar jaudu līdz 1,5 kW [167], [234].

Eksperimentālā darbā ar pozitīvi lādētu, aksiāli ievietotu, elektrodu pieliktā sprieguma lielumu mainīja, ierobežojot izlādes veidošanos telpā starp elektrodu un degšanas kameras sienām. Pieliktā sprieguma lielums bija vienīgais mainīgais izejas parametrs, un, lai izvērtētu šī mainīga



parametra ietekmi uz degšanas procesa veidošanos, tika veikti šī procesa izejas mainīgo parametru kompleksie mērījumi par biomasas termiskās sadalīšanās, gaistošo vielu veidošanās un uzliesmošanās, degšanas zonas temperatūrām un sastāvu, iekārtas siltuma jaudu un degšanas produktu sastāvu izmaiņām ārēja elektriskā lauka iedarbībā.



18. att. Eksperimentālās izpētes metodoloģijas shēma.

Pētījumi ir veikti, ievērojot LUFU laboratorijas aprīkojuma iespējas. 18. attēlā ir dota izvērsta biomasas degšanas procesa elektrodinamiskās vadības aprobācijas eksperimentālās izpētes metodoloģijas shēma ar kritisko posmu aprakstu un galvenajiem nemainīgiem ieejas un mainīgajiem izejas parametriem. Savukārt ar paplašināto tehnisko principiālo shēmu, kur ir attēlota visa eksperimentālā aparatūra, tā savietošana, un dažādu parametru mērīšanas kritiskie posmi, var

iepazīties 9. pielikumā. 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.

Biomassas termiskās sadalīšanās ierosināšanai eksperimentālajā iekārtā tika izmantota propāna liesma ar kontrolējamu siltuma jaudu (sk. 2.1. nodaļā). Propāna liesmas termiskā mijiedarbība ar biomasas granulu slāni ierosina biomasas termisko sadalīšanos un gaistošo vielu veidošanos. Savukārt gaistošo savienojumu sajaukšanās ar gaisa virpuļplūsmu nosaka gaistošo savienojumu uzliesmošanu un pašuzturošā degšanas procesa veidošanos, kas raksturojas ar degšanas procesa raksturojošo parametru stabilitāti un vienmērīgumu, paverot iespējas veikt vairākus vienlaicīgus lokālus liesmas parametru (temperatūras, ātruma, sastāva) un siltuma jaudas mērījumus ar augstu mērījumu precizitāti. Liesmas virpuļplūsmas veidošanās procesu varēja novērot un kontrolēt pēc degšanas zonas temperatūras un iekārtas siltuma jaudas izmaiņām, kā arī vizuāli. Salmu, koksnes un kūdras granulu diskreto porciju (440–500 g) pilnīga termokīmiskā pārveidošanās (iekārtā ar jaudu līdz 4 kW) ilgst aptuveni 2900–3800 s.

Degšanas procesa raksturojošo parametru kinētisko mērījumu datu apkopošana tika veikta reizi sekundē, izmantojot katram mērījumam tiešsaistes reģistratorus, kas pēc tam tika apstrādāti, izmantojot *MS Office Excel* programmnodrošinājumu. Pamatojoties uz kinētiskajiem mērījumiem, tika aprēķinātas dažādu parametru vidējās vērtības atsevišķiem biomasas paraugu termokīmiskās konversijas posmiem. Izvērstā informācija par mainīgo izejas parametru kontroli ir apkopota 2.2. nodaļā.

Pēc katrā eksperimenta rezultāti bija izvērtēti un salīdzināti ar iepriekšējiem, izvērtējot procesu atkārtojamību. Dažādu izejas parametru rezultātu (piem., plūsmas dinamikas izmaiņas, iekārtas jaudas izmaiņas, gāzifikācijas un degšanas produktu sastāva izmaiņas un tml.) validēšanai bija paveikti vismaz pieci atkārtojumi. Promocijas darba ietvaros kopumā ir veikti aptuveni 60 eksperimenti, ir apstrādāti un analizēti apjomīgi dati, lai sniegtu plašu pētījumu gan par cietā biokurināmā termokīmiskām pārvērtībām, gan par elektrisko spēku iedarbību uz degšanas procesa dinamikas veidošanos.

Kopsavilkumā degšanas process bija uzturēts pie nemainīgiem gaisa padeves ieejas parametriem, kuri ir optimāli dažādu biomasu stacionārā pašuzturoša degšanas posma nodrošināšanai. Tas tika veikts ar nolūku izvērtēt degšanas procesa raksturojošo parametru izmaiņas elektriskajā lauka un liesmas mijiedarbības procesā. Rezultāti, kas iegūti laika posmā no 2014. līdz 2019., tika publicēti zinātniskajos žurnālos un prezentēti starptautiskajās konferencēs. Elektrodinamiskās kontroles tehnoloģijas efektīvums biomasas sadedzināšanai ir pārbaudīts dažādu konfigurāciju un dažādu jaudu degļiem.

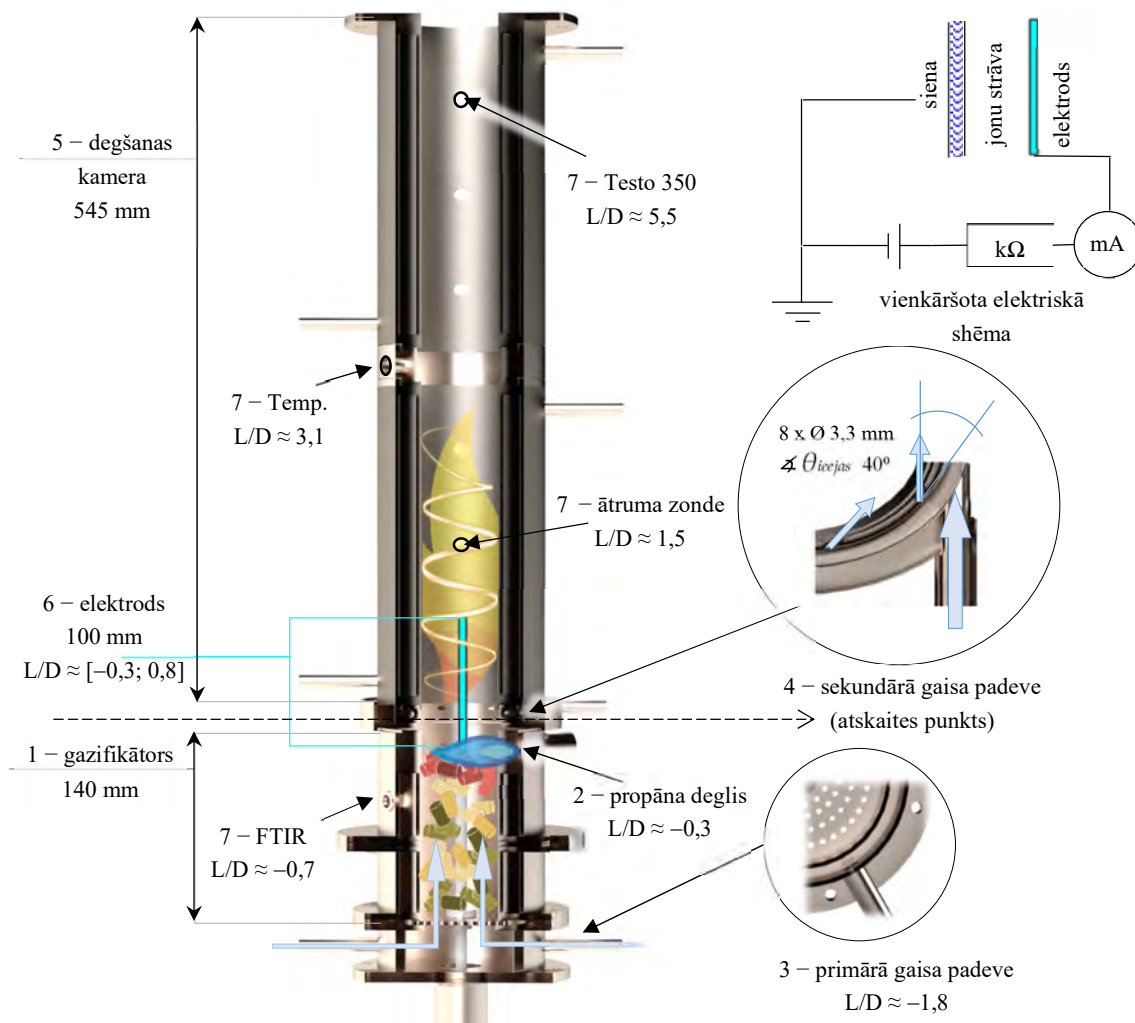
## 2.1. Eksperimentālās iekārtas apraksts

Eksperimentālo pētījumu mērķi bija izpētīt dažādas izcelsmes granulētas biomasas termokīmisko pārvērtību elektrodinamiskās kontroles iespējas, izvērtējot elektriskā lauka ietekmi

uz granulētas biomasas termiskās sadalīšanas procesu kinētiku, gazifikācijas produktu veidošanos, uzliesmošanu un degšanas procesu kinētiku, izvērtējot elektriskā lauka ietekmi uz liesmas virpuļplūsmas raksturojošo parametru izmaiņām, uz siltuma daudzumu, kas izdalās biomasas gazifikācijas un gaistošo vielu degšanas procesā, kā arī uz degšanas procesa efektivitāti un degšanas produktu sastāva veidošanos.

Lai sasniegtu eksperimentālo pētījumu mērķus, bija izmantota laboratorijas mēroga eksperimentālā iekārta granulētas biomasas degšanas un siltuma ražošanas procesu pētījumiem. Eksperimentālā iekārta ir periodiskās darbības reaktors ar kopējo siltuma jaudu līdz 4 kW, kurā tiek ierosināta granulētas biomasas diskrēto porciju termiskās sadalīšanās (gazifikācija) un tiek nodrošināta termiskās sadalīšanās produktu sadedzināšana. Eksperimentālās iekārtas degšanas kameru veido ar ūdeni dzesējams sekcionēts cilindriskais kanāls ar iekšējo diametru  $D = 88 \text{ mm}$  un kopējo garumu līdz  $L_{kop} \approx 750 \text{ mm}$ .

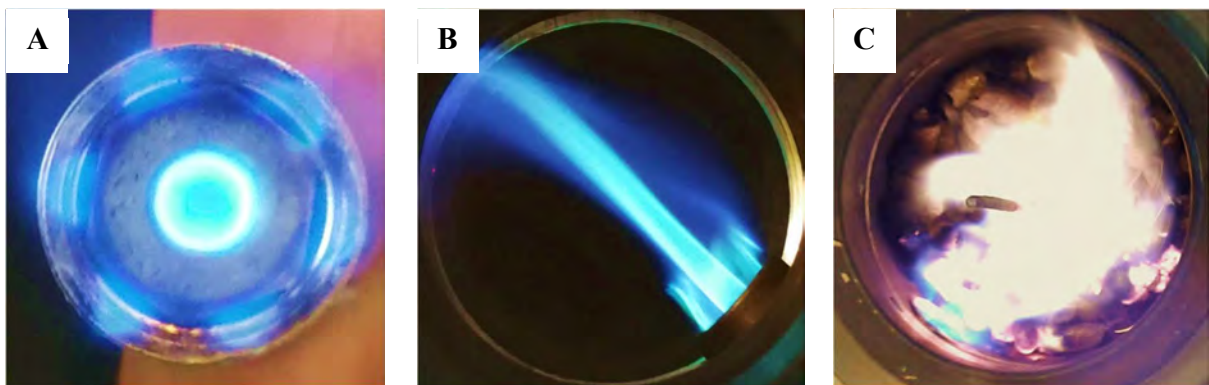
Iekārtas konstrukcijas galvenās sastāvdaļas ir redzamas 19. attēlā, kur:



19. att. Eksperimentālās iekārtas trīsdimensiju zīmējums.

- 1 - cilindrisks ūdens-dzesējamais biomasas gazifikators ar garumu 140 mm, kurš, uzsākot eksperimentu, tiek piepildīts ar biomasas granulām līdz propāna liesmas padeves sprauslai;
- 2 - propāna deglis, kas paredzēts biomasas termiskās sadalīšanās un degšanas procesa ierosināšanai (20. att. – B, C);
- 3 - primārā aksiālā gaisa padeve  $G_z$  gazifikatora lejas daļā caur sietiņu (acu izmērs  $\approx 2-3$  mm) gazifikācijas procesa uzturēšanai;
- 4 - sekundārā gaisa virpuļplūsmas padeve  $G_\theta$  degšanas kameras pamatnē caur 8 azimutālām atverēm ar diametru 3,3 mm un izplūdes leņķi pret pieskari  $40^\circ$ ;
- 5 - divas cilindriskas ūdens-dzesējamās degšanas kameras sekcijas ar garumu  $L = 250$  mm un atverēm (7) liesmas parametru lokālajiem mērījumiem;
- 6 - aksiāli simetrisks nihroma elektrodus ar garumu 100 mm un diametru 3 mm, mainot pielikto pozitīvo potenciālu no 0 līdz 1,8 kV un ierobežojot jonu strāvu līdz 7 mA (ar 248 k $\Omega$  pretestību). Vairāk par elektriskā lauka nodrošināšanu un iekārtas elektriskiem aspektiem skatīt 2.1.1. apakšnodaļā.

Caur diagnostikas atverēm (7) degšanas kamerā ievada termopārus, zondes plūsmas ātruma vai gazifikācijas/degšanas produktu sastāva mērījumiem. Lai novērtētu saražotā siltuma daudzumu biomasas degšanas procesā, tiek veikti dzesējamā ūdens kalorimetriskie mērījumi, kas ietver dzesējamā ūdens plūsmas un temperatūras mērījumus kanāla sekciju ieejā un izejā (sk. 2.2.10. apakšnodaļā). 19. attēlā ir redzams viens no mērīšanas zonu izvietojanas paņēmieniem, tomēr mērinstrumentu izvietojums tika mainīts atbilstoši mērījumu metodikai un mērķiem. Mērinstrumentu izvietojums ir noteikts pēc  $L/D$  parametra, kur  $L$  ir mērinstrumenta pozīcija attiecībā pret sekundārās gaisa padeves sprauslu, bet  $D$  ir degšanas kameras iekšējais diametrs. Plašāk par mērījumu instrumentiem un metodiku skatīt 2.1.3. apakšnodaļā.



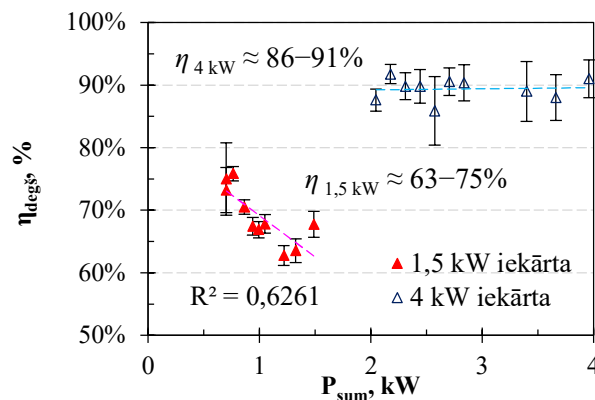
20. att. Propāna degļa sprausla (A), propāna liesmas struktūra tukšajā degšanas kanālā (B) un biomasas termoķīmisko procesu ierosināšana ar propāna liesmu (C  $\approx 300$  s).

Lai veiktu biomasas gazifikācijas un degšanas procesu pētījumus, granulētās biomasas diskrētas porcijas tika ievietotas gazifikācijas sekcijā virs metāliskā sieta ( $L/D \approx -1,8$ ) līdz propāna degļa centrālajai līnijai ( $L/D \approx -0,3$ ). Biomasas slāņa augstums eksperimentālajā iekārtā ir

120 mm, un atkarībā no biomasas granulu blīvuma slāņa kopēja masa ir 440 g (salmiem  $\rho = 557 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 470 g (koksnei  $\rho = 612 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) un 500 g (kūdrai  $\rho = 690 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Siltuma padeve ar propāna liesmu gazifikātorā bija ierobežota līdz  $P_{prop} = 0,86 \pm 0,01 \text{ kW}$ , un tika izmantota biomasas gazifikācijas un degšanas ierosināšanai (20. att.). Propāna padeve tika pārtraukta pēc 400 sekundēm (500 s priekš kūdras), kad iekārtā izveidojās granulētās biomasas pašuzturoši gazifikācijas un degšanas procesi.

Biomassas termiskās sadalīšanas procesa uzturēšanai zem granulu slāņa ir nodrošināta primārā gaisa padeve ( $G_z = 30 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ ;  $0,6 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ ) pie gaisa padeves pārsvara  $\alpha_z \approx 0,4-0,5$ . Sekundārā gaisa virpuļplūsmas padeve, kas paredzēta biomasas gazifikācijas produktu degšanas procesa uzturēšanai degšanas kamerā, tika nodrošināta virs granulu slāņa ar vidējo ātrumu  $G_\theta = 40 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$  ( $0,8 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ ), pie vidējā gaisa padeves pārsvara liesmas reakcijas zonā  $\alpha_\theta \approx 1,2-1,5$ .

Ekspērimētālās iekārtas uzbūve ir mērogota pēc mazāk jaudīgas – 1,5 kW ekspērimētālās iekārtas, kura bija izmantota degšanas procesu izpētei vairākos iepriekšējos ERAF projektos un validēta dažādās starptautiskās konferencēs [19], [160], [168]. Tomēr 1,5 kW iekārtai bija daži trūkumi: diagnostiskās sekcijas nebija dzesējamas, tāpēc palielinājās siltuma zudumi apkārtējā vidē. Turklāt, vairāku mērzondu vienlaicīgā ievietošana mazā cilindriskā kanālā ( $D = 60 \text{ mm}$ ) stipri ietekmēja virpuļplūsmas dinamiku un tās raksturojošos parametrus. Veidojot ekspērimētālo iekārtu ar jaudu līdz 4 kW, ir saglabāts galvenais konstruktīvais izpildījums, kas ļauj nodrošināt līdzīgu virpuļplūsmas veidošanas dinamiku (26. att.), uzlabojot degšanas raksturojošos parametrus vidēji par 20 % (21. att.).



21. att. Degšanas procesa efektivitātes salīdzināšana 1,5 kW un 4 kW iekārtās.

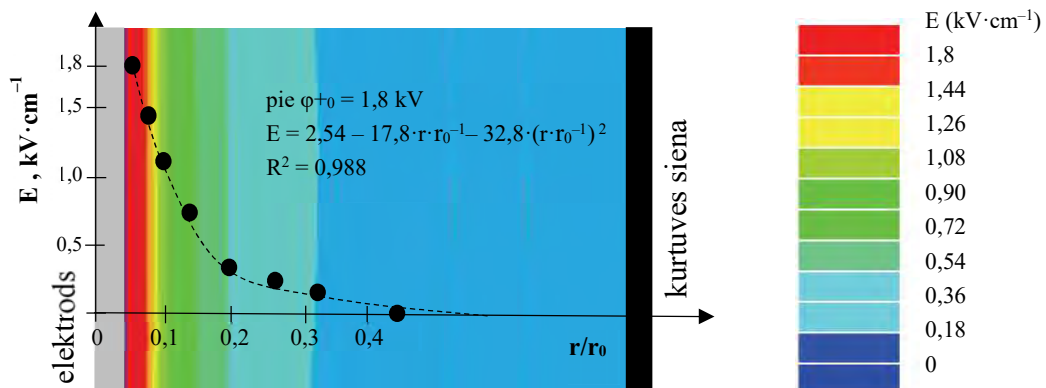
Pie vienāda virpuļplūsmas dinamikas uzlabotā režīma iekārta palīdzēja apbēt ārējā elektriskā lauka ietekmes efektu uz biomasas degšanas procesu [127], un veikt oriģinālus pētījumus promocijas darba ietvaros, ļaujot labāk izprast procesu un interpretēt iepriekš sasniegtos rezultātus. Jaunā iekārta paver iespējas eksperimenta laikā pārvietot elektrodu pa iekārtas garumu, sekojot liesmas dinamikas izmaiņām iekārtā, līdz ar to nodrošinot efektīvāku elektriskā lauka iedarbību uz liesmu dažādās biomasas degšanas procesa attīstības stadijās.

### 2.1.1. Elektriskā lauka konfigurācija un parametri

Elektroda un vienkāršotā elektriskā lauka pieslēguma shēma ir dota 19. att., kur pie līdzstrāvas (DC) barošanas bloka izejas pozitīvās spaiļes virknē pievienota omiskā pretestība, ampērmetrs, un degšanas zonas pamatnē aksiāli ievietotais nihroma stieples elektrods. Barošanas bloka negatīvā spaiļe ir iezemēta kopā ar iekārtas konstruktīvam daļām, lai nodrošinātu potenciālu starpību telpā starp centrālo pozitīvi lādēto elektrodu un degšanas kameras sienām.

Līdzstrāvas barošanas bloka B5-40 veidoto potenciālu iespējams regulēt robežās no 0,3 līdz 3,0 kV ar precizitāti 0,06 kV. Eksperimentālo pētījumu laikā spriegumu regulēja robežās no 0,6 kV līdz 1,8 kV, tāpēc pieliktā elektriskā potenciāla kļūda var mainīties 3–10 % robežās. Kopējo saslēgumu pretestību (248 kΩ) veido 16 x 15 kΩ ±0,5 % rezistori (S2-29V 1W) ar darba temperatūru līdz +428° C. Ar šādu kopējo omisko pretestību ir iespējams ierobežot elektriskās izlādes veidošanos telpā starp elektrodiem, ierobežojot jonu strāvu līdz 7 mA. Elektrods ir izgatavots no nihroma (NiCr) ar stieples kopējo garumu 400 mm un diametru 3 mm un ir aksiāli, cauri biomasas slānim, ievietots degšanas zonas pamatnē. Elektroda neizolētās darba virsmas garums ir 100 mm un tā sniedzas no biomasas slāņa virsmas ( $L/D = -0,3$ ) līdz degšanas zonas pamatnei. Elektrodu ir iespējams pārvietot z-ass virzienā.

Elektriskais lauks veidojās telpā starp pozitīvi lādēto elektrodu un iezemētām degšanas kameras sienām. Attālums starp centrālā elektroda virsmu un degšanas kameras sienām ir aptuveni 40 mm. Biomasas parauga degšanas laikā, izmantojot elektrisko zondi (NiCr Ø 3 mm vadu), ar voltmetru tika novērtēts elektriskā potenciāla sadalījums telpā starp pozitīvi lādēto elektrodu un saņemto degšanas kameras sienu. Ir konstatēts, ka sprieguma kritums veidojas pie pozitīvi lādētā elektroda virsmas un elektriskā lauka intensitāte izteikti samazinās pie  $r/r_0 > 0,2$  (22. att.).



22. att. Elektriskā lauka intensitātes sadalījums degšanas kamerā starp centrālo stieples elektrodu un iezemēto metālisko sienu [235].

Šāda elektriskā robežslāņa veidošanos pie elektroda virsmas konstatēja arī *Lawton* un *Weinberg* [198], kura veidošanos nosaka jonu-elektronu koncentrācija un plūsmas dinamiskais spiediens, izraisot elektriskā lauka intensitātes samazināšanos, palielinoties attālumam no elektroda

virsmas [209], [235]. *Dolmansey et al* skaitliski modelēja elektriskā lauka intensitātes sadalījumu līdzīgajai elektroda konfigurācijai un apliecināja, ka lauka intensitāte krīt līdz minimālai vērtībai aptuveni pēc  $r/r_0 > 0,3$  uz liesmas frontes, bet pēc  $r/r_0 > 0,7$  nedaudz pieaug (22 .att.) [235]. Tomēr nepieciešams uzsvērt, ka lauka intensitātes pieaugums pēc  $r/r_0 > 0,7$  ir novērojams tikai apstākļos, kad pie kurtuves sienas ir pielikts pretējās zīmes potenciāls. Ja kurtuves siena ir saņemta, sekundāro elektriskā lauka intensitātes pieaugumu novērot nevar un lauka iedarbības zona ir ierobežota ar telpu starp centrālo elektrodu un liesmas fronti [198]. Šāda elektroda konfigurācija nodrošina stipru lauka intensitāti robežslānī pa visu neizolēto elektroda garumu [235].

Ir jāatzīmē, ka aksiāli ievietotu elektrodu degšanas procesu elektriskai kontrolei izmanto samērā maz (*Panteleev et al.* 1992. g. un *Mitchell et al.* 1969. g.) [236], [237] un tā iedarbības mehānisms uz liesmu joprojām ir neskaidrs, tāpēc darbā tika veikti kompleksi gazifikācijas un degšanas zonas raksturojošo parametru mērījumi, lai precizētu šādas konfigurācijas lauka un liesmas virpuļplūsmas mijiedarbības mehānismu. Balstoties uz virpuļplūsmas aksiālā un azimutālā ātruma sadalījumu eksperimentāliem mērījumiem, liesmas struktūras izmaiņām un sprieguma gradienta mērījumiem plūsmā, tika secināts, ka pie dotās konfigurācijas elektriskais lauks sasniedz maksimālo vērtību pie elektroda virsmas  $r/r_0 = [0; 0,3]$ . Tāpēc aprēķinot elektriskā lauka intensitāti tika analizēta telpa starp pozitīvo elektrodu un degšanas zonu. Teorētiskā elektriskā lauka intensitātes aprēķināšanai tika izmantota 105. formula, kur  $U_{\varphi,pieliktais}$  ir nodrošinātais ar barošanas bloku spriegums pieliktais pie centrālā elektroda, bet  $\Delta x$  ir attālums starp elektroda virsmu un degšanas zonu pie  $r/r_0 = [0; 0,3]$ , kurš aptuveni ir vienāds ar 13 mm.

$$E_{\varphi} = \frac{U_{\varphi,pieliktais}}{\Delta x} \quad (105)$$

$$E_{\varphi}^{\prime} = E_{\varphi} - \frac{I_{eksp} \cdot R_{\Omega}}{\Delta x} \quad (106)$$

Plūsmas dinamikas pētījumu rezultātā ir konstatēts, ka jonu vēja radiālā kustība lauka virzienā (no liesmas centrālās daļas uz perifēriju) izraisa degšanas zonas paplašināšanos, nedaudz izmainot elektriskā lauka sadalījumu telpā starp elektrodiem, tomēr šis efekts ir ierobežots ar vides elektrisko caurlaidību pie dotās elektroda konfigurācijas, un tāpēc netiek ņemts vērā teorētiskā elektriskā lauka intensitātes aprēķinos. Balstoties uz eksperimentā iegūto vidējo jonu strāvu  $I_{eksp}$  (7. tab., 3.3. nodaļa) un izmantoto pretestību  $R_{\Omega}$ , pieliktā elektroda potenciāla vērtība ir rediģēta pēc omiskā sprieguma krituma, tāpēc nodrošinātā elektriskā lauka intensitātes aprēķināšanai izmanto 106. formulu. Izvērtējot eksperimentāli iegūtas jonu strāvas vērtības, elektriskā lauka un liesmas mijiedarbības efektu raksturošanai tika izmantotas elektriskā lauka intensitātes vidējās vērtības (7.tab.) atbilstoši elektroda potenciāla vērtībām.

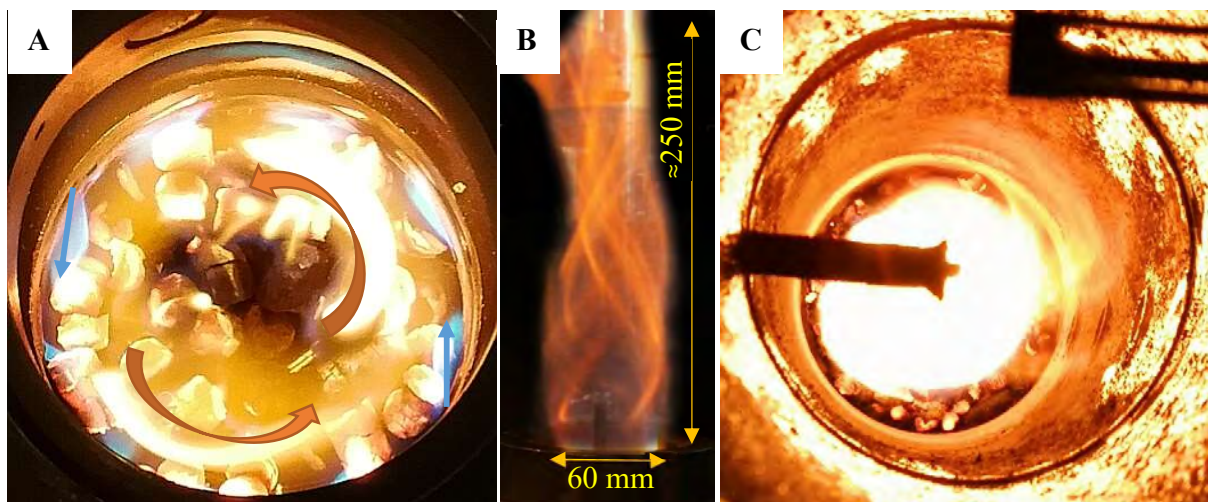
7. tabula

**Ekspierimentāli nodrošinātās vidējās elektriskā lauka intensitātes vērtības**

<i>Pieliktais potenciāls</i> $U\phi+$ , kV	<i>Ekspierimentālā vidējā strāva</i> $I$ , mA	<i>Teorētiskā el. lauka intensitāte</i> $E\phi$ , kV·cm <sup>-1</sup>	<i>Nodrošinātā el. lauka intensitāte</i> $E\phi$ , kV·cm <sup>-1</sup>
0,6±0,06	1,17±0,05	0,476±0,06 ≈ 0,5	0,245±0,06 ≈ 0,25
1,2±0,06	2,31±0,05	0,952±0,06 ≈ 1,0	0,498±0,06 ≈ 0,50
1,5±0,06	2,85±0,05	1,190±0,06 ≈ 1,2	0,629±0,06 ≈ 0,63
1,8±0,06	3,47±0,05	1,428±0,06 ≈ 1,4	0,746±0,06 ≈ 0,75

**2.1.2. Virpuļplūsmas dinamikas veidošanās ekspierimentālā iekārtā**

Gāzes un šķidrās degvielas degšanas un siltuma ražošanas rūpnieciskās iekārtās degšanas procesu uzlabošanai bieži izmanto virpuļplūsmas, kur primāro aksiālo gaisa plūsmu izmanto degvielas samaisīšanai ar gaisu, bet sekundāro gaisa virpuļplūsmu pievada izplūdes gāzes piesārņojošo komponentu kontrolei un to daudzuma samazināšanai [162]. Cietā kurināmā degšanas iekārtās vairāk izmanto gazifikācijas vai putekļu izsmidzināšanas paņēmienus [112]. Stacionārā slāņa cietā kurināmā degšanas procesa veidošanai, gazifikācijas procesa ierosināšanai un uzturēšanai izmanto primāro aksiālo gaisa padevi zem granulu slāņa, bet gaistošo vielu degšanas procesa uzturēšanai izmanto sekundārā gaisa virpuļplūsmu – tādā veidā apvienojot biomasas gazifikācijas un gaistošo vielu degšanas procesus [233], [238], [239].



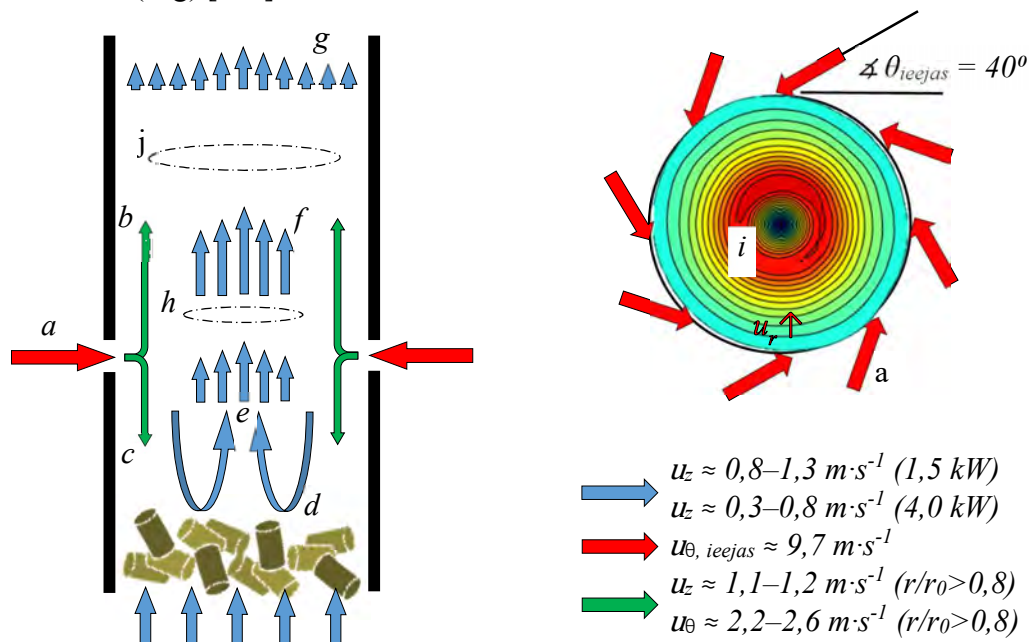
23. att. Liesmas virpuļplūsmas veidošanās procesa skats no augšas pie  $L/D \approx -0,3$  (A); pašuzturošā degšanas procesa liesmas virpuļplūsmas skats no sāna  $L/D \approx [0; 4]$  (B) un skats no augšas cilindriskā degšanas kameras kanālā pie  $L/D \approx 5$  (C).

Promocijas darba ietvaros pie dotās ekspierimentālās iekārtas konfigurācijas tika izmantota simetriski-cilindriska konverģējošā virpuļplūsma (23. att.). Lai izvērtētu elektriskajā laukā veidotā jonu vēja ietekmi uz virpuļplūsmas dinamikas veidošanos, izmantojot 1,5 kW iekārtu, iepriekš jau



tika veikti kompleksi pētījumi [160], [168], [234] par plūsmas aksiālā un azimutālā ātruma radiālā un aksiālā sadalījuma veidošanos, izvērtējot primārā un sekundārā gaisa padeves un elektriskā lauka ietekmi uz plūsmas dinamikas veidošanos pie  $S \ll 1$ . Turpinot šos pētījumus iekārtā ar jaudu līdz 4 kW, tika izvērtētas virpuļplūsmas dinamikas izmaiņas, kas saistītas ar degšanas kameras diametra izmaiņām.

Iepriekš veiktie plūsmas dinamikas veidošanās modelējošie pētījumi cilindriskā kanālā ļāva secināt, ka sekundārā virpuļplūsmas padeve gaisa degšanas zonas pamatnē (24. 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, veidojot pretplūsmu biomasas gazifikācijas produktu aksiālai plūsmai, intensificējot gaistošo vielu un gaisa virpuļplūsmas sajaukšanos un pakāpeniski samazinot lejupvērstās virpuļplūsmas intensitāti (d). Sasniedzot biomasas slāni, notiek virpuļplūsmas atstarošanās, palielinot plūsmas aksiālo ātrumu plūsmas centrālajā daļā, kurā novēro plūsmas laminarizāciju un intensīva degšanas procesa veidošanos (f) [22], [160], [167], [168]. Respektīvi, plūsmas ātruma aksiālo un azimutālo komponentu eksperimentālie pētījumi, kā arī plūsmas matemātiskā modelēšana ļauj secināt, ka pie dotās iekārtas konfigurācijas virpuļplūsmas intensitāte samazinās virzienā uz plūsmas centru (b, c) un plūsma centrālā daļā veidojas lamināra degšanas procesa dinamika (e–g) [240].



24. att. Eksperimentālās iekārtas virpuļplūsmas veidošanās shēma.

Ir jāatzīmē, ka reversās plūsmas veidošanās ar negatīvu plūsmas aksiālo ātrumu (25. att. – B) ir konstatēta arī virpuļviesuļu pētījumos [163], [164], [241]. Atbilstoši liesmas virpuļviesuļu eksperimentālajiem pētījumiem [121], [242], šādu plūsmu radiālā ātruma komponente ir vērsta uz centru un tās vērtībā ir maksimālā pie azimutālā gaisa padeves (a), veidojot plūsmas kontrakciju

(h) un daļiņā spiediena pieaugumu tās centrālajā daļā (i). Vienlaikus virpuļplūsmas centrālajā daļā virs azimutālā gaisa padeves sprauslas var būt vērojama reversā aksiālā gāzes kustība un recirkulācijas zonas veidošanās. Tomēr atkarībā no plūsmas režīma ( $S$ ,  $Re$  un  $\alpha\theta_{ieejas}$ ) recirkulācijas zonas garums un tās izvietojums liesmā var mainīties. Pie mazajiem Reinoldda skaitļiem ( $Re < 400$ ) un sekundārā gaisa izplūdes leņķa robežas no  $10^\circ$  līdz  $30^\circ$  recirkulācijas zona var vispār neveidoties (25. att. – A).

Izmantojot 105.–106. formulas eksperimentālai iekārtai tika aprēķināts Reinoldda skaitlis virpuļplūsmas dažādās zonās [164], [241], kur  $Re_\theta$  ir Reinoldda skaitlis azimutālai aukstā gaisa plūsmai pie sekundārā gaisa sprauslas izejas,  $Re_{z, vid}$  ir vidējais Reinoldda skaitlis aksiālai plūsmai noteiktajā šķērsgrīzumā,  $\nu$  ir kinemātiskās viskozitātes koeficients,  $d_{sprauslas}$  un  $D$  ir sprauslas un degšanas kameras diametri.

$$Re_\theta = \frac{u_\theta \cdot d_{sprauslas}}{\nu} \quad (107)$$

$$Re_{z, vid} = \frac{8 \cdot d_{sprauslas}}{D} \cdot \tan(\alpha\theta_{ieejas}) \cdot Re_\theta \quad (108)$$

Pie sekundārā gaisa sprauslas izejas aukstā gaisa ( $\nu = 15,69 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) ātrums  $u_\theta$  teorētiski var sasniegt līdz  $9,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (24. att.), tad  $Re_\theta = 2050$  un  $Re_{z, vid} = 516$ . Ņemot vērā aksiālā ātruma sadalījumu 4 kW iekārtā (26. att. – C, D) un radiālo temperatūras sadalījumu (46. att. – B) pie  $r/r_0 > 0,8$ , pēc 109. formulas var aprēķināt  $Re_\theta$  un  $Re_z$  radiālo sadalījumu (8. tab.) virpuļplūsmas šķērsgrīzumā pie  $L/D \approx 0,5$ , pieņemot, ka virpuļplūsma veidojās no atsevišķām gaisa kustībām kanāla centrā  $r/r_0 = [0; 0,5]$  un pie kanāla sienas  $r/r_0 = [0,5; 1]$ .

$$Re_{\theta, z} = \frac{u_{\theta, z}}{\nu} \cdot \frac{D}{2} \quad (109)$$

8. tabula

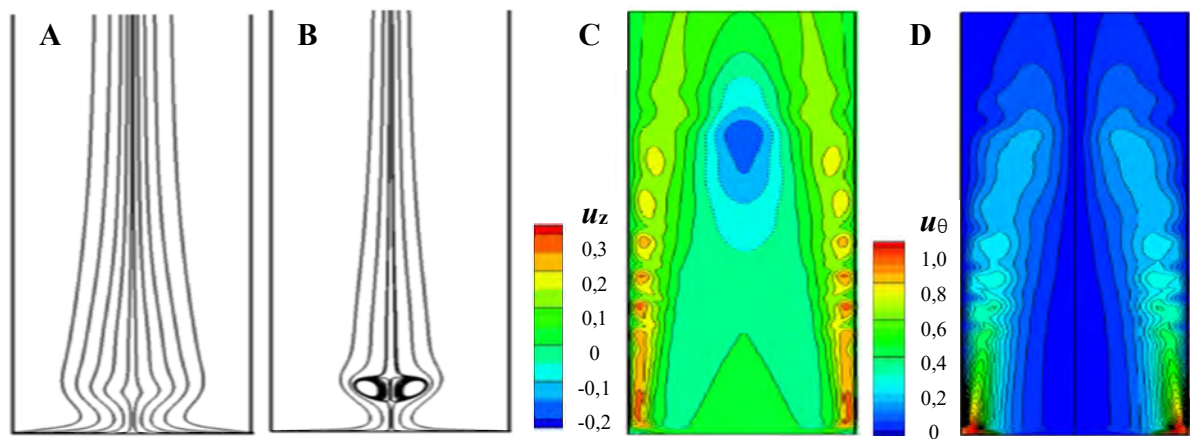
**Reinoldda kritērija radiālais sadalījums 4 kW iekārtā pie  $L/D \approx 0,5$**

$r/r_0$	0 – 0,15	0,15 – 0,3	0,3 – 0,5	0,5 – 0,7	0,7 – 0,8	0,8 – 1,0
$u_\theta, \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	0	0	0	0,5 – 1,05	1,15 – 1,5	1,8 – 2,6
$Re_\theta$	0	0	0	370 – 980	1130 – 1300	1560 – 1940
$u_z, \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	0,2 – 0,5	0,25 – 0,5	0	0	0	0,8 – 1,2
$Re_z$	70 – 155	70 – 90	0	0	0	720 – 1000

$Re_\theta$  vērtībās savirpuļotai sekundārā gaisa kustībai, ievērojot reālo ātrumu un temperatūras sadalījumu, pie sienas ( $r/r_0 > 0,8$ ) mainās aptuveni no 1550 līdz 1950 (8. tab.). Aprēķinot  $Re_z$  centrālajai plūsmas daļai ( $r/r_0 < 0,5$ ) pie eksperimentāli noteiktajiem temperatūras un aksiālā ātruma vērtībām (sk. 3.5. nodaļā), ir konstatēts, ka aksiālā plūsma laminarizējās, jo, atkarībā no parauga

degšanas ilguma un temperatūras, aprēķinātais  $Re_z$  mainās robežās no 70–155, turklāt  $Re_{z, vid}$  degšanas kameras šķērsgrīzumā ir  $\approx 400$ .

*Wang* skaitliskās modelēšanas darbos ir apskatīti dažādi virpuļplūsmas režīmi nenoslēgtā degšanas kamerā, turklāt ir veikta plūsmas režīma veidošanās analīze pie vidējiem  $Re$  skaitļiem un neliela sekundārā gaisa izplūdes leņķa  $\neq \theta_{ieejas}$  [164], [241]. Aprēķinātās virpuļplūsmas aksiālā un azimutālā ātruma komponentes (25. att. – C, D) atbilst ātrumu komponentu maksimālo vērtību eksperimentālo mērījumu rezultātiem pie kanāla sienas (26. att.,  $r/r_0 > 0,8$ ). Kaut gan modelis neievēro (atstarotās no granulu slāņa) lejupvērstās virpuļplūsmas ietekmi uz aksiālo ātrumu plūsmas centrālajā daļā ( $r/r_0 < 0,5$ ), modelējot virpuļplūsmu, *Wang* arī novēroja aksiālā ātruma vērtību pieaugumu centrālajā daļā pie degšanas kameras ieejas (25. att. – C). Pie  $Re \approx 3000$  virpuļa modelis jau neievēro plūsmas laminarizāciju centrā, tomēr *Wang* atzīmē, kā pie stipri mazākiem  $Re$  skaitļiem un  $\neq \theta_{ieejas} = 20\text{--}40^\circ$  robežās (25. att. – A, B), kanāla centrā aksiālās plūsmas līnijas iztaisnojās, bet pie  $\neq \theta_{ieejas} > 40^\circ$  sāk veidoties neliela toroidālā recirkulācijas zona.

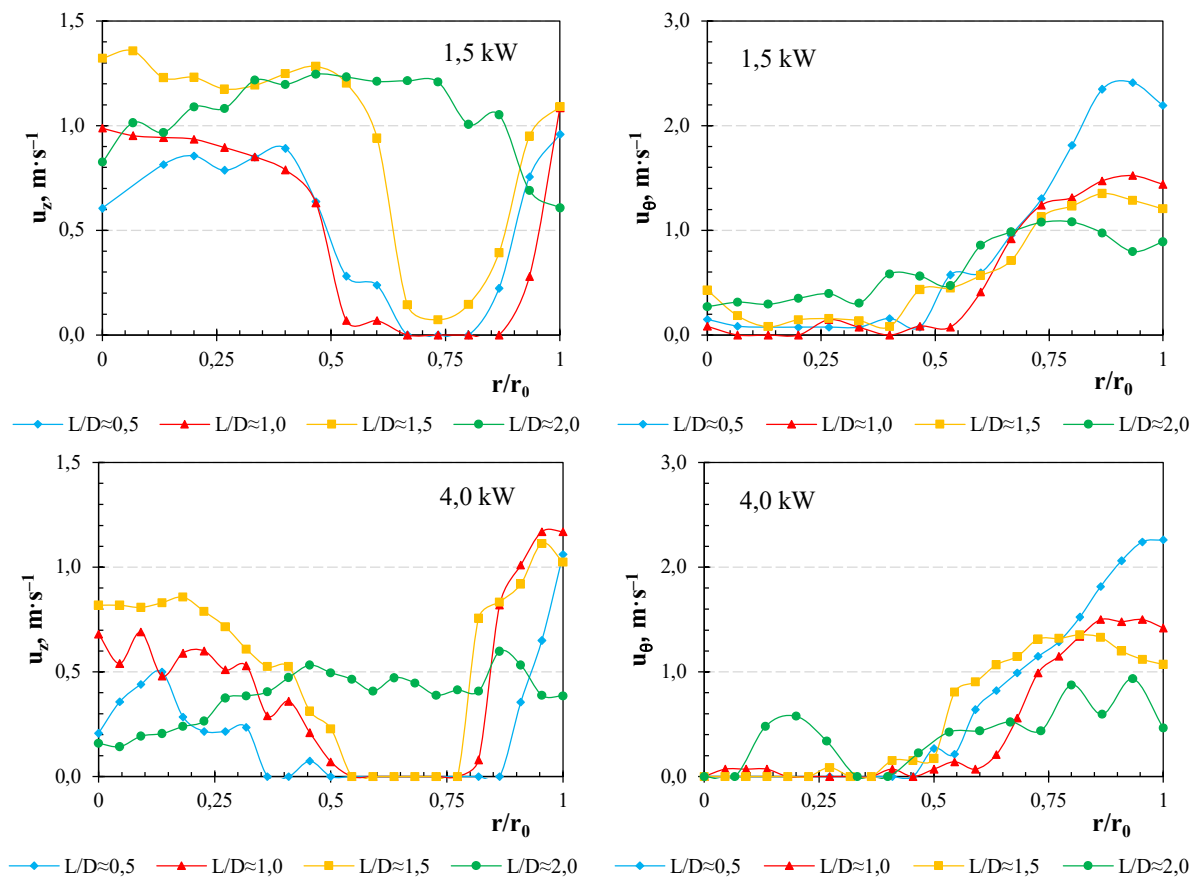


25. att. Virpuļviesuļa plūsmas līniju simulācijas pie  $Re \approx 200\text{--}500$   $\neq \theta_{ieejas} = 30^\circ$  (A) vai  $40^\circ$  (B); virpuļviesuļa simulācijas aksiālā (C) un azimutālā (D) ātruma komponentu simulācijas kontūri pie  $Re \approx 3000$  [164], [241].

Salīdzinot eksperimentāli iegūtos ātruma komponentu profilus 1,5 kW un 4 kW iekārtām ir novērots, ka perifērijas virpuļplūsmas azimutālā ātruma maksimālā vērtība pie sekundārā gaisa ieejas abās iekārtās ir līdzīga. Azimutālā ātruma komponente vienmērīgi samazinās pa kanāla rādiusu, palielinot attālumu no sekundārā gaisa padeves sprauslas  $L/D > 2,0$  (26. att. – B, D). Tomēr starpība starp plūsmas vidējām aksiālā ātruma vērtībām tās centrālajā daļā un perifērijā izmainās, mainoties attālumam no gaisa padeves sprauslas (26. att. – A, C), ko pamatvilcienos nosaka centrālā aksiālā ātruma izmaiņas dažādām iekārtām. Tā ir galvenā atšķirība virpuļplūsmas veidošanās dinamikā 60 mm un 88 mm diametra degšanas kamerām 1,5 kW un 4 kW iekārtās. Jo, palielinot degšanas kameras diametru, samazinās Reynolds skaitlis plūsmas centrālajā daļā. Pēc aksiālā ātruma komponentes sadalījuma degšanas kamerā, var secināt, ka 1,5 kW iekārtā liesma ir vairāk izstiepta (26. att. – A) attiecībā pret kameras  $L_{kop}/D$ . Līdz ar to recirkulācijas zona var

atrsties augstāk liesmā vai izzust vispār reversās lejupvērstās virpuļplūsmas kustības dēļ u (25. att. – A). 4 kW iekārtā vidējais Re skaitlis centrā ir mazāks, liesma ir mazāk izstiepta un mazāk oscilējoša, par ko liecina aksiālā ātruma izteikts samazinājums centrālā daļā un vidējā aksiālā ātruma samazinājums pie  $L/D \approx 2$  (25. att. – C). Aksiālā ātruma samazinājums plūsmas centrā ( $r/r_0 < 0,15$ ) pie  $L/D = 0,5$  liek domāt par recirkulācijas zonas veidošanos 4 kW iekārtā tuvu pie sekundārā gaisa padeves, kuras veidošanās novērota arī Wang darbā (25. att. – B) [164], [241].

Wang savos darbos par virpuļplūsmu pētījumiem secināja, ka toroidālā recirkulācijas zona var pārvietoties pa liesmas garumu, ja plūsmā veidojās nestabilitātes. Savukārt, ja cilindriskais kanāls zem sekundārā gaisa padeves ir daļēji aizpildīts ar granulu slāni  $L/D = [-1,8; -0,3]$ , degšanas kameras ieejā var palielināties plūsmas nestabilitāte. Pirmkārt granulu slānis palielina aksiālās plūsmas hidraulisko pretestību un izmaina lejupvērstās plūsmas dinamikas veidošanos [167]. 4 kW iekārtā biomasas slāņa augstums ir lielāks, līdz ar to plūsmas aksiālais ātrums pēc granulu slāņa ir mazāks nekā 1,5 kW iekārtā. Lejupvērstās plūsmas atstarošanas dēļ no neviendabīgā granulu slāņa, rodas papildus plūsmas nestabilitātes. Tāpēc eksperimentos ar biomasas granulu liesmu recirkulācijas zonas veidošanos ir grūti konstatēt, bet var noteikt vispārējās virpuļplūsmas pazīmes.

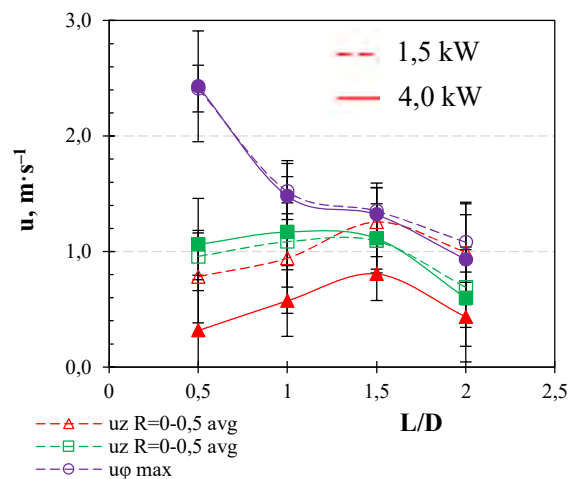


26. att. 1,5 kW un 4 kW eksperimentālo iekārtu aerodinamiskā režīma salīdzināšana.

Eksperimentālā iekārtā mērīt ātrumu sadalījumu tuvu pie sekundārā gaisa sprauslas vai zemāk praktiski ir ļoti sarežģīti vai neiespējami, jo tajās degšanas stadijās, kad biomasas slānis ir praktiski tuvu mērīšanas instrumentam – lidojoši pelni un kvēpu daļiņas izraisa mērījumu zondes aizsērēšanos. Tomēr pēc 26. attēlā dotajiem aksiālā un azimutālā ātruma sadalījumiem var spriest par galvenajām atšķirībām abām iekārtām, novērojot līdzīgus azimutālā ātruma maksimumus, kuri raksturo virpuļu veidojošo gaisa plūsmu gar degšanas kameras sienām, un samazinātās aksiālā ātruma vērtības centrā, veidojot labvēlīgākus apstākļus gazifikācijas produktu sadegšanai.

Palielināts centrālās plūsmas kustības ātrums mazas jaudas iekārtā (1,5 kW) ietekmē arī elektriskā lauka efektu uz plūsmas dinamiku, to samazinot, jo ir konstatēts, ka jonu vēja iedarbība uz plūsmu pie lielajiem kustības ātrumiem stipri pavājinās [182], [204], [213]. Izmantojot iekārtu ar lielāku degšanas kameras kanāla diametru, ir izdevies samazināt centrālās ( $r/r_0 = [0; 0,5]$ ) augšupvērstās plūsmas vidējo aksiālo ātrumu par  $\approx 35\text{--}60\%$  dažādās iekārtas augstumos, kas ir attēlots 27. grafikā ar sarkanajām līknēm.

Perifērijas aksiālā un azimutālā ātruma komponentu vidējo vērtību sadalījumā par iekārtas augstuma konstatē izmaiņas, kuras ietekmē virpuļplūsmas veidošanas dinamiku, bet neietekmē virpuļviesuļa kopējo struktūru, jo galveno ātrumu komponentu sadalījuma pazīmes saglabājas. Secināms, ka galvenās izmaiņas plūsmas dinamikā starp 1,5 kW un 4 kW iekārtām notiek tieši augšup vērstās plūsmas centrā, kur ir novērojams aksiālā ātruma komponentes samazinājums.



27. att. 1,5 kW un 4 kW eksperimentālo iekārtu plūsmas dinamiku režīma salīdzināšana.

Tomēr galvenā negatīvā virpuļplūsmas aerodinamiskā īpašība saglabājas abās iekārtās – centrālās plūsmas kontrakcija pie sekundārā gaisa pievada (24. att. – h) ar sekojošo aksiālā ātruma palielināšanos pie  $L/D \approx 1,5$ , kas noved pie straujākas degmaisījuma aksiālās kustības, un samazina gazifikācijas produktu uzturēšanās ilgumu reakcijas zonā, palielinot CO un  $C_xH_y$  kaitīgo izmešu daudzumu dūmgāzēs. Izmantojot arējā elektriskajā laukā radīto jonu vēja kustību, kura būtu virzīta sekundārā gaisa radiālā ātruma komponentes pretējā virzienā, ir iespējams paplašināt reakcijas

zonu un gazifikācijas produktu uzturēšanās ilgumu degšanas zonā, tādējādi samazināt ar sekundārā gaisa padevi saistīto negatīvo plūsmas kontrakcijas efektu.

## 2.2. Mērīšanas metodoloģijas apraksts

Biomases degšanas elektrodinamiskās vadības eksperimentālie pētījumi bija veikti pie vienādiem kontrolējamiem sākuma parametriem. Tas ir veikts ar nolūku, lai veiktu mainīgo parametru salīdzināšanu ārējā elektriskajā laukā un bez tā, kā arī noteikt efekta izmaiņas, mainot elektrodam pielikto spriegumu. Mērījumu metodikas apraksts ietver darbā izmantotās mēraparatūras aprakstu, parametru mērīšanas nosacījumus, robežvērtības un mērījumu kļūdu aprakstu. Izmantotās mērīšanas metodes var sadalīt 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 ( $u_z$ ,  $u_\theta$ ), liesmas temperatūras (T), gazifikācijas produktu ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{CH}_4$ ) un dūmgāzu ( $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ) sastāva, biomasas termiskās sadalīšanās ātruma ( $dm/dt$ ,  $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ ), strāvas, kā arī siltuma jaudas kompleksus mērījumus. Liesmas un plūsmas raksturojošo parametru lokālie mērījumi ir veikti tiešsaistē, izmantojot precīzu mikromanipulatoru, kas ļauj pārvietot diagnostikas rīkus (termopārus, ātruma zondes vai gāzes paraugu noņemšanas zondes) degšanas kamerā radiālā virzienā. Plašāk procesa parametru mērīšanai izmantotās metodes ir aprakstītas tālāk apakšnodaļās: 2.2.1.–2.2.5. apakšnodaļās – ieejas parametru kontroles metodes, bet 2.2.6.–2.2.10. apakšnodaļās – mainīgo parametru mērīšanas paņēmieni.

### 2.2.1. Biomasas sastāva un termiskās sadalīšanas procesa kinētikas raksturošana

Biomases (koksnes, salmu, kūdru) sastāva raksturojošo parametru (elementārā un ķīmiskā sastāva, siltumspējas) izpēti, kā arī paraugu termogravimetriskās analīzes tika veiktas Latvijas Koksnes Ķīmijas Institutā ERAF projekta 1.1.1.1/16/A/004 līgumdarba ietvaros. Salmu, koksnes un kūdras elementārā sastāva (C, H, N saturs) mērīšanai pēc LVS EN 15104:2011 standarta tika izmantota speciālā elementārās analīzes aparatūra *Vario Macro*, ko ražo *ELEMENTAR Analysensysteme* (Vācija). Elementārā sastāva raksturošanas precizitāte ir vismaz 0,01 % ar parauga mērījuma kļūdu līdz  $\pm 0,5$  %.

Pelnu saturs noteikts, karsējot biomasas paraugu pie  $830 \pm 10$  K grādiem *Carbolite* ELF 11/6B (ražotājs *Carbolite Gero Ltd.*, Apvienotā Karaliste) termiskā (karsēšanas) krāsnī, atbilstoši LVS EN 14775:2010 standartā aprakstītai metodei, kura precizitāte atkarīga no parauga iesvēršanas (līdz 0,5 %).

Augstāko ( $HHV$ ,  $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) un zemāko ( $LHV$ ,  $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) sadegšanas siltumu aprēķināja ar *Friedl et al.* piedāvāto regresijas vienādojumu [243]:

$$HHV = (3,55 \cdot C^2 - 232 \cdot C - 2230 \cdot H + 51,2 \cdot C \cdot H + 131 \cdot N + 20600) \cdot 10^{-3} \quad (110)$$

$$\text{LHV} = \text{HHV} \cdot \left(1 - \frac{W_{\text{mitrums}}}{100}\right) - 2,447 \cdot \left(\frac{W_{\text{mitrums}}}{100} - 18,02 \cdot \frac{H}{200} \cdot \left(1 - \frac{W_{\text{mitrums}}}{100}\right)\right) \quad (111)$$

kur C, H, N ir attiecīgās biomasas atbilstošo elementu stehiometrisks daudzums, bet  $w_{\text{mitrums}}$  ir mitruma saturs biomasas paraugā.

Biomassas termiskās sadalīšanas procesa analīze ir pētīta oksidējošā atmosfērā (gaisa plūsma  $50 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ )  $10 \pm 0,3 \text{ K} \cdot \text{min}^{-1}$  karsēšanas režīmā  $300\text{--}900 \text{ K}$  temperatūras robežās, izmantojot diferenciālās termogravimetrijas un termiskās analizēs metodes (*DTG/DTA*), ar *Mettler Toledo Star System TGA/SDTA 851e* (ražotājs *Mettler Toledo AG*, Šveice) automātisko mērinstrumentu. *DTG* analīzes precizitāte ir  $10^{-6} \text{ g}$  ar mērījumu kļūdu līdz  $0,5 \%$ .

Gaistošo vielu un ogļveida fāzes daudzuma noteikšanai, kā arī lignocelulozes pirolīzes produktu analīzei tika izmantota apvienotā pirolīzes gāzes hromatogrāfijas un masspektrometrijas metode, kuru bieži pielieto polimērmateriālu analīzei. Analīzēm izmantoja *Frontier Labs PY-2020iD/AS1020E* iekārtu (ražotājs *Frontier Laboratories Ltd.*, Apvienotā Karaliste). Paraugu termiski apstrādāja pie  $770 \text{ K}$  ar mērīšanas kļūdu līdz  $\pm 0,5 \%$ .

Cieto biomasas paraugu IS absorbcijas analīzei (*FTIR*) izmantoja spektrometru *Spectrum One* (*Perkin Elmer Ltd.*, Apvienotā Karaliste)  $4000\text{--}400 \text{ cm}^{-1}$  viļņu skaitļu diapazonā ar izšķirtspēju  $4 \text{ cm}^{-1}$  un precizitāti  $0,1 \text{ cm}^{-1}$ . Mērījumam izmantoja KBr tableti, kuru gatavoja pievienojot  $2 \text{ mg}$  analizējamā parauga.

### 2.2.2. Gaisa plūsmas nodrošināšana un padeves kontrole

Primārā, sekundārā un propāna liesmas gaisa padeves un temperatūras mērījumiem ir izmantoti *Testo 6441 DN15* (ražotājs *Testo SE & Co KGaA*, Vācija) plūsmas mērītāji, kuru mērījumu robežas temperatūrai ir  $[253; +333] \text{ K}$ , bet gaisa padeves ātrumam  $[4; 1170] \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ . Gaisa plūsmas kontroles precizitāte ir  $\approx 1,3 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$  jeb  $\approx 3\text{--}4 \%$  no nodrošinātās gaisa plūsmas ātruma  $30\text{--}40 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ . Gaisa plūsmas daudzums ir nemainīgs visā eksperimenta laikā.

### 2.2.3. Potenciāla nodrošināšana uz elektroda un sprieguma kontrole

Sprieguma nodrošināšanai eksperimentālā iekārtā (2.1.1. apakšnodaļa) tika izmantots augstsprieguma līdzstrāvas barošanas bloks *B5-40 (B5-40)*, kura iznākums pēc sprieguma ir  $[0,3; 3,0] \text{ kV}$  robežās ar soli  $0,06 \text{ kV}$ , sprieguma noslodzes maksimālo strāvu līdz  $10 \text{ mA}$  un sprieguma svārstību kļūdu  $\pm 0,3 \%$ . Potenciāla starpības verificēšanai lietoja voltmetru *C502/9* (līdzīga mērinstrumenta ražotājs *OOO Memp*, Krievija), kura sprieguma mērīšanas diapazons ir līdz  $3 \text{ kV}$  un mērinstrumenta kļūda ne vairāk par  $\pm 0,5 \%$ .

### 2.2.4. Biomasas termiskās sadalīšanās ātruma mērīšanas metodika

Granulētās biomasas termiskās sadalīšanās ātruma noteikšanai tika veikta granulū slāņa augstuma izmaiņu mērīšana gazifikātorā, izmantojot brīvi lejupslīdošu keramisku stieni, kas ievietots eksperimentālā iekārtā un balstās uz biomasas slāņa virsmas. Stienim tā augšgalā ir

pievienots rādītājs ar bultiņu (*pointer*), kas, mainoties biomasas slāņa augstumam, brīvi slīd lejup attiecībā pret iekārtai piestiprināto skalu, fiksējot biomasas slāņa augstuma izmaiņas iekārtā tās termiskās sadalīšanās procesā. Pie fiksēta gazifikatora šķērsriezuma laukuma ( $S = \pi r^2$ ), gazifikātorā iebērtā biomasas paraugu masas (dažādas biomasas granulām  $m_{sl} = 440\text{--}500\text{ g}$ ), granulētās biomasas slāņa sākotnējā augstuma ( $L_{sl} = 120\text{ mm}$ ) un granulēto paraugu slāņa blīvuma ( $\rho_{sl} = 557\text{--}690\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) [244] paraugu masas izmaiņas termiskās sadalīšanās procesā ir tieši proporcionālas biomasas slāņa augstuma izmaiņām:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d(L \cdot \pi R^2 \cdot \rho_{sl})}{dt} = \left[ \rho_{sl} = \frac{m_{sl}}{\pi R^2 \cdot L_{sl}} \right] = \pi R^2 \rho_{sl} \frac{dL}{dt} \quad (112)$$

Ievērojot mērinstrumenta mazāko iedaļu 1 mm un 111.vienādojumu, pārrēķina mērinstrumenta kļūdu masas vienībās, tad mērinstrumenta kļūda ir vismaz  $\pm 3,5\text{--}4\text{ g}$  jeb  $\pm 0,8\%$  no biomasas slāņa kopējās masas. Tomēr, ņemot vērā mērījumu biežumu (aptuveni 27 mērījumu uz 1000 s) relatīvā termiskās sadalīšanās ātruma noteikšanas metodikas kļūda ir  $\pm 1,4\%$  [127].

### 2.2.5. Plūsmas ātruma komponentu mērīšanas metodika

Virpuļplūsmas ātruma komponentes lokāliem mērījumiem cilindriskajā kanālā ir izmantots gāzu analizatora *Testo 435* datu pieraksta modulis un *Pito* zonde (ražotājs *Testo SE & Co KGaA*, Vācija). *Pito* zondi plūsmā ievieto caur diagnostiskām atverēm, fiksējot tā attālumu līdz sekundārā gaisa padevei jeb relatīvo vienību  $L/D$ . Mainot *Pito* zondes pagrieziena leņķi attiecībā pret plūsmas aksiālo virzienu ( $0^\circ$  vai  $90^\circ$ ), ir iespējams veikt plūsmas aksiālā  $u_z$  un azimutālā  $u_\theta$  ātruma mērījumus, kuru lielumu nosaka plūsmas statiskā ( $p_{stat}$ ) un dinamiskā ( $p_{di}$ ) spiediena starpība [245]:

$$u_z; u_\theta = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_{stat} - p_{din})}{\rho_{gais}}} \quad (113)$$

Radiāli pārvietojot *Pito* zondi ar soli 2 mm eksperimentālajā iekārtā, tika veikti lokāli ātruma mērījumi degšanas kamerā pie katra fiksētā zondes radiālā novietojuma. Katra ātruma komponentu vērtības mērījumu punktu noteikšanai ar *Testo 435* datu moduli pierakstīja 30 signāla rādījumus ar laika intervālu 1 s.

*Pito 0635 2042/304* zondes ātruma mērījumu robežas ir  $[0;40]\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  un mērinstrumenta kļūda pēc specifikācijas ir  $\pm 0,1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . *Pito* caurules jūtība stipri samazinās pie ātruma vērtībām mazāk par  $0,7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Ievērojot azimutālā ātruma eksperimentālās vērtības ( $\approx 1\text{--}2,3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), ātruma metodikas mērījumu kļūda var sasniegt līdz pat  $\pm 10\%$ , turklāt aksiālā ātruma mērījumu kļūda pieaug līdz pat  $\pm 30\%$ . Tāpēc, lai samazināt mērījumu metodikas kļūdu, viena mērījuma vērtības noteikšanai tika apstrādāti 20 signāla vienības ar soli 1 s. Ātrumu komponentu mērīšana un signāla reģistrācija eksperimenta laikā tiek veikta parasti sākot ar 900 s, kad ir sasniegts pašuzturošs biomasas degšanas process.



### 2.2.6. Jonu strāvas mērīšanas metodika

Izmantojot elektriskā lauka pievienošanas elektrisko shēmu (19. att.) un ņemot vērā sprieguma kritumu degšanas zonā [198], pamatojoties uz liesmas elektriskās neitralitātes likumsakarību [138], ka degšanas procesā (70–71. reakc.) veidojošo jonu skaits ir vienāds ar elektronu skaitu, bet lādēto daļiņu ( $n_i$ ,  $n_e$ ) pārnese lauka virzienā ierobežo joni, kuru termiskās kustības ātrums ir daudz mazāks ( $\approx 10^{-4}$ ) par elektronu, caur liesmu plūstošās elektriskās strāvas stiprumu var pielīdzināt jonu strāvas stiprumam.

Jonu strāvu mērīšanai izmantoja analogsignāla ampērmetru M2044 (līdzīgā mērinstrumenta ražotājs OOO "Занаднпубop", Krievija). Eksperimenta laikā strāvas mērīšanas diapazonu var mainīt robežās no [0,005; 0,75] mA līdz [0,5; 7,5] mA, tāpēc strāvas mērījumu precizitāte atkarībā no mērījumu diapazona ir  $\pm 0,005$  mA vai  $\pm 0,05$  mA. Tā kā vidējā strāva eksperimentu mērījumos bija vidēji 0,5–7,5 mA robežās, var konstatēt, kā elektriskās strāvas mērījumu kļūda eksperimentā maksimāli sasniedz  $\pm 6$  %. Datu pierakstu veica manuāli visā eksperimenta laikā ar soli 50 s, izrēķinot vidēju strāvas stiprumu laika diapazonā.

Lādēto daļiņu (elektronu, jonu) strāvas radiālā un aksiālā sadalījuma mērījumiem darbā ir pielietota *Langmuir* dubultzondes metode [182], [246]. Dubultzonde bija veidota no diviem  $\approx 4,5$  mm attālumā nostiprinātiem NiCr vadiem ( $\varnothing 0,50$  mm), kuri bija savstarpēji izolēti, izmantojot fajansa keramikas  $\varnothing 2,90$  mm caurulītes. Neizolētā vadu daļa, kuras garums bija 5 mm, tika novietots paralēli z-asij. Potenciāla starpības nodrošināšanai starp vadiem tika izmantots līdzstrāvas barošanas bloks B5-40. *Volt-Amper* raksturliķņu 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, kuri reģistrēti 20 s mērījumu laikā.

Pēc *Volt-Amper* raksturliķņu datu analīzes bija noteikts strāvas piesātinājums robežās no 0,6 kV līdz 1,6 kV (pieliktais spriegums). Lokālo strāvas blīvuma mērījumiem turpināja izmantot 0,9 kV spriegumu. Pārvietojot zondi ar mikromanipulatoru (solis 3 mm) pa degšanas kameras rādiusu ir iespējams noteikt strāvas sadalījumu liesmas noteiktajā garumā. Katrā strāvas sadalījuma punkta noteikšanai pa degšanas kameras rādiusu tika veikti vismaz 10 strāvas signāla rādījumi. Ievērojot vidējo eksperimentālo vērtību strāvas piesātinājumā  $\approx 0,4$  mA un mērinstrumenta kļūdu šajā mērīšanas diapazonā ( $\pm 0,05$  mA), vidējā mērījumu kļūda ir 12 %, turklāt lokālo strāvas mērījumu kļūda ir [6; 20] % robežās.

### 2.2.7. Liesmas temperatūras mērīšanas metodika

Liesmas temperatūras mērījumiem darbā ir lietoti – S-tipa (Pt/Pt-Rh) termopāri ar temperatūras mērīšanas diapazonu [273; 1723] K un standarta mērījumu kļūdu  $\pm 1,5$  K. Termopāru veidojošie vadi ir ievietoti divdzīslu fajansa caurulītē, kas savukārt ir ievietota dzesējamā apvalkā. Termopāru veidojošie vadi fajansa caurulītes izejā ir sametināti, veidojot temperatūras jūtīgu spaili, kuras EDS izmaiņas ir proporcionālas apkārtējās vides temperatūras izmaiņām. Izveidotais

termopāris caur diagnostikas atverēm tika ievietots liesmā, nodrošinot, lai termopāra spaiļes viduspunkts būtu ievietots analizējamā liesmas apgabalā.

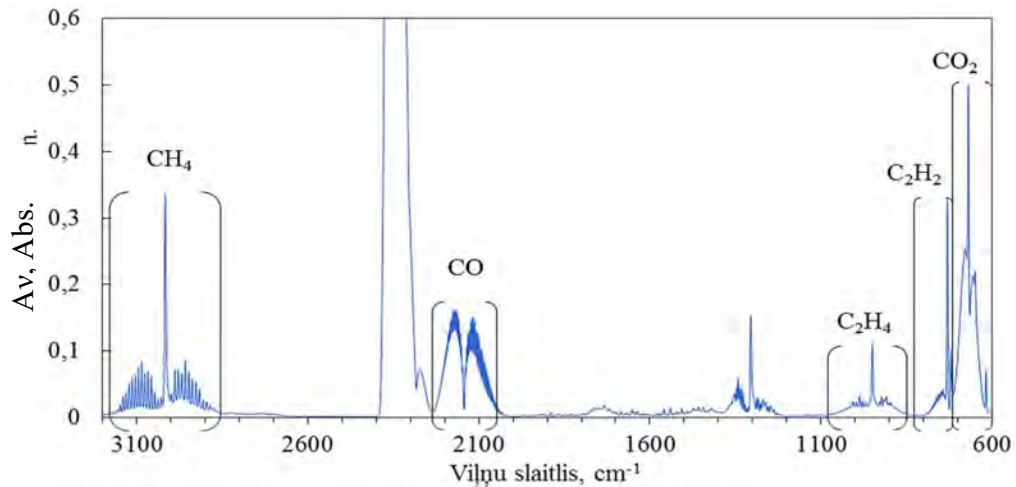
Temperatūras mērījumiem tika izmantots TC-08 termopāru datu reģistrators (ražotājs *Pico Technology Ltd.*, Apvienotā Karaliste) ar termopāru kalibrēšanas programmatūru un signālu filtriem. TC-08 datu reģistrators lasīšanas diapazons ir [223; 2100] K un mērīšanas kļūda  $\pm 0,5$  K. Katrā liesmas punktā temperatūras mērījumi tika veikti reizi sekundē ar kopējo mērīšanas ilgumu 30 s, novērtējot pēc šiem mērījumiem vidējo temperatūru noteiktajā punktā.

Ievietojot termopāri degšanas kameras centrā, tika veikti liesmas temperatūras kinētiskie mērījumi, kuru izmaiņas ir cieši saistītas ar granulētās biomasas paraugu termo-ķīmiskām izmaiņām un ļauj veikt secinājumus par biomasas paraugu termiskās sadalīšanās un gaistošo vielu uzliesmošanas un degšanas procesu veidošanās kinētiku. Gaistošo vielu aksiālās plūsmas un liesmas virpuļplūsmas temperatūras radiālā sadalījuma veidošanās analīzei cilindriskajā kamerā, temperatūras mērījumi tika veikti stacionārā degšanas režīmā, pārvietojot termopāri pa liesmas rādus un veicot temperatūras mērījumus katrā liesmas punktā. Temperatūras sadalījuma mērījumi tika veikti līdzīgi plūsmas ātruma sadalījuma mērīšanas metodikai (sk. 2.2.5. apakšnodaļā), turklāt datu reģistrācija tiek veikta sākot ar 800–900 s, kad ir sasniegts pašuzturošais degšanas process. Temperatūras mērījumu pieraksta 1 reizi sekundē (datu reģistrators veic mērījuma aproksimāciju no 10 signāliem), bet lokāliem mērījumiem katra sadalījuma punkta aprēķinam izmanto vidējo mērījuma lielumu 30 s laikā. Viena eksperimenta laikā temperatūras radiālais sadalījums var tikt uzņemts divas reizes, konstatējot liesmas temperatūras sadalījumu dažādos biomasas degšanas posmos.

Ievērojot vidējo liesmas temperatūras mērīšanas diapazonu [800; 1200] K, termopāru un datu reģistrators standarta kļūda ir ļoti maza  $\pm 0,2$  %, bet nelielu temperatūru sadalījuma mērījuma kļūdu nodrošina mērīšanas metodika  $\pm 2,5$  % pie vidējās temperatūras svārstības 20 K.

### **2.2.8. Gaistošo vielu plūsmas un liesmas sastāva mērīšanas metodika**

Ar Furjē Transformācijas Infrasarkanās Spektroskopijas metodi (*FTIR*) palīdzību tika noteiktas biomasas termo-ķīmiskās sadalīšanās produktu ( $C_xH_y$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $C=O$ ) koncentrācijas izmaiņas dažādās biomasas degšanas stadijās, veicot šo savienojumu absorbcijas joslu intensitātes izmaiņu mērījumus IS spektra vidējā rajonā (28. att.). IS analīze tika veikta ķīmiskiem savienojumiem, kuru struktūru veido saites ar asimetriskām svārstībām. Eksperimentālie gaistošo vielu un degšanas procesu sastāva izmaiņu mērījumi IS spektra rajonā tika veikti sekojošām komponentēm:  $CO_2$  ( $668\text{ cm}^{-1}$ ),  $CO$  ( $2169$  un  $2115\text{ cm}^{-1}$  vidējais lielums),  $C_2H_2$  – acetilēns ( $729\text{ cm}^{-1}$ ),  $C_2H_4$  – etilēns ( $949\text{ cm}^{-1}$ ),  $CH_4$  – metāns ( $3017\text{ cm}^{-1}$ ) un skābes/aldehīdi ( $1758$  un  $1733\text{ cm}^{-1}$ ).



28. att. Gazifikācijas un degšanas produktu jauktā parauga ( $L/D = -0,6$   $r/r_0 = 0,15$ ) absorbcijas spektrs vidēja IS apgabalā.

Gazifikācijas procesa gāzveida produktu sastāva mērījumiem tika izmantots *Varian Cary 640-IR* spektrometrs (ražotājs *Agilent Technologies Inc.*, ASV). Spektrometra uzstādījumi bija sekojoši: ātrums 2,4 GHz, signāla filtrs 5 GHz, UDR 2, izšķirtspēja  $2\text{ cm}^{-1}$ , uzstādītā apertūra 2 un signāla pastiprinājums 4. Pie šādiem uzstādījumiem signāla stiprums tukšai kivetī ( $\approx 225\text{ ml}$ ) ar diviem KBr (7 mm biežumā) lodziņiem sasniedz  $\approx 6\text{--}6,5\text{ Abs}$  (absorbcijas relatīvās vienībās). Spekrālā precizitāte mērinstrumentam ir  $0,005\text{ cm}^{-1}$ , bet zemākā nolasīšanas vērtība, kur signāla un trokšņa attiecība stipri samazinās, ir aptuveni  $0,05\text{ Abs}$ .

9. tabula

**FTIR analizējamo absorbcijas joslu intensitāšu mērījumu standarta kļūdas**

$\text{C}_2\text{H}_2$ $729\text{ cm}^{-1}$	$\text{C}_2\text{H}_4$ $949\text{ cm}^{-1}$	$\text{CH}_4$ $3017\text{ cm}^{-1}$	$\text{CO}_2$ $668\text{ cm}^{-1}$	$\text{CO}$ $2169\text{ cm}^{-1}$	$\text{C}=\text{O}$ $1733\text{ cm}^{-1}$
0,019	0,021	0,043	0,033	0,009	0,003
0,577	0,165	0,477	0,786	0,268	0,024
3%	12%	9%	4%	3%	11%

Lai veiktu IS absorbcijas analīzes, no eksperimentālās iekārtas gazifikatora ( $L/D = -0,6$ ) sākot ar 400 s no kanāla centra ( $r/r_0 = 0$ ) ar zondi tika noņemti 50 ml gāzu paraugi ar laika intervālu 50 s. Gazifikācijas produktu paraugs tika ņemts arī paraugu sastāva analīzei, izmantojot *Testo 350* (sk. 2.2.9. apakšnodaļā), lai noteiktu CO un  $\text{H}_2$  koncentrāciju ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) biomasas paraugu gazifikācijas produktos. Lai samazinātu plūsmas svārstību ietekmi uz parauga precizitāti, viena parauga savākšana notiek aptuveni 3 sekundes. Izmantojot 50 ml atsūknējošo šļirci gazifikācijas gāzes paraugu paņem ik pēc 50 sekundēm, nosakot atsūknēto paraugu vidējo sastāvu 3 sekunžu laika intervālā. Metodes precizitāti apstiprināja, uzņemot dažiem eksperimentiem kinētikas, sūknējot gazifikācijas produktus no eksperimentālās iekārtas gazifikatora caur spektrometra kivetī

tiešsaistes režīmā. Kinētikas mērīšanas metodi nevarēja izmantot visiem eksperimentiem, jo mērinstrumentam, strādājot kinētikas reģistrācijas režīmā, paradās kļūdas, kuru dēļ datu reģistrācijas process tiek pārtraukts bez rezultātu saglabāšanās. Metodes standarta kļūdas noteikšanai IS absorbcijas analīzi veica kinētiskā režīmā ar laika intervālu 2 s. Analizējot dažādas absorbcijas intensitātes 25 signāla vērtībām (reģistrētām pašuzturošā degšanas posmā), ir konstatēts, ka dažādām absorbcijas joslām signāla standarta kļūda 50 s laika intervālā ir [3; 12] % robežās (9. tabula). Pārstrādājot mērījumu rezultātus par gazifikācijas gāzveida produktu IS analīzi, tika aprēķinātas vidējās vērtības dažādos degšanas procesa laika intervālos. Rēķinot vidējās vērtības dažādos laika intervālos, izmantota integrāļu metode, tādā veidā samazinot parauga ņemšanas metodes ietekmi uz aprēķināto vērtību. Vidējām vērtībām tika aprēķinātas arī standarta novirzes analizējamā apgabalā.

### 2.2.9. Degšanas produktu sastāva un temperatūras mērīšanas metodika

Lokālajiem degšanas produktu temperatūras  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) un sastāva ( $\text{O}_2$  %,  $\text{CO}_2$  %,  $\text{CO}$  ppm,  $\text{NO}$  ppm,  $\text{NO}_2$  ppm,  $\text{NO}_x$  ppm,  $\text{H}_2$  ppm), gaisa pārākuma koeficienta ( $\alpha$ ), kā arī degšanas procesa efektivitātes ( $\eta_{degš}$ , %) un siltuma zudumu  $Q_{zūd}$ . mērījumiem izmantoja gāzu analizatoru *Testo 350* (*Testo SE & Co. KGaA*, Vācija). Gāzes analizators veic nepārtrauktu degšanas produktu sastāva mērīšanu, izmantojot ķīmiskās mēršūnas ar datu reģistrāciju reizi sekundē. Izmantojot *Testo 350* tika veikti biomasas degšanas procesa izmaiņu izraisītās sastāva kinētikas pētījumi un dūmgāžu sastāva radiālā un aksiālā sadalījuma veidošanās analīze, balstoties uz datu apstrādes metodiku, kas analoga plūsmas ātruma un temperatūras mērīšanas metodikai (sk. 2.4.2.–2.4.3. apakšnodaļās). *Testo 350* dūmgāzes analizators veic dažādu parametru noteikšanu:

- 1) galvenā degšanas produkta  $\text{CO}_2$  tilpuma daļu [0; 50] % robežās ar precizitāti  $\pm 0,3$  % un reakcijas laiku 10 s;
- 2) pārākuma skābekļa ( $\text{O}_2$ ) tilpuma daļu [0; 25] % robežās ar precizitāti  $\pm 0,8\%$  un reakcijas laiku 20 s;
- 3) neizreagējošo  $\text{CO}$  un  $\text{H}_2$  masas daļu [0; 10000] ppm robežās ar precizitāti  $\pm 10$  ppm un reakcijas laiku 40 s (robežās no 0 līdz 500 ppm precizitāte ir augstāka  $\pm 2$  ppm);
- 4) kaitīgo emisiju  $\text{NO}_x$  ( $\text{NO} + \text{NO}_2$ ) masas daļu [0; 4000] ppm robežās ar precizitāti  $\pm 5$  ppm un reakcijas laiku 40 s (robežās no 0 līdz 300 ppm precizitāte ir  $\pm 0,1$  ppm).

Ir jāatzīmē, ka *Testo 350* veic neatkarīgus  $\text{CO}_2$  koncentrācijas mērījumus, izmantojot  $\text{CO}_2$  infrasarkanā starojuma un ievērojot starojuma uztvērēja iekšējo ražotāja uzstādīto kalibrēšanu. Dūmgāžu temperatūras mērījumiem paraugu ņemšanas zondē ir iebūvēts K tipa (NiCr-Ni) termopāris ar  $[-70; +1373]$  K mērīšanas robežām un precizitāti  $\pm 0,1$  K, turklāt apkārtējā telpas gaisa temperatūras noteikšanas robežas ir  $[-200; +323]$  K ar precizitāti  $\pm 0,2$  K.

Salīdzinot  $\text{CO}_2$  tilpuma koncentrācijas mērījumus ar maksimāli iespējamo  $\text{CO}_2$  koncentrāciju ( $\text{CO}_{2, \max}$ ) pie nosacījuma, ja tiek nodrošināta pilnīga gaistošo vielu sadedzināšana, mērinstruments aprēķina  $\alpha$ ,  $\eta_{degš}$  un  $Q_{zūd}$  [247]:

$$\alpha = \frac{[CO_{2,max}]}{[CO_2]}, \% \quad (114)$$

$$\eta_{degš} = 100 - Q_{zūd}, \% \quad (115)$$

kur  $[CO_{2,max}]$  – maksimāli iespējamā  $CO_2$  koncentrācija dūmgāzēs dotam kurināmajam procentos,  $[O_2]$  – izmērītā  $O_2$  koncentrācija dūmgāzēs procentos, bet

$$Q_{zūd}, \% = k \cdot \frac{T_{dg} - T_{gais}}{[CO_2]}, \% \quad (116)$$

kur  $Q_{zūd}$  – dūmgāzes siltuma zudumi procentos,  $k$  – konstante, kas ir atkarīga no kurināmā dabas,  $T_{dg}$  un  $T_{gais}$  – dūmgāzes un gaisa temperatūra (K).

Dūmgāzes sastāva mērījumus veic visā eksperimenta laikā, lai kontrolētu degšanas procesa attīstīšanos un degšanas pašuzturēšanas posma sasniegšanu, un tādā veidā nodrošinātu degšanas procesa kontroli, salīdzināšanu un eksperimenta atkārtojamību. Procesā laikā analizētie parametri tiek salīdzināti pēc vidējām vērtībām, ievērojot korekciju uz mēršūnu reakcijas laiku un izvērtējot signāla standarta novirzes. *Testo 350* veic signāla reģistrāciju ar soli 1 s, tāpēc plūsmas parametru radiālā sadalījuma noteikšanai tika savākti 30 mērījumi un viena eksperimenta laika ietvaros ir iespējams uzņemt divas sadalījuma raksturlīknes. Radiālā sadalījuma mērīšana un signāla reģistrācija tiek veikta degšanas procesa pašuzturēšanas posmā – sākot ar  $t \approx 900$  s.

### 2.2.10. Iekārtas siltuma jaudas un summārā siltuma mērīšanas metodika

Iekārtas siltuma jaudas izmaiņu pētījumiem dažādās biomasas termokīmisko pārvērtību stadijās izmantoja dzesējamā ūdens kalorimetriskos mērījumus. Siltuma jaudas mērīšanas metode reducējās uz gazifikatora un degšanas kameras sekciju dzesējošā ūdens plūsmas masas patēriņa un temperatūras izmaiņu mērījumiem. Siltuma jaudas ( $P$ ,  $W$ ) aprēķiniem sekundei izmantota formula:

$$P_i = c_{p, vid} \cdot G_{i, vid} \cdot (T_{k, i} - T_a) \quad (117)$$

kur  $c_{p, vid}$  – vidējā relatīvā izobārā ūdens siltumietilpība [ $T_a$ ;  $T_{k, i}$ ] K robežās,  $G_{i, vid}$  ir vidējais ūdens masas patēriņš eksperimenta sākumā un beigās,  $kg \cdot s^{-1}$ , kurš tiek stabilizēts ar 7 m augstumā novietotu ūdens bāku ( $p \approx 0,73$  bar),  $T_{k, i}$  – karstā ūdens temperatūra  $i$ -tās sekcijas izejā,  $T_a$  – aukstā ūdens temperatūra sekcijas ieejā.

Rezultātu izvērtēšanai tika izmantots arī summārais siltuma daudzums  $Q_i$  ( $MJ \cdot kg^{-1}$ ), kas izdalās 1 kg biomasas granulu degšanas procesā:

$$Q_i = \frac{\int_0^i P_i}{10^6 \cdot m_{sl}} \quad (118)$$

kur  $m_{sl}$  – granulētas biomasas parauga masa.

Ūdens plūsmas regulēšana iekārtā tika veikta ar caurplūsmas ventiļiem, bet caurplūdošā ūdens plūsmas ātruma mērījumiem izmantoja 1000 ml mērcilindrus ar minimālo iedaļas vērtību 10 ml un regulēšanas precizitāti aptuveni  $\pm 1$  %, fiksējot laiku, kurā ūdens piepilda mērcilindru.

Ūdens plūsmas ātruma mērīšanu veic divas reizes – pirms un pēc eksperimenta katrai atsevišķai sekcijai, veicot korekcijas siltuma aprēķinu formulās katram eksperimentam. Ūdens plūsma tika regulēta gazifikācijas sekcijā aptuveni  $12 - 15 \text{ ml}\cdot\text{s}^{-1}$  (atkarībā no granulu tipa) ar iepildes temperatūru aptuveni 289 K, degšanas kameras pirmajā daļā  $\approx 15 \text{ ml}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $\approx 295 \text{ K}$ ), un otrajā sadaļā  $\approx 14 \text{ ml}\cdot\text{s}^{-1}$  (300 K).

Ūdens plūsmas temperatūras mērījumiem katras sekcijas ieejā un izejā tika izmantoti termojūtīgie sensori AD590KF (*OMEGA Engineering Inc.*, ASV) ar temperatūras mērīšanas robežām [218; 423] K, standarta kļūdu  $\pm 0,1 \text{ K}$  un linearitāti  $\pm 0,8 \text{ K}$ . Datu reģistrācijai tika izmantota Data Translation DT9805 (*Measurement Computing Corp.*, ASV) plate ar 500 V izolējošo barjeru, kura samazina strāvas svārstību ietekmi uz signāla vērtības pareizību.

Signāla reģistrēšanai un pierakstīšanai izmantoja Quick DAQ programmatūru, kura veic termosensoru 10 signāla mērījumus 1 s, aprēķinot vidējo un samazinot trokšņa ietekmi uz signāla vērtību. Termosensoru temperatūras raidījumu kalibrēšanai lietoja noteiktās temperatūras ūdens plašā diapazonā no 273 K līdz 365 K, salīdzinot signāla vērtību ar dzīvsudraba termometra rādījumiem (metodes jūtība ir 0,01 K). Ievērojot AD590KF termosensoru kalibrēšanas kļūdu  $\pm 2,0 \text{ K}$  un vidējās eksperimentālās iekārtas dažādu sekciju dzesēšanas temperatūras [290 ;333] K, kalibrēšanas kļūdas ietekme ir  $\pm 3 \%$ . Veicos siltuma jaudas datu apstrādi, tika apkopoti vidējās vērtības noteiktajos laika intervālos, ievērojot aprēķinātus vidējās novirzes.

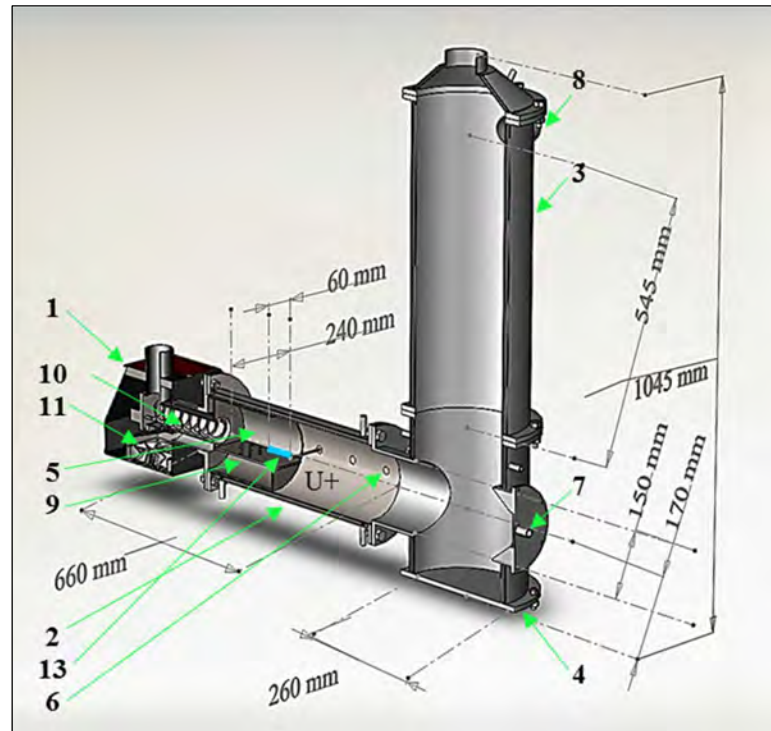
### 2.3. Tehnoloģiskās biomasas degšanas iekārtas apraksts

Elektriskā lauka kontroles tehnoloģijas aprobācijai un pārnesei uz rūpnieciska mēroga iekārtām tika izveidota tehnoloģiskā iekārta uz *Peltech PV-20a* granulu degļa bāzes ar degļa jaudu līdz  $P_{\max} = 20 \text{ kW}$  un trim ūdens dzesējamam degšanas kameras sekcijām, nodrošinot granulu padevi iekārtā ar vidējo ātrumu  $0,85-1,1 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Tehnoloģisko iekārtu veido granulu deglis (29. att. – 1) un degšanas kamera (eksperimentālais katls), kura sastāv no horizontālā dzesējamās degšanas kameras posma (29. att. – 2), kas nostiprināts degļa izejā, un divām vertikālām dzesējamās degšanas kameras sekcijām (29. att. – 3, 4), kas nostiprinātas horizontālās kameras izejā, veidojot ar to  $90^\circ$  leņķi. Horizontālās degšanas kameras iekšējais diametrs ir  $\approx 150 \text{ mm}$ , bet tās kopējais garums  $\approx 660 \text{ mm}$ . Vertikālo kameru iekšējais diametrs  $\approx 260 \text{ mm}$ , bet kopējais garums  $\approx 950 \text{ mm}$ . Kameras ir aprīkotas ar atverēm diagnostikas ierīču ievadīšanai liesmā lokāliem ātruma, temperatūras un sastāva mērījumiem (29. att. – 5, 6, 7, 8). 6. un 7. atverē degšanas kameras centrā tika mērītas plūsmas temperatūras, kuras tālāk tekstā ir apzīmētas kā  $T_1$  un  $T_2$ . Plūsmas lokālo parametru koordinātes apzīmējumam tika izmantota Dekarta sistēma. Par atskaites punktu X asij ir paņemts horizontālās sekcijas pamats, bet Y – horizontālās un vertikālās kameras centrālās ass krustojuma punkts.

Deglim jaudas regulēšana ir iespējama 50–100 % robežās (10 – 20 kW). Granulētā biomasas degļi tika padota no granulu tvertnes (29. att. – 9) ar šneka palīdzību (29. att. – 10). Primāro un

sekundāro gaisa plūsmu deglim piegādā ventilators (4. - 11. att.). Primārais gaiss tiek ievadīts caur granulū šneka tipa padeves kanālu. Sekundārā gaisa plūsma tiek piegādāta caur azimutāliem caurumiem degļa perforētajā panelī, nodrošinot virpuļojošu plūsmu sadegšanas kamerā. Uz šīs perforētās plāksnes tiek ierosināta gaistošo vielu aizdegšanās un granulētās biomasas degšana, bet biomasas primārā uzsildīšana tiek veikta ar tena tipa elektrisko sildītāju, kas izvietots nedaudz zemāk par granulū padeves šneku.



29. att. Tehnoloģiskās iekārtas trīsdimensiju modelis.

Lai veiktu liesmas un ārējā lauka mijiedarbības efektu izpēti tehnoloģiskā iekārtā, katlā ir paredzētas speciālas atveres elektrodu ievadīšanai dažādās degšanas zonās, turklāt šī darba ietvaros elektrods tika uzstādīts uz horizontālās kameras centrālo asi, atverē Nr. 3, kas atrodas 240 mm ( $XY = [240; 0]$  mm) attālumā no degļa izejas. Elektroda darba virsmas efektīvais garums virzienā uz degļa izeju sasniedz 60 mm. Pārējā elektroda virsma ir izolēta, izmantojot kvarca cauruli. Elektriskais lauks veidojas telpā starp pozitīvi lādēto elektrodu un kurtuves iezemētajām metāliskajām sienām.

Ūdens dzesēšana sekcijām notiek līdzplūsmā: atsevišķi horizontālai sekcijai ( $10 \text{ ml} \cdot \text{s}^{-1}$  aptuveni pie 300 K) un vertikālām sekcijām kopā ( $4 \text{ un } 3 \text{ ml} \cdot \text{s}^{-1}$ ), tāpēc siltuma mērījumi bija paveikti barošanas ūdenim, horizontālas un otrās vertikālās sekcijas izejā. Regulējot barošanas ūdens vārstus, tika kontrolēta dzesējamā ūdens padeve horizontālajā un vertikālajā kamerā. Parametru kontroles un mērījumu metodika aprakstīta 2.2. nodaļā.

### 3. SILTUMA PROCESU EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI: IDENTIFIKĀCIJA UN OPTIMIZĀCIJA

Praktiskajā daļā ir apvienotas teorētiskas zināšanas, kas iegūtas veicot tehniskās un zinātniski-pētnieciskās literatūras analīzi un eksperimentālo pētījumu rezultāti, kas tika iegūti, izpildot promocijas darba uzdevumu, ar mērķi veikt ārējo elektrisko spēku ietekmes izpēti un tās analīzi uz biomasas gāzveida vielu degšanas procesu raksturojošiem parametriem. Šajā sadaļā ir aprakstīti pētījumi par elektriskā lauka iedarbību uz biomasas gazifikācijas procesu un liesmas virpuļplūsmu, kas veidojas gaistošo vielu uzliesmošanas un degšanas procesā. Sadaļā ir aprakstīti arī pētījumi, lai izvērtētu elektriskā lauka ietekmi uz liesmas virpuļplūsmas struktūras veidošanos, kas nosaka gaistošo vielu veidošanos un degšanas procesu dinamiku. Ir izvērtēts arī jaunās tehnoloģijas ekoloģiskais un ekonomiskais efekts.

#### 3.1. Salmu, koksnes un kūdras biomasas paraugu raksturojums

Literatūras apskatā ir sniegta informācija par biomasas elementārā un ķīmiskā sastāva ietekmi uz tās termisko sadalīšanas procesa kinētiku un gaistošo vielu sastāvu (sk. 1.1. nodaļā) dod priekšstatu par procesa mehānismu un to ietekmējošiem faktoriem. Tomēr, lai izprastu eksperimentā izmantojamās biomasas paraugu īpašību ietekmi uz termiskās sadalīšanas procesiem, ir nepieciešams paveikt to fizikāli-ķīmisko analīzi, izmantojot metodes, kas aprakstītas 2.2. nodaļā.

Eksperimentālām darbām tika izmantotas kviešu salmu, skujkoku un kūdras biomasas granulas. Kviešu salmu granulas bija pagatavotas no ziemas kviešiem atbilstoši *EUBIONET* 14961-6 standartam SIA “*EkoGrans*” ražotnē. Koksnes granulas, kas atbilst Vācijas *DINplus* standartam un Eiropas *ENplus A1 premium* klase standartam, tika iegādātas pie SIA “*Kurzemes granulas*”. Premium granulu ražošanai tiek izmantotas tikai skujkoku zāģskaidas un ēveļskaidas (bez mizas), kas nodrošina granulām gaišu krāsu un zemu pelnu saturu (10. tab.). Savukārt kūdras granulas bija iegādātas pie SIA “*Zelta zeme*” (Līvānu kūdras fabrikas), un pagatavotas, izmantojot Skrebeļu augstā purva kūdras maisījumu no dažādiem dziļumiem. Ražotāja sniegtie dati par granulu enerģētiskām īpašībām kopā ar granulu slāņa mehāniskām īpašībām apkopoti 10. tabulā.

10. tabula

**Dažādu biomasas paraugu granulu galvenās īpašības**

	Kviešu salmi	Skujkoku koksne	Kūdra
LHV, MJ·kg <sup>-1</sup>	15,3 – 15,65	18,11	17,4 – 18,55
Gaistošās vielas, %	–	81,01	–
Mitrums, w %	9,6 – 10,6	5,6	8,3 – 11,3
Pelnu saturs (sausā masa), %	4,3 – 6,2	0,33 – 0,35	3,0
Pelnu kušanas T, K	1073 – 1573	1743	1455



Sēra saturs, %	0,11	0,01	< 0,3
Slāpekļa saturs, %	2,35	0,05	1,14
Diametrs *, mm	8,1	6,15	7,8
Blīvums, kg·m <sup>-3</sup>	550	650 – 670	780
Gr. slāņa blīvums *, kg·m <sup>-3</sup>	557	612	690
Slāņa rel. laukums **, m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup>	0,66	0,69	0,51

\* – mērīts pēc metodes [244].

Ziemas kvieši atšķiras no vasaras kviešiem ar lielāku slāpekļa saturu un minerālu daudzumu [248], tāpēc salmu granulām var novērot šo parametru paaugstinātas vērtības, salīdzinot tās ar citiem biomasu paraugiem (11. tab.), tomēr, ievērojot statistikas datus 1. tabulā, kviešu salmu elementārā sastāva radītāji atrodas pieļaujamās robežās (pēc *EUBIONET* 14961-6). Koksnes granulām kopējais oglekļa saturs, salīdzinot to ar literatūras datiem, atrodas pa vidu pieļaujamām robežām [55], bet kūdras paraugam šis parametrs ir zemāks un vairāk līdzīgs vidēji degradētai kūdrai [49]. Analizētajiem biomasas paraugiem, patiecoties pieaugušam oglekļa saturam, siltuma spēja palielinās vidēji par  $\approx 1 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  rindā no kviešu salmu līdz kūdras granulām. Visi parametri, kas doti 11. tabulā, lielākoties atbilst statistiskiem datiem no 1. tabulas, tāpēc eksperimentālajā darbā ir sagaidāmas līdzīgas īpašības, kuras ir aprakstītas literatūrā 1.1. nodaļā.

11. tabula

### Eksperimentālo biomasas paraugu elementārais sastāvs un sadegšanas siltums

Biomasa	C*, %	H*, %	O*, %	N*, %	Mitrums, %	Pelni *, %	LHV, MJ·kg <sup>-1</sup>
Salmi	46,62	5,09	42,72	1,31	9,11	4,26	15,52
Koksne	49,79	5,15	44,24	0,18	6,32	0,64	16,61
Kūdra	53,83	5,12	36,93	1,11	11,44	3,02	17,24

\* – pēc sasusas masas.

Tuvinātai ķīmiska sastāva noteikšanai tika izmantoti dati no kontrolētās pirolīzes (pie  $\approx 773 \text{ K}$ ,  $\text{N}_2$  atmosfērā) gāzes hromatogrāfijas un masas spektrometrijas apvienotās analīzes (sk. 2.2.1. apakšnodaļā). Šī analīzes metode dod kvalitatīvo un kvantitatīvo informāciju par vielām, kas veidojas termiskās sadalīšanas procesā no biomasas dažādām sastāvdaļām. Pēc šīs analīzes (12. tab.) ir noskaidrots, ka visvairāk ogļhidrātu (hemicelulozes un celulozes sastāvdaļas) saturs ir koksnes granulās, savukārt vismazākais ir kūdras granulās. Kūdras sadalīšanas procesā veidojas daudz mazāk skābju, aldehīdu un ketonu, bet vairāk metanola un furāna, kas nozīmē ka kūdras ogļhidrāti ir vairāk sadalīti un vieglāk pāriet gaistošo vielu fāzē. Ievērojot kūdras ķīmiskā sastāva statistiku, kas dota 2. tabulā, var secināt, ka sekojošs analīzes rezultāts var netieši liecināt par stipru celulozes bio-degradēšanas pakāpi, kas saistīta ar garākas virknes polisaharīdu satura samazināšanos kūdras ķīmiskajā sastāvā. Lipīdu saturs kūdras granulās norāda uz humīnskābes un

fulvoskābes termiskās sadalīšanas produktu klātbūtni gazifikācijas produktos. Kūdras paraugu augsto ogļhidrātu un zemo lipīdu saturu var pamatot ar to, ka kūdras granulu pagatavošanai tika izmantots kūdras maisījums no dažādiem purva dziļumiem, kuriem ir dažāda bio-degradācijas pakāpe. Lipīdu vielu grupas zema saturs pamato arī nelielo kopējā oglekļa daudzumu pēc elementārā sastāva datiem (11. tab.).

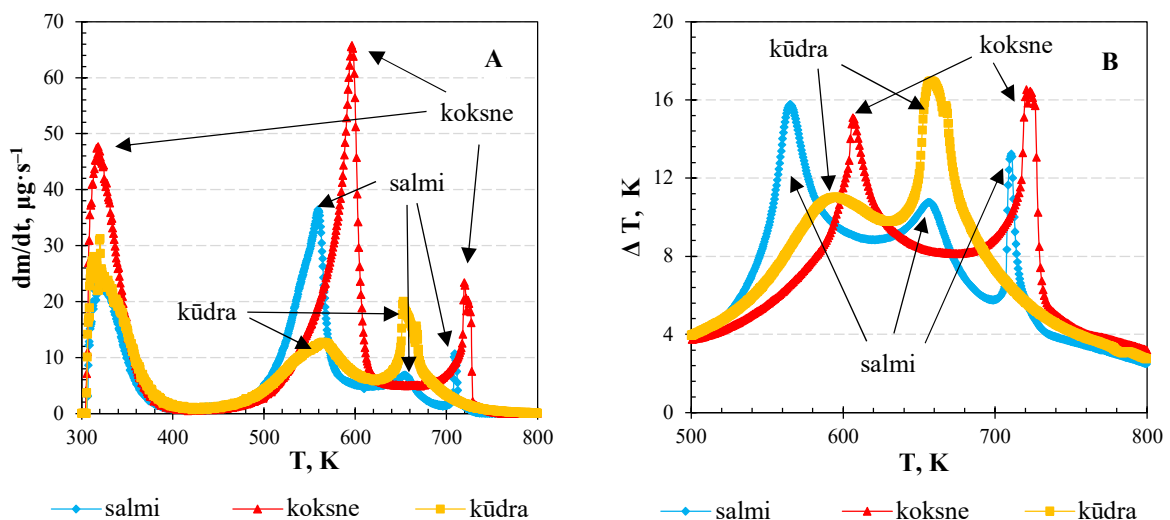
12. tabula

### Eksperimentālo biomasas paraugu tuvinātais ķīmiskais sastāvs

Biomasa	Gaistošās vielas	Ogļhidrāti	Polifenoli	Lipīdi
<b>Salmi</b>	≈ 68 %	77,2 ±1,1	21,5 ±0,4	1,3 ±0,1
<b>Koksne</b>	≈ 83 %	78,4 ±1,1	20,9 ±0,3	0,6 ±0,1
<b>Kūdra</b>	≈ 57 %	73,3 ±1,1	16,5 ±0,4	10,4 ±0,2

Polifenolu saturs pirolīzes gāzēs norāda uz tuvinātu lignīna saturu noteiktajā biomasā. Pēc 12. tabulas datiem var secināt, ka salmu un koksnes paraugos lignīna saturs maz atšķiras, bet kūdras paraugos lignīna saturs ir par ≈ 25 % mazāks, jo tas samazinās bio-degradācijas procesos, pārveidojoties par humīnskābēm un fulvoskābēm (sk. 3. pielik. 3., 4. att.). Var atzīmēt, ka salmu pirolīzes gāzē tika konstatēti gan gvjacila, gan siringila lignīna daļu atvasinājumi, bet koksnes gāzēs tikai gvjacila atvasinājumi (sk. 1.1.2. apakšnodaļā).

Summējot visu pirolīzes (pie ≈ 973 K, N<sub>2</sub> atmosfērā) vieglās frakcijas vielu signālus, attiecībā pret kopējo signālu laukumu hromatogrammā, var secināt arī par tuvinātu gaistošo vielu saturu biomasas paraugos. Gaistošo vielu saturs kviešu salmiem un kūdrai atbilst literatūras datiem dotiem 4. tabulā, bet koksnes paraugos gaistošo vielu saturs ir augstāks, kas var norādīt uz lielāku galako–gluko–manāna (*Gal–Glu–Man*) saturu.



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

Izmantojot termogravimetrijas un termiskās analīzes datus, tika secināts par biomasas paraugu termiskās sadalīšanās kinētiku, gaistošo vielu un cietās pārrogļotas fāzes daudzumu. Atbilstoši 30. attēlā (A) dotajām dažādas izcelsmes biomasas paraugu *DTG* līknēm, paraugiem ir novērojami divi izteikti termiskās sadalīšanas pīķi robežās no 500 K līdz 750 K ar izteiktu gaistošo savienojumu degšanas procesā izdalītu siltumu. Pirmais endotermiskais maksimums temperatūras robežās no 300 K līdz 390 K atbilst biomasas žāvēšanas posmam. Termogravimetrisko mērījumu skaitliskie dati apkopoti 13. tabulā.

13. tabula  
**Eksperimentālo biomasas paraugu termogravimetrisko mērījumu rezultāti**

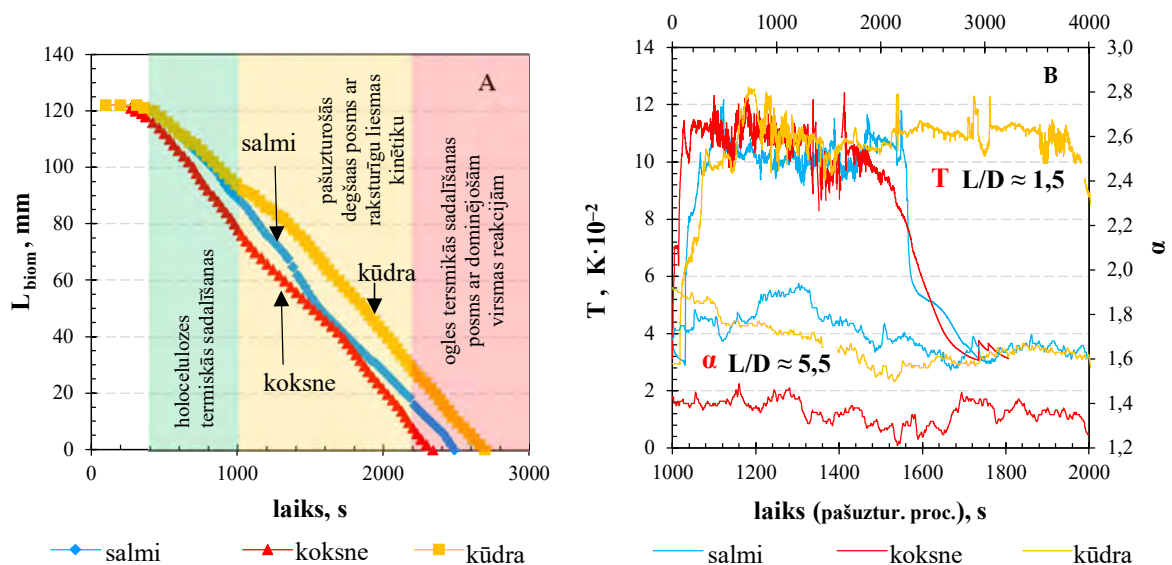
<b>Primārais sadalīšanas posms (gaistošas vielas)</b>			
	Salmi	Koksne	Kūdra
$T_{\text{sākuma}}, K$	470	500	480
$T_{\text{beigas}}, K$	605	630	630
$m \cdot m_0^{-1}, \%$	60,6 %	66,6 %	48,4 %
<b>Sekundārais sadalīšanas posms (ogles fāze)</b>			
	Salmi	Koksne	Kūdra
$T_{\text{sākuma}}, K$	610 un 690	630	630
$T_{\text{beigas}}, K$	690 un 740	740	740
$m \cdot m_0^{-1}, \%$	26,4 %	25,7 %	39,7 %

Pēc *DTG* rezultātiem (13. tab.) var secināt, ka kviešu salmu termiskā sadalīšanās sākās ātrāk (pie 470 K) par skuju koku un kūdras biomasas paraugiem, pateicoties atšķirīgam hemicelulozes veidam, kurš satur ksilānu (3. pielik. 2. att.). Visintensīvākais termiskās sadalīšanas maksimums ( $\approx 65 \mu\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ ) ir novērots koksnes biomasai, ko nosaka augstais gaistošo vielu saturs koksnes biomasā (4., 12. un 13. tab.). Tomēr gan koksnes biomasas, gan salmu biomasas paraugi degšanas procesā veido līdzīgu eksotermisko efektu savā primārā sadalīšanas posmā (30. att. – B). Kūdrai zemā holocelulozes satura (2. un 12. tab.) un augstā heterociklisko aromātisko savienojumu satura dēļ (3. pielik. 4. att.) termiskās sadalīšanas process ir vairāk nobīdīts uz augstākām temperatūrām, kur sekundārā posma robežās notiek cietās pārrogļotās fāzes oksidēšanās. Eksperimentālo paraugu sekundārie termiskās sadalīšanas posmi atšķiras, pateicoties atšķirīgam, dažādas izcelsmes biomasas paraugu, ķīmiskam sastāvam, kas nosaka arī pārrogļotās cietās fāzes sastāva atšķirības (4. tab.). Ir jāatzīmē, ka kviešu salmu termiskās sadalīšanas sekundārā posma pazīmes līdzinās citu biomasas paraugu sekundārā posma termiskās sadalīšanās pazīmēm, kas ļauj secināt, ka pārrogļoto salmu biomasas struktūra ir līdzīga kokogļu un pārrogļotās kūdras struktūrai. Tomēr abi salmu biomasas sekundārā posma sadalīšanas maksimumi ir mazāk intensīvi, salīdzinot tos ar koksnes un kūdras biomasas attiecīgiem termiskās sadalīšanās sekundārā posma maksimumiem. 13. tabulas

primārā posma masas zudumu izmaiņas, dažādiem biomasas paraugiem, ir saistītas ar dažādu biomasas gaistošo vielu (4. un 13. tab.) un oglehidrātu saturu (2. un 12. tab.), turklāt, salīdzinot 12. un 13. tabulas gaistošo vielu daudzumu, var secināt, ka šīs atšķirības norāda uz to, ka tikai daļa no oglehidrātu masas pārveidojās pār gaistošām vielām, bet aptuveni 15 % no hemicelulozes un celulozes masas paliek cietā fāzē, kura kopā ar lignīna termiskās sadalīšanās cietajiem produktiem veido biomasas ogles.

### 3.2. Granulēto biomasas paraugu degšanas procesa raksturojums

Eksperimentālajā iekārtā biomasas degšana notiek mainīgā slānī (31. att. – A), kas dod iespēju analizēt dažādās degšanas procesa attīstības stadijas (liesmas virpuļa veidošanos, gaistošo vielu degšanas un ogleks gruzdēšanas stadijas). Biomasas termiskās sadalīšanas ierosināšanai, uzturēšanai un gaistošo produktu aksiālās kustības nodrošināšanai gazifikātorā zem granulu slāņa tiek padota aksiālā gaisa plūsma ( $G_z = 30 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ ) ar  $\alpha_z \approx 0,5-0,6$ . Biomasas termiskās sadalīšanās gāzveida produktu samaisīšanai ar gaisa virpuļplūsmu, degšanas procesa ierosināšanai un uzturēšanai pie vidējā gaisa pārsvara  $\approx 1,4-1,7$  degšanas zonas pamatnē ( $L/D \approx -0,3$ ) tika padota sekundārā gaisa virpuļplūsma ( $S_{\text{vid}} \approx 0,89$ ), ierosinot lejup virzītu virpuļplūsmas kustību virzienā uz granulu slāni, kuras veidošanās ir aprakstīta 2.1.2. apakšnodaļā.

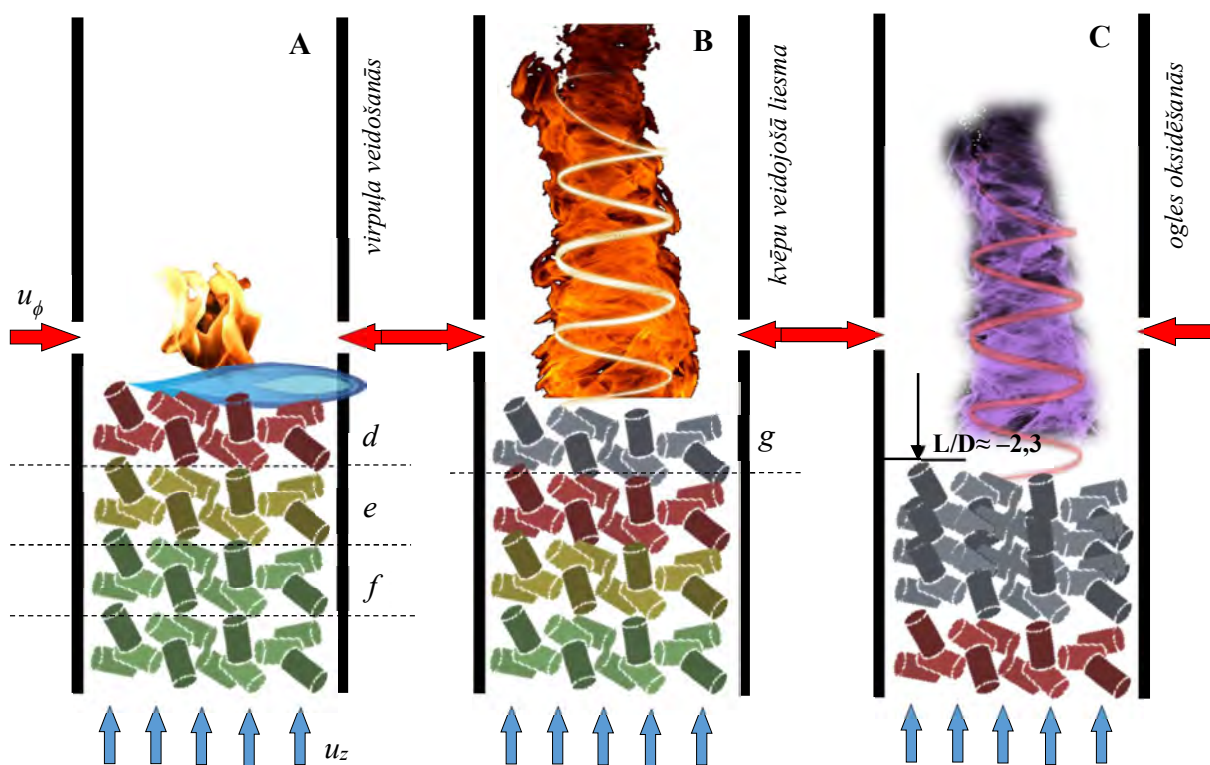


31. att. Biomasas slāņa augstuma izmaiņas gazifikātorā (A); degšanas zonas temperatūras kinētika un gaisa pārsvara izmaiņas pašuzturošā degšanas posmā (b).

Šāda gaisa padeve sekmē degvielas un gaisa sajaukšanos un dažādas izcelsmes biomasas paraugu termo-ķīmiskās pārvērtības, kas nosaka degšanas procesa veidošanos (pie  $\eta_{\text{degš}} \approx 80-85 \%$ ) un degšanas zonas temperatūras uzturēšanu liesmas centrālajā daļā (31. att. – B). Tomēr ir jāatzīmē, ka pie šāda veida sekundārā gaisa padeves veidojās augšupvērstās gaisa virpuļplūsma (26. att.), kurai daļa no azimutālā gaisa aizplūst gar degšanas kameras sienām, pilnībā nesajaucoties

ar aksiālo gaistošo savienojumu plūsmu un līdz ar to paaugstinot gaisa pārsvaru  $\alpha$  dūmgāzēs ( $L/D \approx 5,5$ ). Šo problēmu ir iespējams risināt, izmantojot līdzstrāvas elektriskā lauka un liesmas mijiedarbības efektus.

Diskrēto granulētās biomasas porciju degšanas process eksperimentālajā iekārtā ilgst aptuveni 2900 s (kviešu salmi un skujkoksne) un līdz pat 3800 s kūdras granulām, par ko liecina temperatūras kinētikas mērījumi (31. att. – B). Tomēr kūdras granulū līmeņa augstuma mērījumi gazifikātorā uzrāda straujāku biomasas slāņa samazināšanos salīdzinot ar kviešu salmu un skujkoksnes granulām (31. att. – A). Ir jāatzīmē, ka izvēlētā granulū līmeņa augstuma noteikšanas metodes precizitāti nosaka trauslā ogle un pelnu slāņa biezuma izmaiņas uz granulū virsmas. Atbalsta stienģa smaguma dēļ pārņotās biomasas granulū daļēji sabrūk un stienģis atbalstās pret neizreaģējošām granulām. Kaut gan izvēlētā metode neatspoguļo reālās masas izmaiņas, salīdzinājumā ar termogravimetrijas datiem (30. att.), tomēr šo metodi var izmantot neizreaģējošo jeb svaigā biomasas granulū slāņa augstuma analīzei (32. att. – e, f).



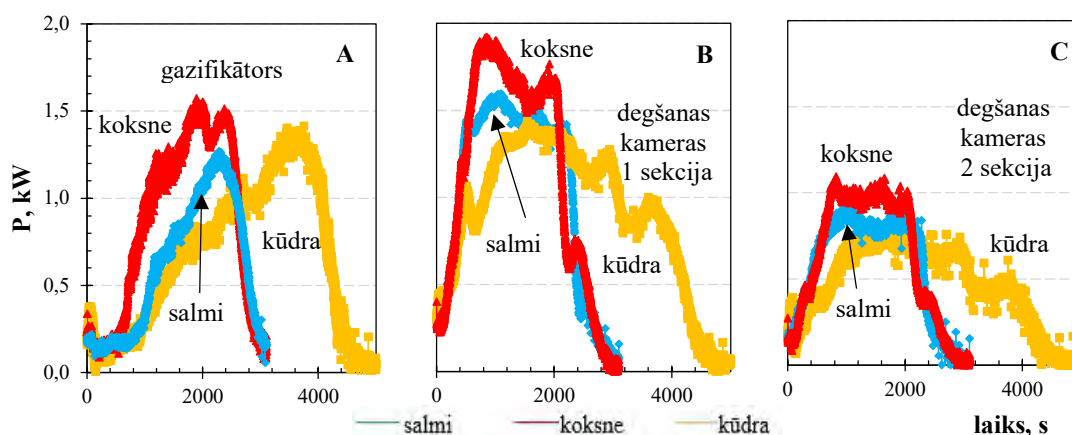
32. att. Granulētās biomasas degšanas procesa attīstīšanās shēma eksperimentālā iekārtā.

Granulētās biomasas degšana eksperimentālajā iekārtā notiek ar dažādu periodu veidošanās pie noteiktām degšanas kinētikas un virpuļplūsmas dinamikas. Šos periodus var nosacīti apzīmēt kā: primāro biomasas degšanas procesa ierosināšanu ar liesmas virpuļplūsmas dinamikas veidošanos (32. att. – A); biomasas degšanas pašzurošā posma veidošanās ar kvēpu veidojošo liesmas virpuļplūsmas dinamiku (32. att. – B); posma veidošanās ar virsmas reakciju dominējošiem

procesiem (32. att. – C); ogles gruzdēšana bez liesmas veidošanās (31. att. – B), kas nosaka degšanas beigu stadiju, kad temperatūra degšanas kamerā  $L/D \approx 1,5$  strauji pazeminās zem 800 K.

Biomases termiskā sadalīšanās eksperimentālajā iekārtā tiek ierosināta ar papildus siltuma padevi granulu slāņa augšējā daļā, ko nodrošina propāna liesma. Salmiem un koksnei papildus siltuma padeve tiek nodrošināta līdz 400 s, bet kūdras granulām līdz 500 s (32. att. – A). Temperatūras grafikos šajā laikā var novērot pakāpenisku temperatūras pieaugumu degšanas zonā  $L/D \approx 1,5$  (31. att. – B), jo pakāpeniski (līdz 700–900 s) attīstās biomasas žāvēšanas (32. att. – e) un termiskās sadalīšanās eksotermiskie un endotermiskie procesi (32. att. – d) ar gaistošo vielu izdalīšanos (sk. 1.1.3. apakšnodaļā) un aizdegšanos (sk. 1.2. nodaļā), kas nosaka primāro liesmas virpuļplūsmas veidošanās stadiju (sk. 1.3.2. apakšnodaļā).

Atbilstoši kalorimetriskajiem siltuma mērījumiem, degšanas kameras sekcijās (33. att. – B, C), salmu un koksnes biomasai pēc 800–900 s, bet kūdrai pēc 900–1000 s novēro pašuzturošu degšanas procesa veidošanos, kad gaistošo vielu termo-ķīmisko pārvērtību eksotermiskais siltuma efekts līdzsvarojas ar biomasas uzsildīšanas, žāvēšanas un termiskās sadalīšanās endotermiskajiem procesiem (sk. 1.2.4. apakšnodaļā).



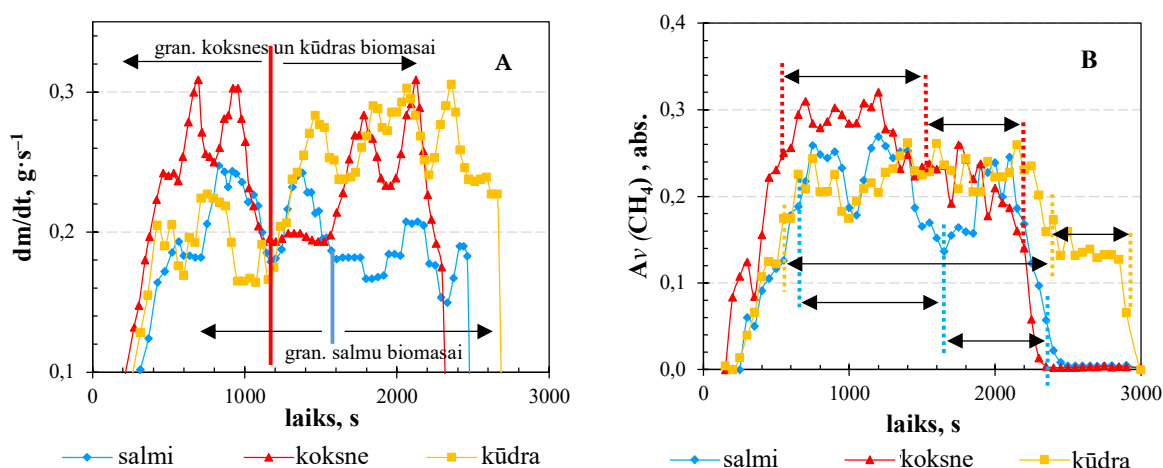
33. att. Biomases paraugu degšanas procesa 4 kW iekārtas jaudas kinētikas mērījumi.

Salmu un koksnes granulētās biomasas pašuzturošais degšanas process turpinās līdz 2200–2300 s, bet kūdras biomasai šis posms ilgst līdz  $\approx 3200$  s (31. att. – B). Pašuzturošais degšanas process ietver divus dažādus degšanas režīmus, kuri vizuāli atšķiras pēc liesmas krāsas, kas liecina par liesmas sastāva izmaiņām. Pašuzturoša posma sākuma stadijā attīstās kvēpu veidojošā liesma, kurai piemīt sarkani–dzeltenā nokrāsa. Šo liesmu var novērot līdz  $\approx 1700$ – $1800$  s (salmiem/koksnei) un līdz  $\approx 2000$ – $2200$  s kūdras biomasas degšanas procesā (32. att. – B). Pēc šīs stadijas (32. att. – C) ir novērojama zilganvioletas nokrāsas liesmas veidošanās. Kūdrai šīs vizuālās liesmas nokrāsas izmaiņas ir grūtāk noteicamas, jo nelielā liesmas garuma dēļ, zilās krāsas luminiscence pārklājās ar ogles kvēles sarkano gaismas emisiju (10. pielik. 16.att. – B).

Apvienotie, biomasas termiskās sadalīšanās ātruma un gaistošo vielu sastāva IS spektrālie, mērījumi palīdz precizēt biomasas pašuzturošā degšanas procesa veidošanās posmus (34. att.).

Granulētās biomasas paraugu termiskās sadalīšanas ātruma izmaiņu līknēs ( $dm/dt$ ) ir novērojamas divas īpaši izteiktas ātruma pieaugumu kopas, kuras ir saistītas ar strauju holocelulozes termisko sadalīšanos un oglekļa oksidēšanos (34. att. – A). Koksnes pašuzturošais degšanas process raksturojās ar visgarāko (līdz  $\approx 450$  mm) un viskarstāko liesmu (33. att. – B), ko nosaka hemicelulozes (*Gal–Glu–Man*) straujā sadalīšanās (500–1000 s). Intensīvā gaistošo vielu veidošanās un sadegšana ar liela siltuma daudzuma izdalīšanos (33. att. – B), līdzsvaro celulozes sadalīšanās endotermiskos procesus (sk. 1.1.3. apakšnodaļā), un paātrina pārorgļoto granulu virsmas reakciju veidošanos laika intervālā no 1600 s līdz 2200 s (sk. 1.2.1. apakšnodaļā). Salīdzinot ar koksnes granulām, salmu granulu holocelulozes sadalīšanas posms ir nedaudz nobīdīts laikā (700–1400 s). Kūdras granulu termokīmisko pārvērtību procesā šis posms ir vismazāk izteikts, jo granulu lielais blīvums samazina to sasilšanas un degzācīcijas procesu ātrumu (10. tab.). Visintensīvāko granulētās kūdras termisko sadalīšanos novēro pie  $t > 1300$  s. Koksnes biomasas zilganvioletās liesmas veidošanās ir grūti novērojama, bet tā ir stipri izteikta salmu un kūdras biomasas pašuzturošā procesa beigu stadijā, kad samazinās granulu termiskās sadalīšanās ātrums (34. att. – A) un dominē virsmas reakciju veidošanās pārorgļoto salmu un kūdras granulu pašuzturošā degšanas procesa beigu stadijā. To apliecina arī  $\text{CH}_4$  veidošanās FTIR spektrālā analīze (34. att. – B), kas liecina par divu specifisku biomasas termiskās sadalīšanās posmu veidošanos. Koksnes biomasai tie ir vērojami laika posmā no 500 s līdz 1500 s un no 1500 s līdz 2200 s; salmu biomasai attiecīgi laika posmā no 700 s līdz 1700 s un no 1700 s līdz 2300 s; kūdras biomasai no 600 s līdz 2300 s un no 2400 s līdz 3000 s.

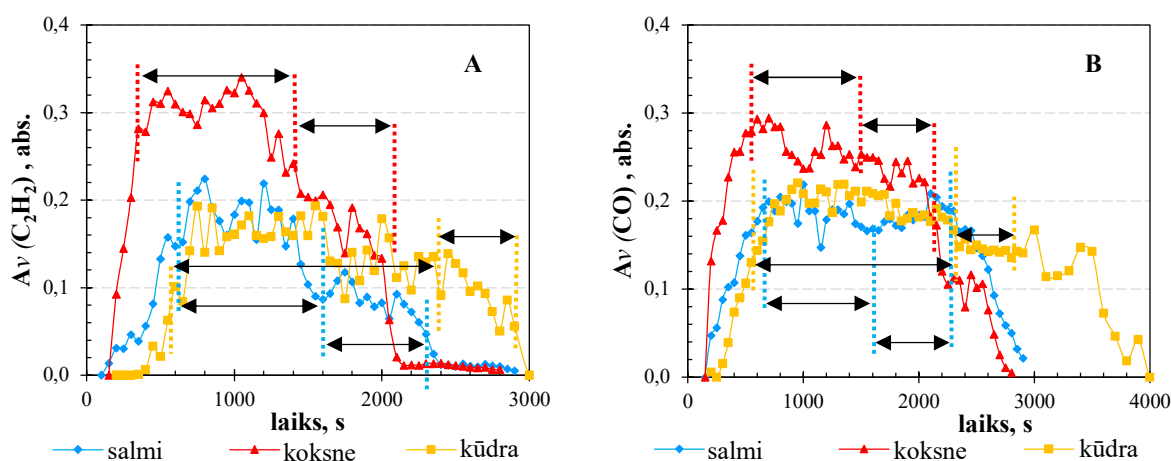
Kūdrai ogļveida fāzes oksidēšanās notiek bez izteikta termiskās sadalīšanās ātruma pieauguma, jo kūdras biomasā satur mazāk gaistošo vielu (12.–13. tab.), turklāt pārorgļoto kūdras granulu masa ir daudz blīvāka, salīdzinot ar pārorgļoto koksnes un salmu biomasu (blīvums, 10. tab.), kas aizkavē siltuma apmaiņu starp liesmas virpuļplūsmu un biomasas granulām.



34. att. Biomasas sadalīšanas ātruma izmaiņas (A) un metāna veidošanās kinētika gazifikātorā (B).

Salmiem, savukārt, sadalīšanas ātruma izmaiņas nav tik izteiktas, turklāt atbilst aprakstītiem atsevišķiem degšanas procesa veidošanas posmiem. Zilganvioletās liesmas veidošanās salmu biomasas pašzurošā degšanas procesā atšķiras no pārējiem biomasas paraugiem, jo ogleks oksidēšanas procesā salmiem uz neizreagējošās biomasas virsmas veidojas salīdzinoši liels termiski nestabilu pelnu daudzums (32. att. – g). Paaugstinoties pelnu temperatūrai virs 1000 K, notiek to sakušana un salipšana (10. tab.). Turpinoties degšanas procesam, pieaug cietā pelnu un daļēji izreagējošo granulū cietā virskārta (32. att. – g, 10. pielik. 16. att. – A), pakāpeniski ierobežojot gaisa piekļuvi ogleks oksidēšanās reakcijas zonai (32. att. – d). Līdz ar to tiek pakāpeniski samazināta pelnu virskārtas temperatūra, ietekmējot biomasas ogleks gruzdēšanas ātrumu (pēdējais degšanas posms).

Liesmas dzeltenī–sarkano krāsu, pašzurošā degšanas procesa sākuma stadijā, nosaka kvēpu veidošanās liesmā, ko apliecina arī intensīvā  $C_2H_2$  veidošanās reakcija zonā. Koksnei un salmiem to novēro laika posmā līdz 1500–1700 s, bet kūdrai līdz  $\approx 2400$  s. (35. att. – A).  $C_2H_2$  veidošanās biomasas termiskās sadalīšanās procesā ir tieši saistīta ar kvēpu daļiņu veidošanās mehānismu liesmā [249]–[251]. Koksnes un salmu biomasai  $C_2H_2$  koncentrācijas samazināšanās plūsmā ir vairāk izteikta salīdzinot ar  $CH_4$  izmaiņām norādītajā laika posmā (34. att. – B), bet kūdras biomasai otrādi –  $C_2H_2$  koncentrācijas samazināšanās pēc 2400 s notiek vienmērīgāk, kas saistīta ar īsāko kūdras liesmas garumu. Dažādu biomasu degšanas procesā pēc 2100–3000 s  $C_2H_2$  un  $CH_4$  koncentrācija plūsmā samazinās līdz nulles vērtībai, bet CO (35. att. – B) koncentrācijas samazināšanās šajā laika posmā novērojama tikai koksnes biomasas degšanas procesā. Pēc nodaļā aprakstītiem rezultātiem var secināt, ka pie dotās eksperimentālās iekārtas konfigurācijas kvēpu veidojošās liesmās kinētika ir vairāk izteikta koksnes biomasas pašzurošā degšanas posmā, kas sakrīt ar svaigās biomasas termo–ķīmiskā konversijas procesa beigām (31. att. – A).

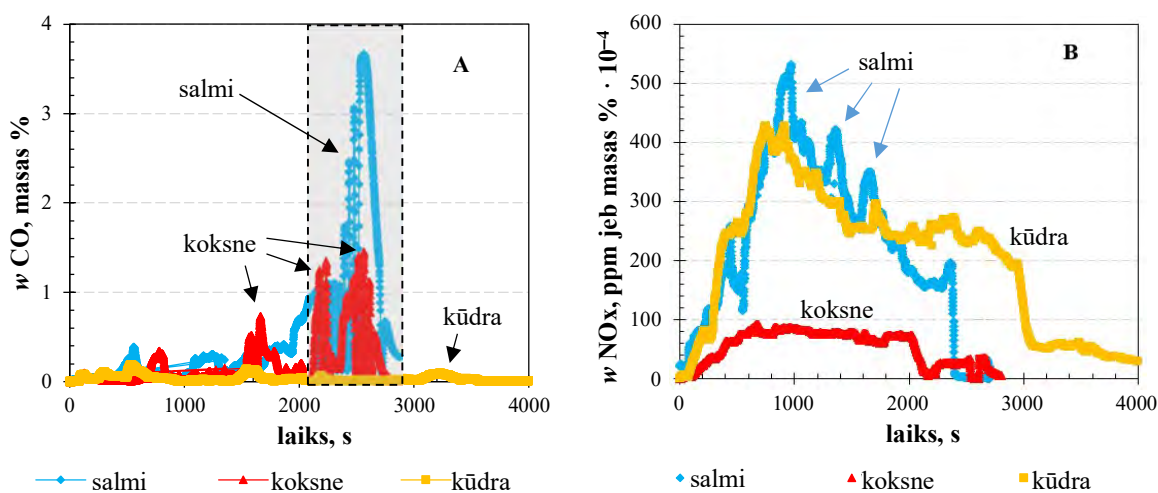


35. att.  $C_2H_2$  (A) un CO (B) veidošanās kinētika gazifikātorā.

Turklāt citiem analizētiem paraugiem (salmiem, kūdrai), mainoties degšanas režīmam,  $CH_4$  un CO turpina veidoties reakcijas zonā, kas liecina par liesmas klātbūtni degšanas kamerā. Ir novērojama likumsakarība starp pussadalītās biomasas virskārtas veidošanos uz salmu/kūdras



biomasas granulu slāņa un zilganvioletās liesmas veidošanos. Kūdrai šī kārta veidojas, pateicoties lēnam biomasas termiskās sadalīšanas procesam, liela granulu blīvuma un augstā aromātisko ogļūdeņražu satura dēļ, bet salmu biomasai – augstā pelnu satura un to specifisko termisko īpašību dēļ. Pašuzturošais biomasas degšanas process beidzas, kad degšanas kamerā izzūd liesma un gazifikatorā ir novērojams siltuma plūsmas pieaugums līdz tās maksimālajai vērtībai (33. att. – A), kuras veidošanos nosaka siltuma pārnese no ogles gruzdēšanas reakcijas zonas uz gazifikatora sienām. Ogles gruzdēšanas procesa sākumu var konstatēt pēc  $\text{CH}_4$  absorbcijas joslas intensitātes straujās samazināšanās (34. att. – B). Savukārt dūmgāzēs turpina veidoties CO (35. att. – B), izraisot šajā posmā pēc  $\approx 2200$  s intensīvu atmosfēras piesērējošo vielu emisiju (36. att. – A). Secinot – ar biomasas slāņa augstuma mērīšanu ir iespējams noteikt svaigās biomasas termiskās sadalīšanās perioda beigas un ogles gruzdēšanas procesa sākumu, salīdzinot neizreaģējošo biomasas granulu līmeņa augstuma izmaiņas un CO veidošanas kinētiku (31. att. – A, 35. att. – B).



36. att. CO (A) un NO<sub>x</sub> (B) emisiju veidošanās kinētika dūmgāzēs biomasas degšanā.

Kaut gan biomasas elementārā un ķīmiskā sastāva svārstību dēļ veidojas biomasas degšanas procesa kinētikas izmaiņas, ir iespējams veikt secinājumus par salmu, koksnes un kūdras biomasas termokīmisko pārvērtību raksturīgākām pazīmēm. Intensīvo koksnes granulu termisko sadalīšanos nosaka augstais gaistošo vielu saturs biomasā (12. tab.), specifiskā hemicelulozes struktūra (3. pielik. 2. att. – B) un augstais sadegšanas siltums –  $LHV$  (10. un 11. tab.), kas veicina ātrāku līdzsvara veidošanos starp eksotermiskiem un endotermiskiem biomasas termiskās sadalīšanas procesiem, nodrošinot visgarāko (līdz  $\approx 450$  mm) un viskarstāko (33. att. – B, C) liesmas virpuļplūsmu (35. att. – A), salīdzinot ar citiem biomasas paraugiem. Intensīva siltuma apmaiņa starp liesmas virpuļplūsmu un biomasas granulām nodrošina ātrāku gaistošo vielu sadegšanu (36. att. – A), bet zemākais slāpekļa saturs koksnes biomasā (11. tab.) nosaka zemāku NO<sub>x</sub> izmešu daudzumu (36. att. – B), salīdzinot to ar salmu un kūdras granulu NO<sub>x</sub> emisiju dūmgāzēs.

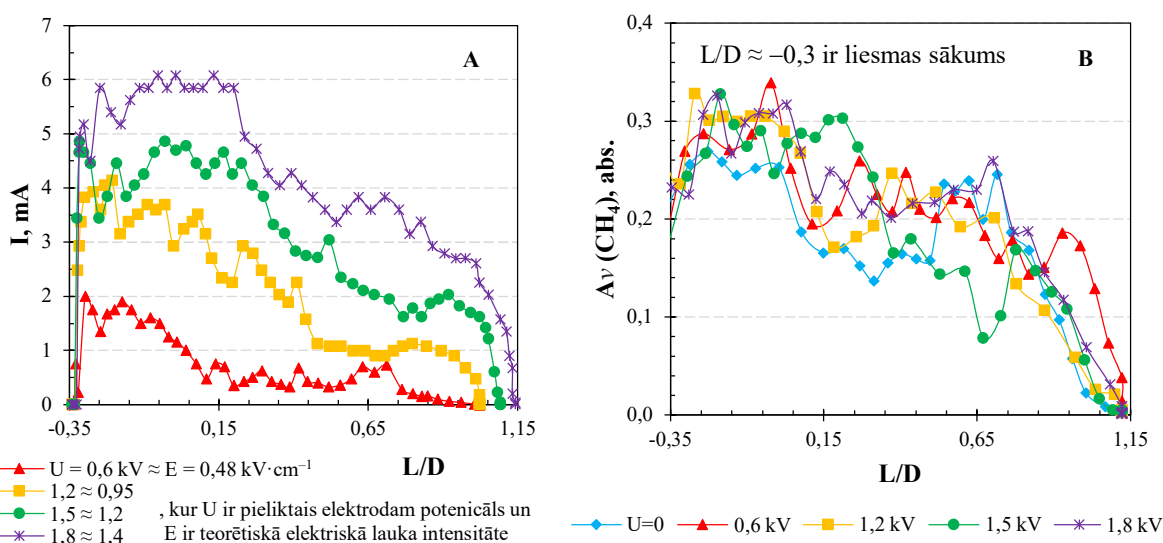
Kviešu salmu degšanas process raksturīgs ar laikā mainīga liesmas garuma veidošanos (līdz  $\approx 250$  mm), ko nosaka ogles/pelnu slāņa veidošanās virs biomasas slāņa virsmas (10. pielik.

16 .att.), kas pakāpeniski ierobežo gaisa piekļuvi reakcijas zonai pašzurošā procesa beigu stadijā ( $\approx 1700\text{--}2300$  s), atdzesējot pelnu virskārtu un ietekmējot liesmas veidošanās kinētiku (32. att. – C). Šī degšanas īpatnība izraisa problēmas salmu ogles gruzdēšanas laikā, kad dūmgāzēs pēc 2400 s veidojās liels CO daudzums (36. att. – A) un samazinās siltuma atdeve gazifikātorā (33. att. – A).

Kūdras termiskās sadalīšanās aizkavējās (31. att. – A) granulu relatīvi lielā blīvuma (10. tab.), augstā mitruma satura (11. tab.) un zema gaistošo vielu (12. tab.) satura dēļ, kas aprūtinā liesmas veidošanos primārā biomasas termoķīmisko pārvērtību stadijā. Tomēr kūdras degšanas process ir vienmērīgāks, kas īpaši novērojams ogļveida fāzes oksidēšanas posmā pēc 1500 s (34. att. – A). Atšķirībā no koksnes un salmu degšanas, kūdras degšanas process raksturojas ar visīsāko (līdz 150 mm) liesmu un ilgstošāko pārorgļoto granulu gruzdēšanas posmu (33. att. – A, 35. att. – B), ko nosaka zemais gaistošo vielu un augstais oglekļa saturs kūdras granulās (12. un 13. tab.).

### 3.3. Jonu strāvas veidošanās eksperimentālie pētījumi

Biomases degšanas procesu dinamikas optimālai uzlabošanai ar līdzstrāvas elektrisko lauku ir nepieciešams veikt jonu strāvas veidošanās priekšizpēti ar nolūku, lai izvēlētos elektroda optimālos izmērus un to izvietojanas vietu degšanas kamerā, ka arī izveidotu priekšstatu par “jona vēja” veidošanos elektriskā lauka un liesmas mijiedarbības procesā.



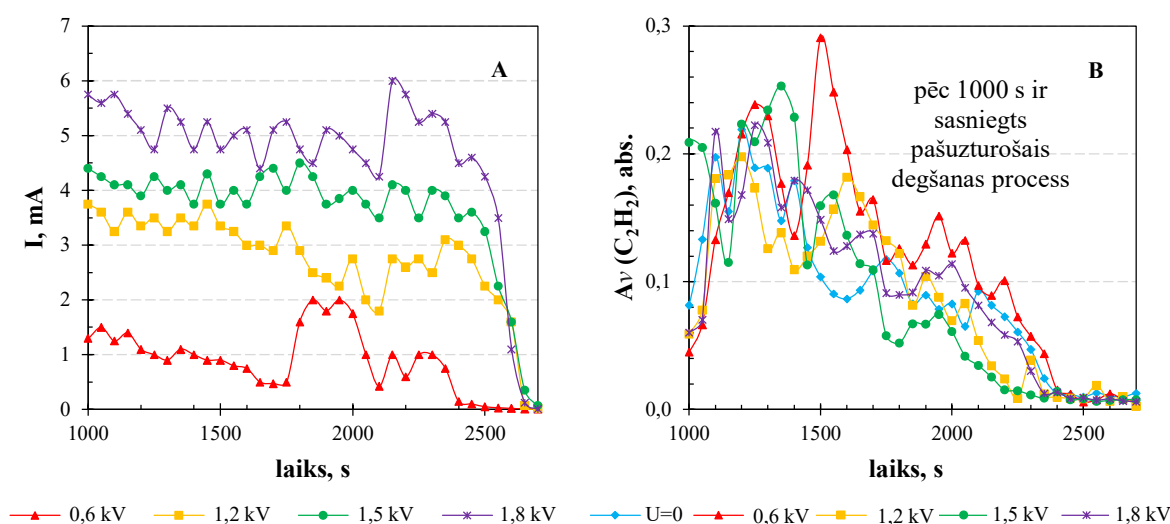
37. att. Strāvas izmaiņas salmu degšanas procesā liesmas garumā (A);  $CH_4$  koncentrācijas izmaiņas liesmas garumā salmu degšanas procesā (B).

Jonu strāvas mērījumiem pa degšanas kameras garumu ir izmantots aksiāli ievietots (NiCr  $\varnothing 3$  mm) elektrods ar pozitīvu potenciālu attiecībā pret degšanas kameras sienām. Neizolētā elektroda garums ir 100 mm un tā sākums ir fiksēts attālumā  $L/D = -0,3$  no sekundārā gaisa padeves. Izmantojot šāda veida elektroda novietojumu, samazinoties biomasas slāņa augstumam granulu termoķīmisko pārvērtību procesā, novēro pakāpenisku jonu strāvas samazināšanos (37.

att. – A), ko nosaka ogļūdeņražu degšana un jonu veidošanas kinētika degšanas zonā (sk. 1.4.3. apakšnodaļā). Pēc *Calcote et al.* [175], [185] vislielākā jonu un elektronu koncentrācija liesmā ir novērojama vistuvāk gaisa un degvielas sajaukšanās zonai, kur notiek degvielas termiskā un ķīmiskā sagatavošana pirms uzliesmošanas.

Samazinoties biomasas granulu slāņa augstumam iekārtā, ir iespējams veikt biomasas termiskās sadalīšanas produktu IS absorbcijas spektru analīzi liesmas garumā. Ievērojot  $\text{CH}_4$  koncentrācijas (37. att. – B) samazināšanos liesmas garumā, var konstatēt, ka jonu strāvas samazināšanās (37. att. – A) ir saistīta ar jonu veidojošo ogļūdeņražu savienojumu (sk. 1.2.2. apakšnodaļā) koncentrācijas samazināšanos gaistošo savienojumu degšanas zonā. Turklāt salmu biomasas degšanas laikā ir novērojami atsevišķi degšanas posmi ar īpašu liesmas kinētiku (sk. 3.2. nodaļā). Gaistošo savienojumu degšanas procesu kinētikas izmaiņām atbilst īpašie jonu veidošanas virzieni un jonu veidi (sk. 1.4.2. apakšnodaļā, 4. pielik. 6. att.), ka arī dažādi jonu veidošanas ātrumi un to koncentrācija liesmā (sk. 1.4.3. apakšnodaļā, 7. pielik. 11.att., 7. pielik. 10. att.), kas kopsavilkumā ietekmē liesmas vadāmību un jonu strāvas veidošanos.

Lai eksperimentāli noteiktu gaistošo savienojumu degšanas procesa kinētikas izmaiņu ietekmi uz jonu veidošanos, elektrods tika pārvietots, sekojot biomasas slāņa augstuma izmaiņām nodrošinot, lai elektrods vienmēr atrastos visintensīvākajā jonu veidošanas zonā ( $L/D$  robežās no  $-0,3$  līdz  $+0,2$ ). 38. attēlā (A) var novērot, ka jonu strāvas stiprums eksperimenta laikā samazinās mazāk, salīdzinot ar jonu strāvas izmaiņām pa liesmas garumu (37. att. – A). Pēc 1700 s salmu biomasas liesmas krāsas izmaiņas korelē ar jonu strāvas izmaiņām, kas norāda uz gaistošo savienojumu degšanas procesa kinētikas izmaiņām, kas ir saistītas ar izteiktu  $\text{C}_2\text{H}_2$  koncentrācijas samazināšanos degšanas zonā (38. att. – B).



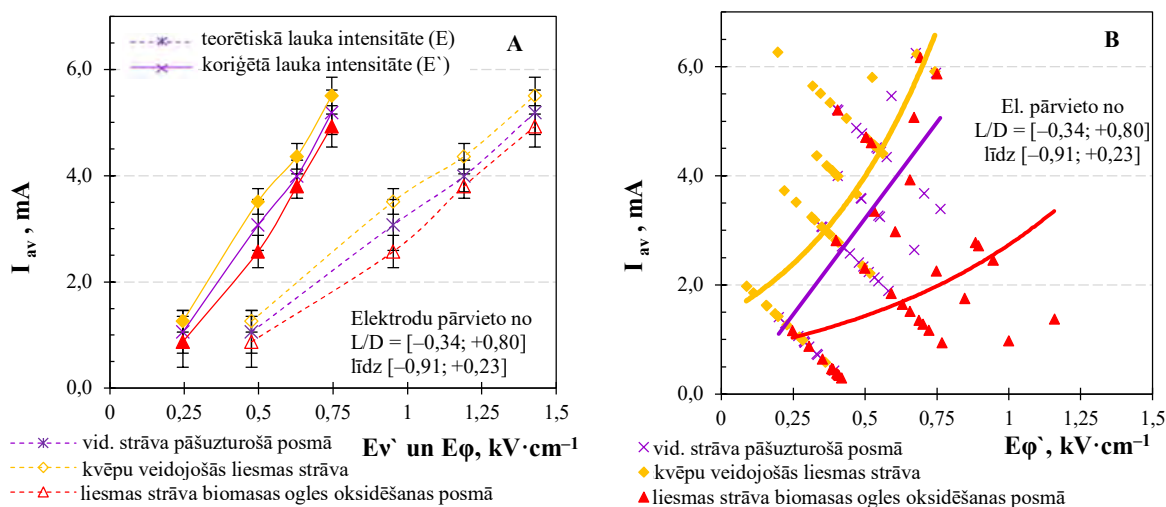
38. att. Jonu strāvas stipruma (A) un  $\text{C}_2\text{H}_2$  koncentrācijas (B) izmaiņas liesmā atkarībā no degšanas kinētikas izmaiņām salmu degšanas procesā.

Atbilstoši *Delfau* un *Michaud* [138], augstāka jonizācijas pakāpe ir novērojama tieši nepiesātināto ogļūdeņražu (piem., acetilēna–gaisa) liesmām. Savukārt acetilēna veidošanās

biomasas termiskās sadalīšanas produktu plūsmā nozīmē paaugstināto kvēpu koncentrāciju liesmā [249]–[251]. Tāpēc salmu degšanas posms pirms 1700 s, kas raksturojas ar augstu acetilēna un etilēna saturu degmaisījumā, atbilst lielākai jonu strāvas veidošanai (4. pielik. 6. att.).

Turpmākā salmu degšanas posmā jonu veidošanās ir saistīta ar metāna termoķīmisko konversiju degmaisījumā (8. att.). Salmu degšanas posmā pēc 1700 s jonu strāva nedaudz palielinās, kas ir novērojams uz 38. att. (A) grafika, ko nosaka uzlabota gaisa samaisīšanās ar biomasas termiskās sadalīšanas produktiem un šī maisījuma uzlabotā sadegšana, elektriskajā laukā radītā “jonu vēja” efekta dēļ (sk. 1.5.3. apakšnodaļā). Samazinātais kvēpu daļiņu saturs liesmā arī var ietekmēt liesmas strāvas pieaugumu sekundārajā salmu degšanas posmā (7. pielik. 12. att. – A), jo kvēpu daļiņas var negatīvi ietekmēt jonu strāvas stiprumu, piesaistot lādiņu nesējus, samazinot to kustīgumu vidē, vai vispār neitralizējot tos [189].

Elektriskā lauka intensitāte, pie pozitīvā elektroda, mainās atkarībā no elektronu koncentrācijas izmaiņām un sprieguma krituma *Langmuir* dubultslānī un elektriskā robežslānī. Pieaugot elektronu koncentrācijai, palielinās sprieguma kritums robežslānī, samazinot elektriskā lauka intensitāti degšanas zonā.



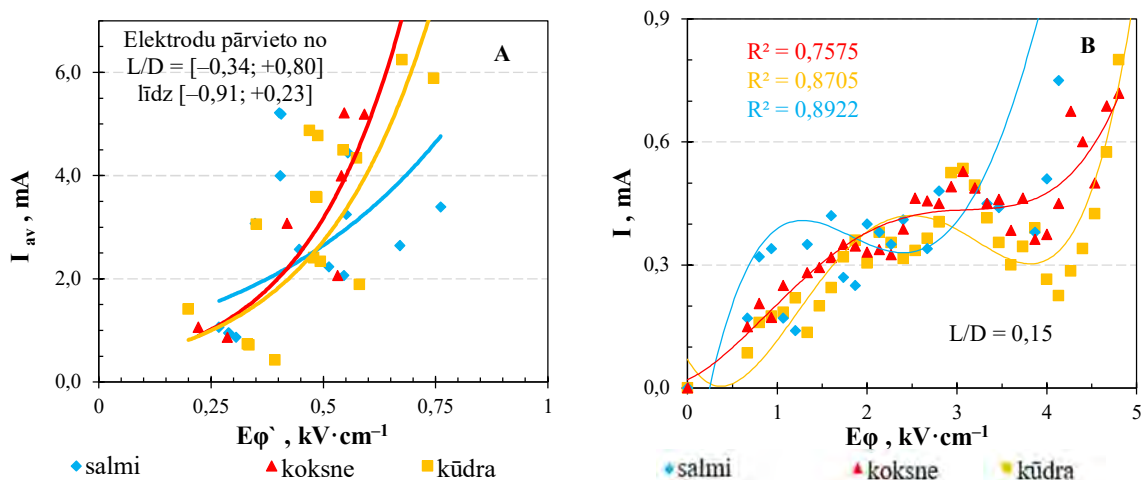
39. att. Liesmas jonu strāvas vērtību salīdzināšana teorētiskām un koriģētām elektriskā laukā intensitātēm (A); jonu strāvas statistikas dati dažādos salmu degšanas posmos.

Līdz ar to samazinās lauka intensitāte un elektriskais tilpuma spēks (*electric body force*, s.k. 1.5. nodaļā), kas nosaka “jonu vēja” veidošanos liesmā. 39. attēlā (A) ir dota liesmas strāvas stipruma izmaiņas atkarībā no koriģētās sprieguma vērtības (106. form., 7. tab.) salmu biomasas pašuzturošā degšanas posmā, salīdzinājumā ar elektriskā lauka intensitātes teorētiski aprēķinātām vērtībām. Pēc grafika likņu rakstura ir secināms, ka stāvas piesātinājums eksperimenta apstākļos nav sasniegts, bet elektroda potenciāla un strāvas paaugstināšanu salmu biomasas degšanas eksperimentos ierobežoja sprieguma avota raksturojošie parametri. Ir jāatzīmē, ka pie augstākām sprieguma vērtībām ( $U > 1,8 \text{ kV}$ ) strāva daļēji noslēdzās pārrogļotā biomasas virskārtā, kuras vadāmība pie augstām temperatūrām palielinājās cietās fāzes pārvērtību dēļ [252], [253], izraisot

dzirksteļošanu pārģotās biomasas virskārtā un strāvas fluktuācijas, kuru veidošanos nosaka nestabilie elektriskie kontakti starp pārģotām salmu granulām.

Respektīvi, biomasas degšana ir sarežģīts process, kuru nosaka salmu granulu termokīmiskās pārvērtības un gaistošo savienojumu degšanas procesu veidošanās, kas nosaka liesmas sastāva un strāvas fluktuācijas. 39. attēla (B) ir attēlota strāvas vidējo vērtību izmaiņas salmu biomasas degšanas procesā atkarībā no elektriskā lauka intensitātes (ar sprieguma krituma korekciju uz omiskās pretestības). Kaut gan strāvas vērtību izkliede dažādos degšanas posmos ir liela, var konstatēt, ka primārajā posmā (kvēpu veidojošā liesmā) strāvas vidējās vērtības ir lielākas salīdzinot ar sekundāro degšanas posmu.

Salīdzinot strāvas vidējās vērtības dažādas izcelsmes biomasu degšanas procesā (40. att. – A), var konstatēt, ka strāvas veidošanās salmu degšanas procesā ir nestabilāka, salīdzinot ar koksnes vai kūdras degšanas procesu. Strāvas fluktuācijas salmu degšanas procesā ir saistītas ar jau iepriekš minēto granulu virsmas transformācijām, termokīmisko pārvērtību rezultātā, sārnu metālu lidojošo pelnu veidošanos liesmas virpuļplūsmā, kā arī cieto pelnu slāņa veidošanos uz granulu slāņa virsmas, kas pie augstām temperatūrām veido elektriskās strāvas vadošus stiklveida aglomerātus [36]. Strāvas nestabilitāti salmu termokīmisko pārvērtību procesā var arī ietekmēt augsts kālija hlorīda tvaiku saturs liesmā [43], [51], jo vieglo sārnu metālu saturs degvielā paaugstina ogļūdeņražu liesmas jonizāciju [139]. Strāvas stipruma mērījumu vidējo vērtību izkliedes rezultāti dažādas izcelsmes biomasu pašuzturošā degšanas procesā (no 1300 s līdz 1600 s), kas apkopoti attēlā (40. att. – A) apliecina, ka vislielākā strāvas vidējo vērtību izkliede ir novērota salmu biomasas termokīmisko pārvērtību procesā.



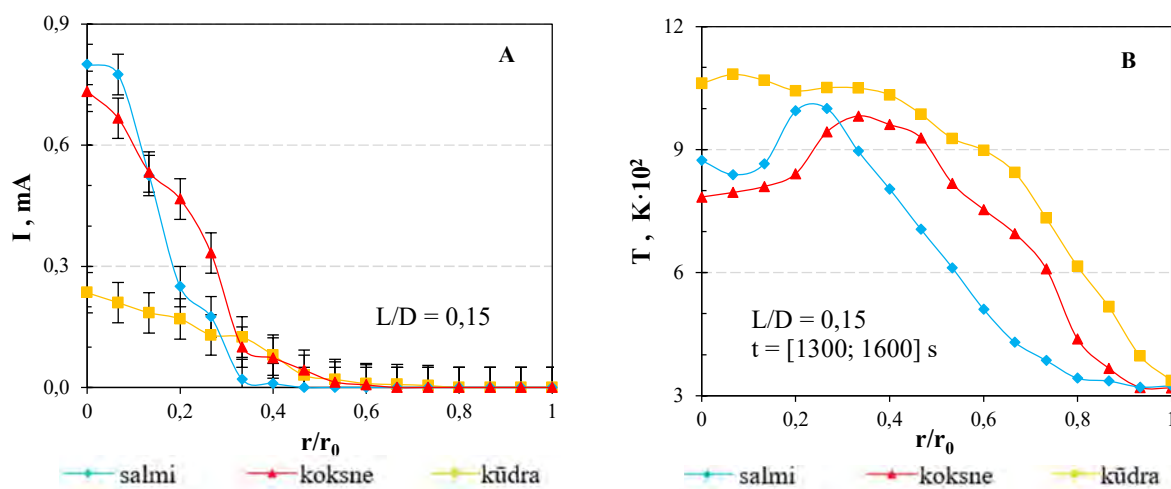
40. att. Liesmas jonu strāvas vidējo vērtību attiecība pret koriģēto elektriska lauka intensitāti dažādas izcelsmes biomasu degšanas procesā (A); jonu strāvas *Volt–Amper* raksturlīknes, kas iegūtas, izmantojot dubultās zondes metodi (B).

Jonu strāvas piesātinājuma līknes (*Volt–Amper* raksturlīknes), kas uzņemtas salmu pašuzturošā degšanas procesā intensīvākajā jonu veidošanas liesmas zonā (pie  $L/D = 0,15$ ), izmantojot dubultās zondes metodi (*double probe* – sk. 2.2.6. apakšnodaļā), apliecina, ka strāvas

līknes nesasniedz piesātinājumu. *Volt–Amper* raksturlīknes apstiprina arī iepriekšējo secinājumu par to, ka 39. attēlā jonu strāvas līknes nesasniedz savu piesātinājumu. Pēc 40. attēla (B) grafika līknēm var secināt, ka, atbilstoši *J. A. Tinajero* pētījumu rezultātiem [204], [213] strāvas piesātinājuma veidošanos var novērot pie aptuveni  $2\text{--}3\text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Tomēr promocijas darba ietvaros strāvas piesātinājums netika sasniegts, jo veidojās liels sprieguma kritums uz omisko pretestību (līdz 50 % no pieliktā sprieguma), samazinot sprieguma kritumu degšanas zonā.

Veicot jonu strāvas *Volt–Amper* raksturlīkņu un jonu strāvas radiālā sadalījuma veidošanās mērījumus dažādos attālumos no degšanas zonas pamatnes ir konstatēts, ka vislielākās strāvas vērtības ir novērojamas virpuļplūsmas centrālajā daļā  $r/r_0 = [0; 0,3]$ , attālumā  $L/D \approx [0; 0,15]$  no degšanas zonas pamatnes (37. att. – A).

Ievērojot citu autoru darbu secinājumus par elektronu ambipolāro difūziju no liesmas frontes uz degmaisījuma sagatavošanas zonu [177], var secināt, kā mērīšanas laikā tika reģistrēti negatīvā lādiņa nesēji, kuru masas kustība ir virzīta no karstākās (41. att. – B) liesmas zonas pie  $L/D \approx [0,3; 0,5]$  uz centrālā pozitīvi lādētā elektroda pusi, nodrošinot maksimālo liesmas vadāmību pie anoda robežslāņa (41. att. – A), kur elektriskā lauka intensitāte sasniedz maksimālās vērtības (sk. 2.1.1. apakšnodaļā) [235].



41. att. Dažādas biomasas liesmas jonu strāvas un temperatūras sadalījums degšanas kameras šķērsgrīzumā intensīvā jonu veidošanas liesmas zonā.

Salīdzinot dažādas izcelsmes biomasu jonu strāvas radiālā sadalījuma līknes, var secināt (41. att. – A), ka kūdras degšanas procesā strāvas vērtības ir gandrīz četras reizes mazākas, salīdzinot ar salmu un koksnes degšanas procesu (13. tab.). Strāvas maksimālo vērtību samazināšanos kūdras degšanas procesā var pamatot ar mazāku (par 12–18 %) gaistošo vielu saturu kūdras biomasā, kas savukārt ietekmē liesmas veidošanās kinētiku un liesmas garumu. Liesmas garums eksperimentos ar kūdru bija par 40 % mazāks, salīdzinot ar salmu liesmu, un par 70 % mazāks, salīdzinot ar koksnes biomasas liesmas garumu.

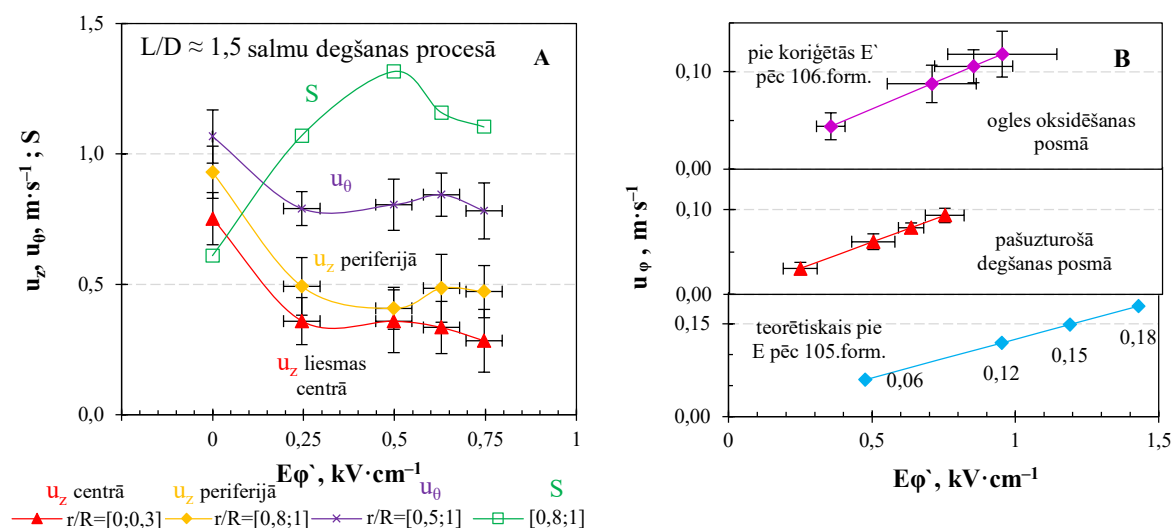
Veicot temperatūras radiālā sadalījuma mērījumus kūdras degšanas zonā pie  $L/D = 0,15$  (41. att. – B) ir noteikts, ka degšanas zonas centrālajā daļā liesmas temperatūra sasniedz maksimālo vērtību. Atšķirībā no temperatūras sadalījuma veidošanās kūdras degšanas procesā, temperatūras sadalījuma veidošanās koksnes vai salmu degšanas procesā raksturojas ar temperatūras samazināšanos liesmas centrālajā daļā (vidēji par 20 %), veidojot temperatūras pieaugumu pie  $r/r_0 = [0,2; 0,4]$ . Izvērtējot liesmas veidošanās siltuma bilanci (sk. 1.2.4. apakšnodaļā), var secināt kā kūdras biomasas pašuzturošā degšanas procesā degšanas procesi ir vairāk attīstīti plūsmas centrālajā daļā, bet, salmu un koksnes biomasas degšanas procesā, temperatūras sadalījuma veidošanos ietekmē endotermiskie procesi: biomasas termiskās sadalīšanās un degmaisījuma sagatavošanās. Ņemot vērā degšanas procesu un jonu veidošanās kinētiku, kā arī jonu strāvas sadalījuma veidošanos liesmā (sk. 1.4.3. apakšnodaļā), var secināt, temperatūras sadalījuma veidošanas maksimums neatbilst jonu strāvas sadalījuma veidošanas maksimumam. Jāatzīmē, ka liesmas zonā, kur ir novērojama maksimālā liesmas temperatūra, novēro jonu pārgrupēšanos un rekombināciju, kas samazina elektriskā lādiņa blīvumu [173], [189], kas samazina strāvas maksimālās vērtības kūdras biomasas degšanas procesā pie  $L/D = 0,15$ .

3.3. nodaļas kopsavilkumā var secināt, ka, lai nodrošinātu maksimāli efektīvu dažādas izcelsmes biomasu elektrisko kontroli, elektrodu ir nepieciešams novietot liesmas zonā, kur jonu strāva sasniedz maksimālo lielumu. Dažādas izcelsmes biomasu degšanas procesā jonu strāva sasniedz maksimālo vērtību 0 līdz 50 mm attālumā no biomasas granulu slāņa virsmas, liesmas apgabalā  $L/D \approx [-0,35; +0,2]$ , bet optimālai elektroda virsmas izmantošanai pie dotajiem liesmas parametriem, elektroda garumam ir jābūt vismaz 63 mm  $L/D \approx [-0,30; +1,15]$ . Promocijas darba pētījumos izvēlētais elektrods garums sasniedz 100 mm  $L/D = [-0,30; +2,00]$ , kas ļāva nodrošināt elektrisko lauku visā liesmas apgabalā, kurā tika novērota jonu veidošanās salmu, koksnes un kūdras biomasas degšanas procesā. Elektriskā lauka intensitāte degšanas zonā bija regulējama robežās no  $0,25 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$  līdz  $0,75 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ . Nepieciešams pieminēt, lai ierobežotu strāvas noplūdes veidošanos biomasas virskārtā biomasas termoķīmisko pārvērtību procesā, ir nepieciešams nodrošināt efektīvu elektroda izolāciju, ja elektrods tiek ievadīts liesmā caur granulu slāni. Pētījumu ietvaros elektroda izolāciju gazifikātorā nodrošināja ar 2 mm bieza keramiskā caurule, kuras garums atbilst granulu slāņa biezumam gazifikātorā degšanas procesa sākuma stadijā (300 mm), bet elektroda neizolētās daļas garums, kas ievietots liesmā, sasniedza 100 mm.

### 3.4. Elektriskā lauka ietekme uz plūsmas ātrumu komponentu izmaiņu

Eksperimentālā iekārtā izmantotā aerodinamiskā režīma dēļ, degšanas kamerā veidojās virpuļplūsma, kurai dabā vistuvākais piemērs ir virpuļviesulis. Iekārtā ir divas gaisa padeves: primārais gaiss ( $30 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ ), kas tiek padots gazifikatora pamatnē, zem granulu slāņa, un sekundārās gaiss ( $40 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ ), kas tiek padots azimutāli virs granulu slāņa ar  $40^\circ$  leņķi ( $\neq \theta_{ieejā}$ ) pret degšanas kameras korpusa pieskari. Daļa no sekundārā gaisa pārvietojas, aksiālā gaisa un biomasas termiskās sadalīšanas produktu, maisījuma kustības virzienā, bet daļa no sekundārā gaisa veido

pretplūsmu, kas pārvietojas gar degšanas kameras sienu virzienā uz granulu slāni, intensificējot gazifikācijas produktu samaisīšanos ar gaisu un atstarojās no granulu virsmas, veidojot aksiālu reakcijas zonu degšanas kameras centrālajā daļā. Šāda aerodinamiskā režīma dēļ notiek centrālās plūsmas kontrakcija un laminarizācija [22], [160], [167], [168]. 1.3. nodaļā tiek aplūkota teorētiskā un matemātiskā virpuļplūsmas dinamikas veidošanās analīze, bet 2.1.2. apakšnodaļā apskatīta plūsmas ātruma komponentu sadalījuma veidošanās un Reynoldska skaitļa izmaiņas, ka arī tiek salīdzināta plūsmas dinamikas veidošanās ar iepriekš veikto eksperimentālo un modelējošo plūsmas dinamikas pētījumu rezultātiem cilindriskajā kanālā. Nodaļā tiek izvērtētas arī plūsmas dinamikas izmaiņas elektriskā spēka iedarbības rezultātā. Teorētiskā apskatā 1.5. nodaļā ir izskaidrota “jonu vējā” daba un tā kustības ātruma matemātiskā saistība ar elektriskā lauka intensitāti. Ārējā elektriskā lauka un liesmas mijiedarbība izraisa lādēto daļiņu pārnese lauka darbības virzienā. Jonu un neitrālo gāzes daļiņu (sk. 1.5.4. apakšnodaļā) elastīgo sadursmju rezultātā notiek impulsu apmaiņa starp joniem un neitrālajām daļiņām, kas izmaina neitrālo daļiņu kustības daudzuma momentu, ierosinot šo daļiņu pārnese lauka virzienā un veidojot jonu vēju [223]. Līdz ar to elektriskā lauka iedarbības rezultātā novēro liesmas dinamikas izmaiņas.

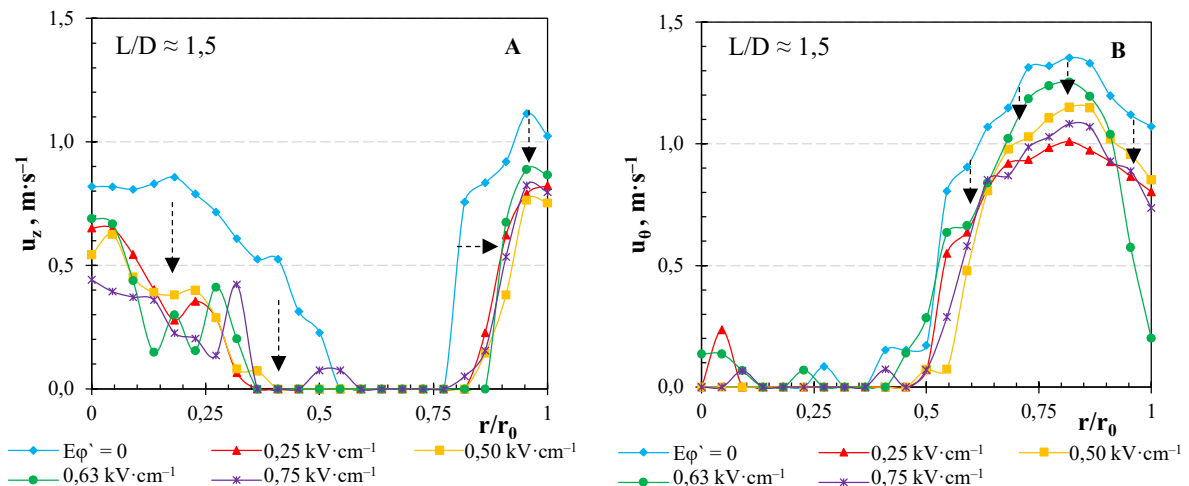


42. att. Vidējā aksiālā un azimutālā ātruma komponentu eksperimentālās vērtību izmaiņas elektriska lauka ietekmē (A); teorētiski aprēķinātā “jonu vēja” ātruma vērtības (B).

Detalizēta lauka un liesmas mijiedarbības efektu analīze ir apliecinājusi, ka primārās izmaiņas, kuras izraisa ārējās elektriskais tilpuma spēks ( $F_\phi$ ), ir attiecināmas uz liesmas dinamikas izmaiņām (42. att. – A), ko nosaka plūsmas nepārtrauktības vienādojums (101. un 104. form.), izraisot virpuļplūsmas aksiālā ( $u_z$ ), azimutālā ( $u_\theta$ ) un radiālā ( $u_r$ ) ātruma sadalījuma izmaiņas degšanas zonā (43. att.) saskaņā ar impulsa nezūdamības likumu (99. form.) un *Forthofer* un *Goodrick* vienādojumu (52. form.). Radiālās blīvuma gradienta izmaiņas, kuras veidojās elektriskais tilpuma spēka ietekmē  $\vec{V} \cdot \vec{F}_\phi$ , izraisa plūsmas dinamiskā spiediena  $\frac{1}{\rho^2} \vec{\nabla} \rho \cdot \vec{\nabla} p$  izmaiņas (12. att – D). Pamatojoties uz blīvuma gradienta izmaiņām tiek ierosināta plūsmas kustība lauka



virzienā, ievērojot impulsa nezūdamības likumu, palielinot liesmas virpuļplūsmas pārliedzianās  $(\vec{\omega} \cdot \vec{\nabla})\vec{u}$  un samazinot iztīepšanās efektu  $\vec{\omega}(\vec{\nabla} \cdot \vec{u})$ . Ievērojot virpuļplūsmas īpašības tiek prognozēta elektriskajā laukā izraisītā masas pārnese virzienā no centra uz degšanas kameras sienām, paplašinot liesmas reakcijas zonas diametru degšanas kamerā (17. att. – B), un samazinot centrālās plūsmas kustības kontrakcijas efektu (12. att.).



43. att. Virpuļplūsmas ātruma aksiālā (A) un azimutālā (B) komponentu radiālā sadalījuma izmaiņas, salmu degšanas kamerā, ārējā elektriskā lauka iedarbības rezultātā.

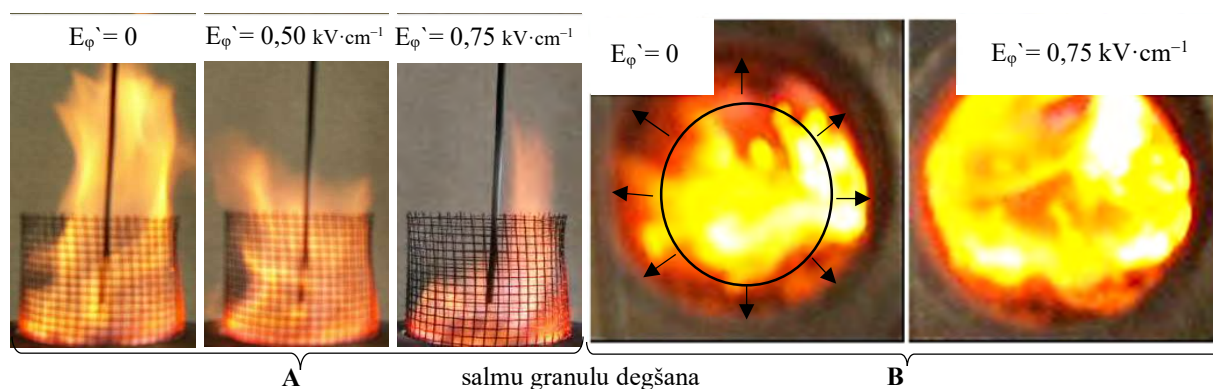
Kaut gan visintensīvākā jonu veidošanas, dažādas izcelsmes biomasu degšanas procesā, ir konstatēta pie  $L/D \approx [-0,35; +0,2]$  (37. att. – A), aksiālā un azimutālā ātruma radiālā sadalījuma mērījumi uzrādīja intensīvākas plūsmas dinamikas izmaiņas attālumā  $L/D \approx 1,5$  no degšanas zonas pamatnes (42. att. – A). Elektriskā lauka ietekmē šajā liesmas zonā ir konstatēta aksiālā ātruma ( $u_z$ ) samazināšanās plūsmas centrālajā daļā  $r/r_0 = [0; 0,3]$ , kā arī pie degšanas kameras sienas  $r/r_0 = [0,8; 1]$  vidēji par  $\approx 50\%$ . Plūsmas ātruma azimutālās komponentes ( $u_\theta$ ) samazinājums pie degšanas kameras sienas  $r/r_0 = [0,5; 1]$  ir mazāks un nepārsniedz  $\approx 25\%$ . Ievērojot nevienmērīgās plūsmas ātrumu komponentu izmaiņas (45. vien.), plūsmas perifērijā novēro virpuļskaitļa ( $S$ ) paaugstināšanos no 0,6 līdz  $\approx 1,1$ , kas atbilst iepriekš veiktajiem skaitliskās modelēšanas pētījumiem ar 1,5 kW iekārtu [233].

Eksperimentālās iekārtas konstrukcija apgrūtināja plūsmas ātruma radiālās komponentes mērījumus, tomēr, izmantojot 96.–97. formulas, pēc *Lawton* un *Weinberg* darba parauga [21] tika tuvināti aprēķinātas teorētiskā “jonu vēja” ātruma vērtības, atkarībā no eksperimentālā iekārtā elektrodam pieliktā sprieguma un nodrošinātā elektriskā lauka intensitātes (42. att. – B). Minētas vērtības ir saistītas ar plūsmas radiālā ( $u_r$ ) ātruma sadalījuma izmaiņām liesmas virpuļplūsmā. Teorētiskā elektriskā lauka intensitātes diapazonā  $E\varphi = [0,5; 1,5]$  kV·cm<sup>-1</sup> aprēķinātais “jonu vēja” ātrums, tuvu pie elektroda robežslāņa, dažādām intensitātēm, nevar pārsniegt 0,03–0,18 m·s<sup>-1</sup>, kas ir  $\gg 3\%$ , salīdzinot šīs ātruma vērtības ar maksimālo “jonu vēja” ātrumu pirms izlādes ( $\approx 30$  kV·cm<sup>-1</sup>) pēc *Lawton* un *Weinberg* [21], un  $\approx 2$ –11%, salīdzinot šīs ātruma vērtības ar

teorētiski aprēķinātām vērtībām pēc *Tinajero* [204], [213] pie lauka intensitātes līdz  $6 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$  (sk. 1.5.3. apakšnodaļā).

Uz 42. attēla (B) grafikā norādītas “jonu vēja” ātruma vērtības, kas ir aprēķinātas pēc koriģētās ( $E\varphi'$ ) elektriskā lauka intensitātes pie elektroda zonas. Pašuzturoša degšanas posma laikā, pie lauka intensitātes  $E\varphi' \approx 0,75 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$  “jonu vēja” ātrums var sasniegt  $0,09 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Tomēr lielāku “jona vēja” efektu elektriskais lauks potenciāli var veidot, degšanas procesam pārejot no kvēpu veidojošās liesmas posma ogles oksidēšanas posmā, kuru nosaka virsmas reakcijas. Šajā degšanas posmā nedaudz samazinās elektriskā strāva (39. att. – B) un sprieguma kritums uz omiskās pretestības, bet palielinās elektroda potenciāls un koriģētā lauka intensitāte. “Jona vēja” ātruma vērtība ogles oksidēšanas posmā pie  $E\varphi' \approx 0,95 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$  var sasniegt  $0,12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , kas ir 15 % no *J. A. Tinajero* [219] eksperimentāli noteiktās “jona vēja” ātruma vērtībās pie metāna liesmas strāvas piesātinājuma ( $2\text{--}3 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ ).

Veicot padziļināto aksiālā un azimutālā ātruma komponentu sadalījuma izpēti pie dažāda ārējā elektriskā lauka intensitātēm ir konstatēts plūsmas izplēšanās – uz 43. attēla (A) grafika ir novērojama aksiālā ātruma komponentes radiālā sadalījuma līknes nobīde no  $r/r_0 = [0,8; 1]$  uz  $r/r_0 = [0,86; 1]$ , ar vienlaicīgu ātruma maksimālās vērtības samazināšanos. Liesmas reakcijas zonas paplašināšanos degšanas kamerā, ārējā elektriskā lauka iedarbības rezultātā, var novērot arī vizuāli (44. att. – B). Elektriskā lauka iedarbības rezultātā novēro arī plūsmas savirpuļojuma palielināšanos pie degšanas kameras sienas [233], kas saistīta ar nevienmērīgām aksiālā un azimutālā (43. att. –B) ātruma izmaiņām, izraisot intensīvāku biomasas gaistošo vielu sajaukšanos ar gaisa virpuļplūsmu (45. vien.). Uzlabotā gaisa un biomasas termiskās sadalīšanas produktu samaisīšanās veicina degmaisījuma aizdegšanos (34. form.), palielinot liesmas virpuļplūsmas struktūras viendabīgumu (44. att. – B).



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

Plūsmas aksiālā ātruma radiālā sadalījuma izmaiņas izraisa centrālās laminārās plūsmas daļas šķērsriezuma laukuma palielināšanos un centrālās plūsmas kustības aksiālā ātruma (43. att. – A) samazināšanos pie  $r/r_0 = [0,2; 0,5]$ , kas netieši var liecināt par recirkulācijas zonas

veidošanos, palielinot biomasas termiskās sadalīšanas produktu uzturēšanās ilgumu reakcijas zonā. Aksiālā ātruma komponentes samazinājums, gan plūsmas centrā, gan arī degšanas zonas ārējā daļā ierosina liesmas redzamās daļās garuma samazināšanos (44. att. – A). Uz liesmas fotoattēliem var novērot pakāpenisko liesmas pārliekšanās un iztiepšanās efekta samazināšanos, kuru nosaka virpuļplūsmas aksiālā komponentes izmaiņas. Šis efekts prognozēts, ievērojot liesmas virpuļplūsmas radiālā blīvuma gradienta izmaiņas (104. form.)

Plūsmas ātruma komponentu sadalījuma pētījumu rezultāti apliecina augšupvērstās virpuļplūsmas kustības samazināšanos, ko nosaka lejupvērstās virpuļplūsmas kustības daudzuma palielinājums pie kanāla sienām. Reversās plūsmas veidošanās pie kanāla sienām intensificē siltuma un masas pārnese uz granulu virsmu, bet aksiālā ātruma samazināšanos kopā ar aksiālās recirkulācijas zonas veidošanos var nodrošināt biomasas termoķīmiskās sadalīšanas produktu pilnīgāku konversiju degšanas kamerā.

### 3.5. Degšanas temperatūras izmaiņas elektriskā lauka iedarbības rezultātā

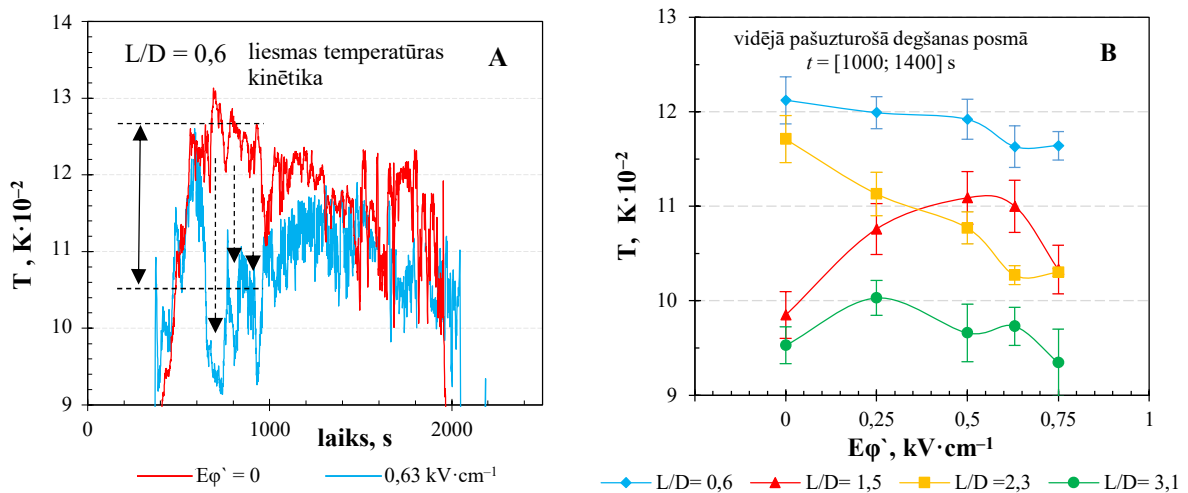
Kā apliecina liesmas virpuļplūsmas dinamikas un struktūras izmaiņu pētījumi [22], [234], [254], ārējie elektriskie spēki būtiski ietekmē plūsmas dinamikas veidošanos, degvielas–gaisa sajaukšanos degšanas kameras pamatnē un nodrošina pilnīgāku kurināmā sadedzināšanu, kas savukārt izraisa degšanas zonas temperatūras sadalījuma izmaiņas.

Atsaucoties uz 3.4. nodaļu ietvertu informāciju, elektriskajā laukā ierosinātā lādēto daļiņu pārnese, lauka virzienā, izraisa ātruma sadalījuma un vidējā ātruma izmaiņas, kuras savukārt ietekmē liesmas virpuļplūsmas struktūru un degšanas procesu veidošanās dinamiku, izraisot lokālas liesmas temperatūras un degšanas zonas sastāva izmaiņas.

Granulētās biomasas degšanas procesa ( $L/D = 0,6$ ) temperatūras kinētikas mērījumi pie liesmas pamatnes apliecina, ka ārējā elektriskā lauka ietekme izraisa ātrāku holocelulozes sadalīšanas endotermisko procesu (2. att. – C) veidošanās pirms pašuzturošā degšanas procesa izveidošanās – laika periodā no 600 s līdz  $\approx 1000$  s, samazinot plūsmas temperatūru un tādēļ nedaudz aizkavējot liesmas attīstīšanos (45. att. – A). Ārējā elektriskā lauka iedarbības rezultātā šo temperatūras pazeminājumu pamatvilcienos nosaka temperatūras paaugstināšanās degšanas zonā pie  $L/D \approx 1,5$  (45. att. – B), kur prevalē eksotermiskie degšanas procesi. Plūsmas aksiālā ātruma samazināšanas dēļ, palielinās biomasas termiskās sadalīšanās produktu uzturēšanas ilgums, tādēļ nobīdot liesmas siltuma gradienta maksimumu tuvāk biomasas granulu virsmai (pēc 33. vien.). Elektriskā laukā iedarbības rezultātā novēro arī liesmas reakcijas zonas paplašināšanos, kas nodrošina vienmērīgāku siltuma padevi biomasas slānim un ātrāku pašuzturošā degšanas procesa veidošanos.

Elektriskā lauka iedarbības rezultātā liesmas virpuļplūsmas pamatnē ( $L/D = 0,6$ ) ir vērojama degšanas zonas vidējās temperatūras vērtību samazināšanās (45. att. – B). Liesmas temperatūras vidējās vērtības samazināšanos elektriskā lauka iedarbības rezultātā izraisa jonu un neitrālo daļiņu radiālā siltuma/masas pārnese virzienā no reakcijas zonas uz degšanas kameras

sienām, intensificējot reversās virpuļplūsmas veidošanos un endotermiskos biomasas termiskās sadalīšanās procesus (sk. 2.1.2. apakšnodaļā).

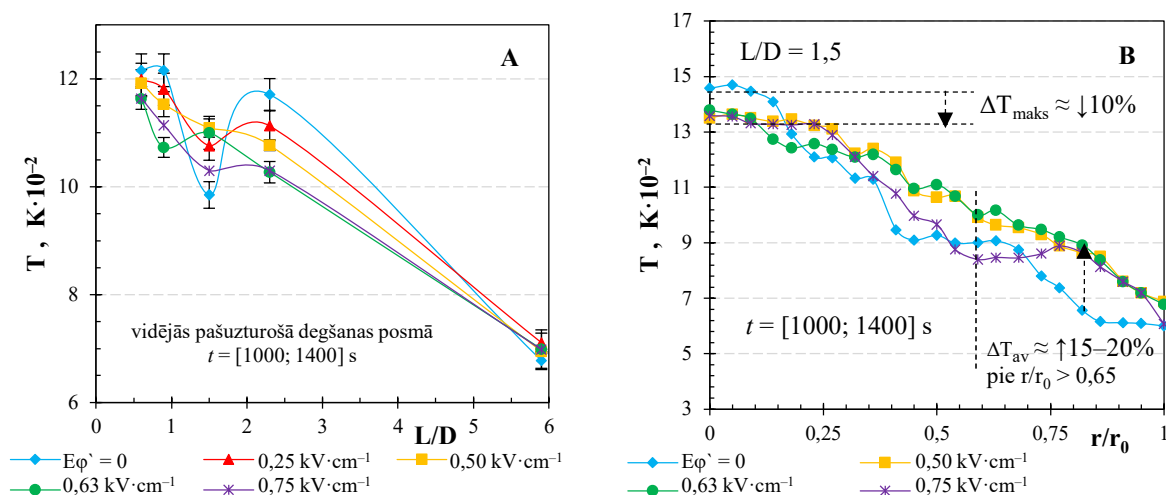


45. att. Elektriskā lauka ietekme uz liesmas temperatūras kinētiku degšanas kameras centrā (A) un liesmas temperatūras radiālā sadalījuma vidējo vērtību (B).

Liesmas reakcijas zonas fotoattēli (44. att. – B) dod priekšstatu par liesmas temperatūras sadalījuma izmaiņām, kas veidojas elektriskā lauka iedarbības rezultātā, ja liesmas reakcijas zonā aksiāli ievieto pozitīvi lādētu elektrodu. Elektriskajā laukā izraisīto siltuma un masas pārnese procesu izmaiņu rezultātā novēro liesmas struktūras izmaiņas – paplašinās un homogenizējās degšanas zona, intensificējot gaistošo savienojumu un gaisa virpuļplūsmas sajaukšanos degšanas zonas ārējā daļā un samazinot aukstā gaisa virpuļplūsmas biezumu pie degšanas kameras sienām. Tomēr ir jāatzīmē, ka fotoattēlā redzamās reakcijas zonas struktūras izmaiņas var izraisīt arī neizreaģējušā degmaisījuma koncentrācijas palielināšanos liesmas virpuļplūsmas centrālajā daļā, kuru novēroja arī pārņēto granulu oksidēšanās posmā bez pieliktā elektriskā lauka (10. pielik. 16. att.). Ja biomasas degšanas laikā degšanas procesi tiek intensificēti galvenokārt liesmas ārējā daļā, bet tiek ierobežota komponentu sajaukšanās liesmas centrālajā daļā, biomasas termiskās sadalīšanas produkti aizplūst un neizreaģē, palielinot neizreaģējušo gaistošo savienojumu koncentrāciju dūmgāzēs [255]. Tāpēc ir ļoti svarīgi, lai biomasas pašuzturošā degšanas posmā liesmas virpuļplūsmas struktūra nodrošinātu komponentu pilnīgu sajaukšanos, veidojot konusveidīgu plūsmas struktūru.

Kaut gan elektriskā lauka iedarbības rezultātā liesmas virpuļplūsmas degšanas zonas centrālajā daļā ( $L/D = 1,5$ ) novēro nelielu vidējās temperatūras pieaugumu, tālāk liesmas garumā ( $L/D > 2,3$ ) ir vērojama vidējās temperatūras samazināšanās (46. att. – A, 45. att. – B), kuru nosaka reakcijas zonas paplašināšanās un liesmas garuma samazināšanās. Liesmas virpuļplūsmas reakcijas zonas paplašināšanos, elektriskajā laukā, 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  $\approx 10 \%$ , bet pie  $r/r_0 > 0,65$  izraisot temperatūras pieaugumu par 15–20 %

(46. att. – B). Līdzīgas temperatūras radiālā sadalījuma izmaiņas elektriskā lauka iedarbības rezultātā ir konstatētas arī propāna liesmas virpuļplūsmā [234], [254].



46. att. Liesmas virpuļplūsmas temperatūras aksiālā (A) un radiālā (B) sadalījuma izmaiņas granulētās biomasas degšanas procesā elektriskā lauka iedarbības rezultātā.

Kopsavilkumā ir jāuzsver, ka liesmas virpuļplūsmas temperatūras, kā arī aksiālā/azimutālā ātruma sadalījuma un vidējā ātruma lokālās izmaiņas, elektriskā lauka liesmas mijiedarbības rezultātā, ļauj secināt, ka elektriskā lauka ierosinātā jonu un neitrālo daļiņu siltuma/masas pārnese izraisa degšanas zonas struktūras, sastāva un temperatūras sadalījuma izmaiņas, ierobežojot komponentu sajaukšanos liesmas centrālajā daļā un samazinot gaisa padeves pārsvaru degšanas zonā (49. att. – A), intensificējot komponentu sajaukšanos ar lokālu temperatūras pieaugumu degšanas zonas ārējā daļā (46. att. – B, 44. att. – B).

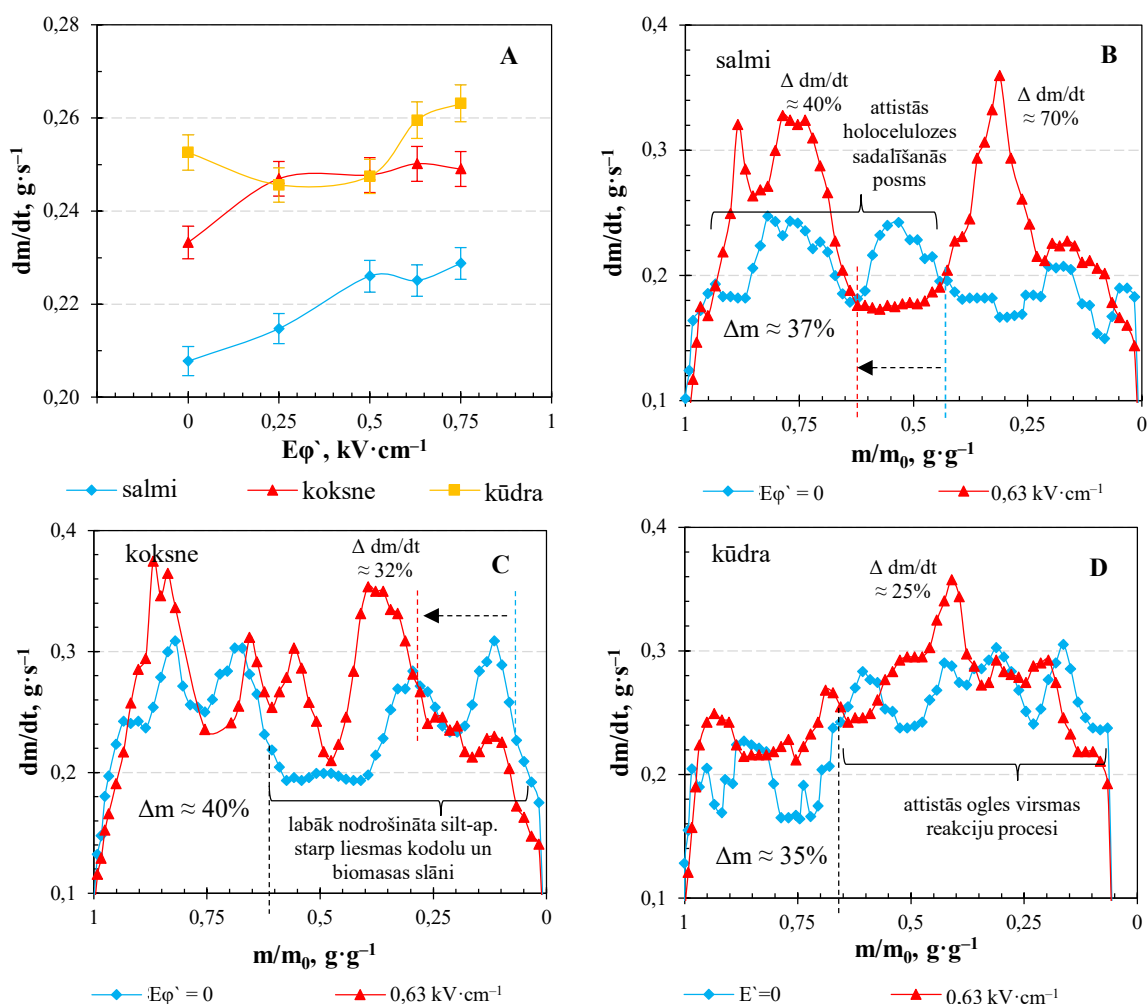
Ir jāatzīmē, ka liesmas virpuļplūsmas ātruma komponentu un temperatūras mērījumi granulētās biomasas degšanas procesā tika veikti pie nemainīgas primārā un sekundārā gaisa padeves iekārtā ( $G_z/G_\theta = 30/40 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ ). 1,5 kW un 4 kW iekārtu liesmas aerodinamisko režīmu salīdzināšana (26. att.) apliecināja, ka iekārtas konstruktīvās īpašības (piem., degšanas kameras diametrs) ietekmē aksiālā un azimutālā ātrumu sadalījumu un ātrumu vidējās vērtības. Tāpēc, lai sasniegtu vēlamu elektriskā lauka un liesmas virpuļplūsmas mijiedarbības efektu uz lielākas jaudas iekārtām, ir nepieciešams nodrošināt virpuļplūsmas aerodinamiskā rakstura mērogošanu, piemeklējot efektīvāko elektriskā lauka intensitāti un aksiāli ievietotā pozitīvi lādētā elektroda potenciālu.

### 3.6. Biomasas termiskās sadalīšanas procesa intensifikācija

Apkopojot plūsmas ātruma sadalījuma un temperatūras izmaiņas pētījuma rezultātus, ir konstatēts, ka, pie dotās virpuļplūsmas struktūras un elektroda konfigurācijas, elektriskajā laukā

ierosinātie siltuma un masas pārnese procesi izraisa lokālas plūsmas dinamikas un liesmas temperatūras izmaiņas ar sekojošām biomasas termiskās sadalīšanās procesu izmaiņām.

Izmantojot apvienoto biomasas granulu slāņa augstuma izmaiņu mērījumus un termiskās sadalīšanās produktu IS spektrālo analīzi, eksperimentāli konstatē granulētās biomasas termiskās sadalīšanās (47. att. – A) un gaistošo vielu veidošanās procesu intensifikācija elektriskā lauka un liesmas mijiedarbības procesā (49. att. – A). Salīdzinot dažādas izcelsmes biomasas granulu masas zudumu kinētiskās līknes bez elektriskā lauka ( $E\varphi' = 0$ ) un to izmaiņas ārējā lauka iedarbības rezultātā ( $E\varphi' > 0$ ) (47. att. – B, C, D) konstatē, ka granulu slāņa masas zuduma izmaiņas dažādām biomasām ir atšķirīgas, ko nosaka komponentu struktūras, elementārā un ķīmiskā sastāva atšķirības.



47. att. Granulu masas zudumu vidējo vērtību izmaiņas (A); salmu (B), koksnes (C), kūdras (D) biomasas termiskās sadalīšanās procesā elektriskajā laukā.

Elektriskā lauka iedarbības rezultātā biomasas termiskās sadalīšanās procesā galvenokārt tiek intensificēts holocelulozes termiskā sadalīšanās, izraisot biomasas granulu slāņa strauju

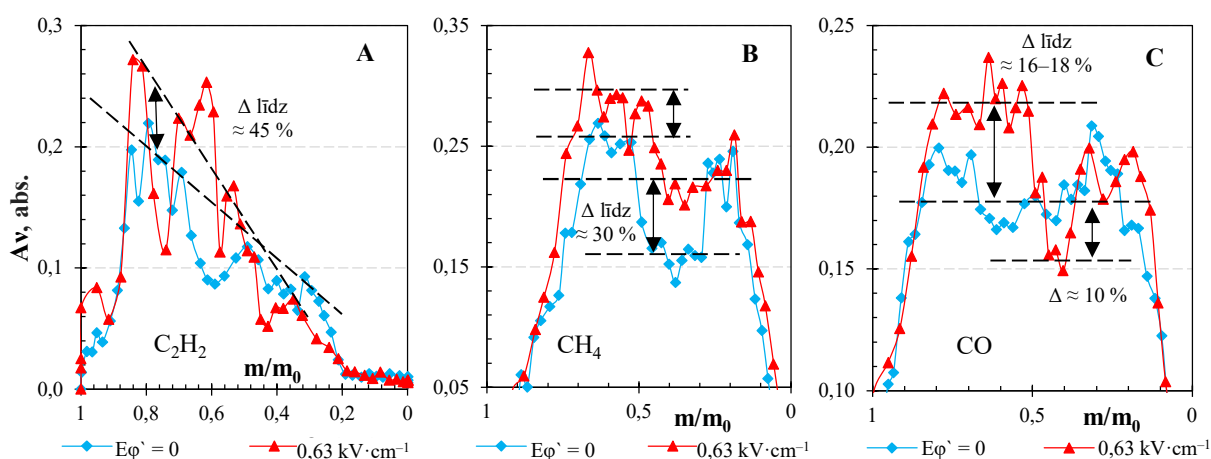
kritumu vidēji par 35–40 %. Dažādas izcelsmes biomasu masas izmaiņas holocelulozes termiskās sadalīšanās procesā ir saistītas ar atšķirīgo gaistošo vielu saturu (13. tab.) un hemicelulozes atšķirīgo ķīmisko sastāvu (3. pielik. 2. att.). Koksnes biomasas hemicelulozes termiskā sadalīšanās, pateicoties tās ķīmiskai struktūrai (*Gal–Glu–Man*), notiek visstraujāk (3. tab.), salīdzinot to ar salmu un kūdras biomasu granulatu termisko sadalīšanos. Tāpēc elektriskajā laukā termiskās sadalīšanās sākuma posmā – līdz  $m/m_0 \approx 0,60$  ( $\approx 1000$  s) koksnes biomasas sadalīšanās uzlabojās par 20 %. Pazeminātā gaistošo vielu satura dēļ (12. un 13. tab.), termiskās sadalīšanās intensifikācija polisaharīdu (hemicelulozes un celulozes biodegradācijas produkti, sk. 1.1.2. apakšnodaļā) sadalīšanās posmā (līdz  $\approx 1500$  s) kūdras biomasu granulām maz novērojama (10 %). Visintensīvākās primārās masas izmaiņas (40 %) posmā līdz 1200 s (47. att. – B) elektriskā lauka iedarbības rezultātā ir novērotas salmu termoķīmisko pārvērtību procesā, kad uzlabojoties siltuma apmaiņai starp degšanas zonu un granulētās biomasas slāni, tiek intensificēta *Glu–Uro–Ara–Xyl* sekundārā posma termiskā sadalīšanās, izraisot holocelulozes termiskās sadalīšanās paātrināšanos (par 20 %) (45. att. – B). Šīs rādītās intensifikācijas rezultātā divi primārie termiskās sadalīšanās  $\Delta m$  maksimumi saplūst. Koksnes hemicelulozēm sekundārais termiskās sadalīšanās posms nav novērots, bet salmiem šis posms notiek pie augstākām temperatūrām (uz 100 K), ar 2 reizes augstāku aktivācijas enerģiju ( $E_A$ ) un 10 reizes mazāku reakciju ātrumu ( $K_{reakc}$ ) (3. tab.). Savukārt, primārais hemicelulozes termiskās sadalīšanās posms abām biomasām pēc kinētikas datiem ir līdzīgs.

Salmu un koksnes biomasas termiskās sadalīšanās atšķirības novēro gan primārajā (holocelulozes) termoķīmisko pārvērtību posmā, gan arī sekundārajā – ogļveida fāzes oksidēšanas stadijā, savukārt kūdras biomasas sadalīšanās procesa intensifikācija notiek galvenokārt pārņemotās cietās fāzes termiskās sadalīšanās posmā. Kūdras degšanas procesa izmaiņas laika posmā no procesa sākuma līdz  $\approx 1500$  s (līdz  $m/m_0 \approx 0,6$ ) apliecina, ka ārējā elektriskā lauka iedarbības rezultātā kūdras termiskās sadalīšanās process kļūst vienmērīgāks (47. att. – D). Pamatā to nosaka reversās plūsmas intensifikācija elektriskā lauka un liesmas mijiedarbības rezultātā, intensificējot biomasas sasīšanu un žāvēšanu (3.4.–3.5. nodaļa). Pie  $m/m_0 \approx 0,4$  ( $\approx 2000 - 2100$  s) ar  $E\varphi' > 0$  kūdras biomasas termiskās sadalīšanās ātrums sasniedz savu maksimumālo vērtību ( $\Delta dm/dt = 25$  %), kad ir novērojama  $CH_4$  koncentrācijas samazināšanās virpuļplūsmā (34. att. – B) un novēro liesmas kinētikas izmaiņas (sk. 3.2. nodaļā). Kūdras biomasas gruzdēšanas posmā (pēc 3000 s) termiskās sadalīšanās intensifikācija, elektriskajā laukā, vizuāli nav novērojama, jo degšanas kamerā biomasas pārvērtības notiek bez redzamās liesmas veidošanās.

Koksnes sekundārās termiskās sadalīšanās posms pēc 1500 s  $m/m_0 \approx [0,4; 0,05]$  attīstās par 27 % ātrāk un par 32 % intensīvāk (47. att. – C), kas izraisa koksnes granulatu ātrāku sadegšanu ar pielikto elektrisko lauku. Salmu biomasas pašuzturošā degšanas posmā pēc 1500 s  $m/m_0 \approx [0,45; 0,2]$  sāk attīstīties ogles oksidēšanās virsmas reakcijas (17.–24. form.), un ar pielikto elektrisko lauku biomasas termiskās sadalīšanās ātrums pieaug par 70 % (47. att. – A), izraisot pārņemto salmu ātrāku sadalīšanos un gruzdēšanas posma ilguma samazināšanos (47. att. – B).

Veicot biomasas masas zudumu izmaiņu vidējo vērtību aprēķinus, ir konstatēts, ka vislielākais kviešu salmu granulu masas zudumu pieaugums (par  $\approx 10\%$ ) ir vērojams pie  $E\varphi' = 0,75 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$  (47. att. – A). Savukārt koksnes biomasas termiskās sadalīšanas ātruma pieaugums, palielinot pozitīvi lādētā elektroda spriegumu, ir samērā neliels ( $\approx 5\%$ ) jau pēc  $E\varphi' = 0,25 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Kūdras granulu sadalīšanas ātruma pieaugums nav vienmērīgs, tomēr pie  $E\varphi' = 0,75 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$  var sasniegt  $\approx 5\%$ .

Liesmas reakcijas zonas biomasas termiskās sadalīšanas produktu IS spektrālā analīze ļauj secināt, ka biomasas granulu slāņa masas izmaiņas pie  $E\varphi' > 0$  ir cieši saistītas ar termiskās sadalīšanas produktu koncentrācijas pieaugumu liesmas virpuļplūsmas pamatnes centrālajā daļā. Salīdzinot salmu biomasas termiskās sadalīšanas ātruma kinētiku (47. att. – B) ar gaistošo vielu ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ) veidošanās kinētiku degšanas zonā, var secināt, ka elektriskā lauka iedarbības rezultātā novēro gaistošo savienojumu koncentrācijas maksimālo vērtību pieaugumu.  $\text{C}_2\text{H}_2$  veidošanās kinētikā (48. att. – A) gazifikatora izejā ir novērojams koncentrācijas pieaugums līdz  $45\%$ , kas atbilst holocelulozes termiskās sadalīšanas intensifikācijas maksimumam pie  $E\varphi' > 0$  masas izmaiņu intervālā līdz  $m/m_0 \approx 0,5$  (47. att. – B).

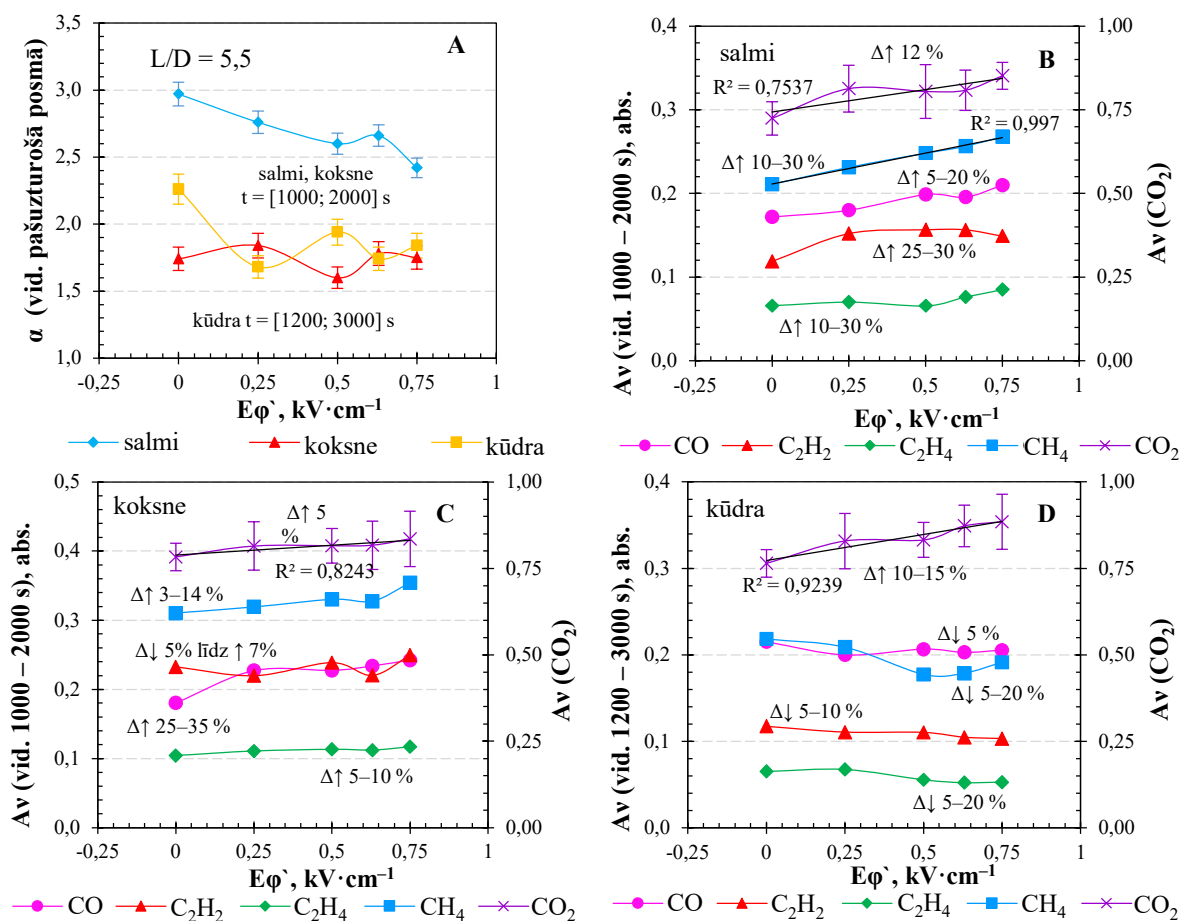


48. att. Elektriskā lauka ietekme uz salmu biomasas termiskās sadalīšanas produktu ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ) veidošanās kinētiku.

Tomēr pēc šī posma  $\text{C}_2\text{H}_2$  veidošanās degšanas kameras pamatnē nedaudz samazinās, bet  $\text{CH}_4$  veidošanās pieaug, kas norāda uz salmu biomasas degšanas procesa parēju no kvēpu veidojošā posma pie dominējošo oglei virsmas reakciju posma. Izteiktās  $\text{CH}_4$  veidošanās kinētikas līkņu atšķirības (par  $\approx 30\%$ ), ar pielikto elektrisko lauku un bez tā, ir novērojamas pašuzturošā degšanas posmā no  $m/m_0 = 0,45$  līdz  $0,3$  (48. att. – B), kas pēc intervāla atbilst otrajam izteiktam maksimumam salmu termiskās sadalīšanas ātruma izmaiņām grafikā ar  $E\varphi' > 0$  (47. att. – B).  $\text{CO}$  veidošanās kinētikā (48. att. – C) ar  $E\varphi' > 0$  ir redzama divu atsevišķu maksimumu izveidošanās un to vidējo vērtību paaugstināšanās (par  $16\text{--}18\%$ ). Šie maksimumi pēc intervāliem atbilst salmu biomasas termiskās sadalīšanas ātrumu pieaugumiem holocelulozes un oglei sadalīšanas posmos. Kaut gan elektriskā lauka ietekmē  $\text{CO}$  veidošanās līknē  $m/m_0 = [0,5; 0,35]$  robežās ir redzams  $\text{CO}$



koncentrācijas kritums (par 10 %),  $\text{CH}_4$  veidošanās kinētikas līknē otrādi – ir novērojams tā koncentrācijas pieaugums, kas liecina par reducēšanas reakciju attīstīšanos uz biomasas ogles virsmas (25.–26. form.). Pēc šī piemēra var secināt, ka elektriskais lauks ne tikai palielina gaistošo vielu koncentrāciju gazifikatora izejā, bet arī izmaina šo gaistošo vielu veidošanās kinētiku, intensificējot atsevišķus biomasas termiskās sadalīšanas posmus un paātrinot biomasas degšanas procesu. Salīdzinot dažādas izcelsmes biomasu termiskās sadalīšanas produktu IS absorbcijas spektra intensitāšu vidējo vērtību izmaiņas atkarībā no ārējā elektriskā lauka intensitātes, var redzēt gaistošo vielu koncentrācijas pieaugumu salmu un koksnes biomasas degšanas kameras pamatnē (49. att. – B, C). Savukārt kūdras granulu degšanas laikā, degšanas kameras pamatnē, ar pielikto elektrisko lauku novēro termiskās sadalīšanas produktu koncentrācijas vidējo vērtību samazināšanos (49. att. – D). Salmu biomasas gaistošo vielu vidējās koncentrācijas, palielinot elektriskā lauka intensitāti vienmērīgi pieaug no  $\approx 10\%$  līdz  $30\%$ . Īpaši intensīvs pieaugums ir novērojams  $\text{C}_2\text{H}_2$ , kurš sasniedz piesātinājumu jau pēc  $E\varphi = 0,25 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ , un  $\text{CH}_4$ , kurš pakāpeniski ( $R^2 = 0,997$ ) paaugstinās no  $A_v = 0,21 \text{ Abs}$  līdz  $0,27 \text{ Abs}$  (par  $30\%$ ).



49. att. Elektriskā lauka efekts uz gaisa pārkumu (A) un biomasas termiskās sadalīšanas produktu vidējo daudzumu degšanas kameras pamatnē (B, C, D).

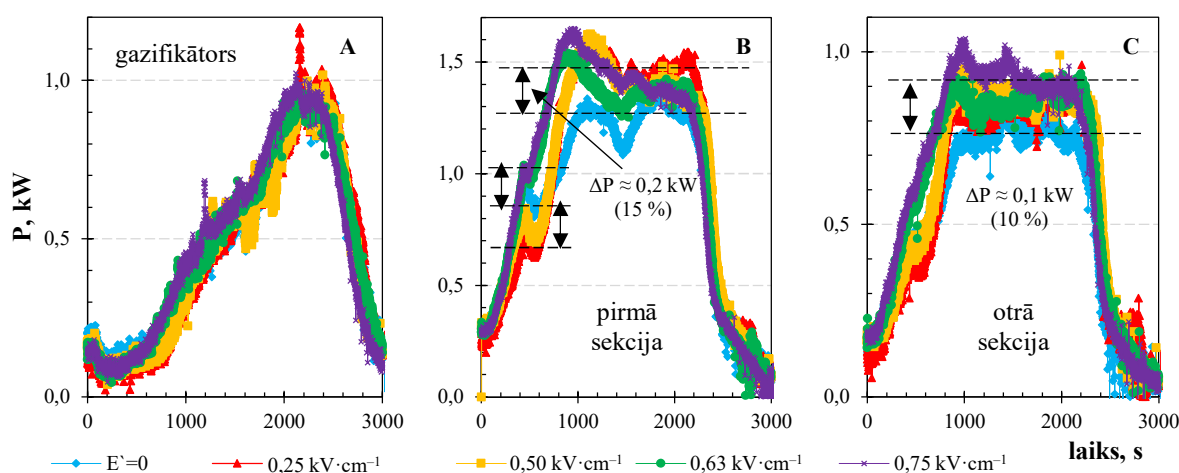
Koksnes biomasas dažādu gaistošo vielu koncentrācija degšanas kameras pamatnē pieaug no 5 % līdz 10 %, izņemot CO, kuru veidošanās ar pielikto elektrisko lauku pieaug par 25–35 %. CO pieaugums koksnes granulām var būt saistīts ar aktīvo OH radikāļu iztrūkumu reakcijas zonā, kurš paver neiespējamu CO tālāku konversiju (12. form.). OH radikāļu iztrūkums pamatvilcienos ir novērots kvēpu veidojošā liesmā un ir saistīts ar ierobežotu gaisa padevi reakcijas zonā (4. pielik. 7. att.). Ievērojot faktu, ka gaisa pārsvars degšanas zonā, koksnes biomasas degšanas laikā, elektriskajā laukā, gandrīz nemainās ( $\alpha_{sum} \approx 1,75 \pm 0,15$ ) un CO<sub>2</sub> koncentrācija degšanas kameras pamatnē pieaug daudz mazāk (salīdzinot ar salmu un kūdras biomasu degšanas procesiem), ir secināms, ka koksnes granulū degšanas procesā elektriskā lauka izraisītie efekti nespēj pietiekoši uzlabot degmaistījuma samaisīšanos ar gaisu, lai nodrošinātu termiskās sadalīšanas produktu pilnīgo sadegšanu. Šī problēma izraisa liesmas reakcijas garuma pieaugumu (sk. 3.2. nodaļā). Lai turpmāk izpētītu šī faktora ietekmi uz elektriskā lauka tehnoloģijas aplikāciju koksnes granulū degšanas procesiem, ir nepieciešams veikt papildus izpēti ar garāku aksiālo elektrodu.

Kūdras biomasas degšanas procesā termiskās sadalīšanas intensifikācija, arējā elektriskajā laukā, izraisa gaistošo vielu IS absorbcijas joslu intensitāšu vidējo vērtību samazinājumu par  $\approx 5$ –20 % (49. att. – D). Kūdras biomasas degšanas procesa veidošanās kinētika raksturojas ar īsākas liesmas veidošanos (sk. 3.2. nodaļā), tāpēc elektriskā laukā izraisītie efekti efektīvi uzlabo gaisa samaisīšanos ar termiskās sadalīšanas produktiem, kas ir novērojams pēc gaistošo savienojumu (CO, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) koncentrācijas un gaisa pārākuma pakāpeniskās samazināšanās, un CO<sub>2</sub> koncentrācijas palielināšanās (47. att. – A, D).

Veicot gaisa pārākuma koeficienta mērījumus dūmgāzēs ( $L/D = 5,5$ ) ar gāzes analizatoru (sk. 2.2.9. apakšnodaļā) dažādiem granulū veidiem pie vienādām primārā un sekundārā gaisa padevēm iekārtā ( $G_z/G_\theta = 30/40 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ ) ir konstatēts, ka elektriskajā lauka izraisītā biomasas termiskās sadalīšanas procesa intensifikācija (47. att. – A) būtiski ietekmē gaisa pārākuma vērtību plūsmā (49. att. – A). Pēc virpuļplūsmas pamatnes gāzes sastāva IS spektrālās analīzes ir konstatēts, ka elektriskajā laukā ierosinātā biomasas termiskās sadalīšanās intensifikācija izraisa CO<sub>2</sub> koncentrācijas palielināšanos ar korelējošu gaisa padeves pārākuma samazināšanos produktos. Elektriskā lauka iedarbības rezultātā salmu biomasas pašuzturošā degšanas posmā gaisa pārākums samazinās no  $\alpha_{sum} \approx 3$  līdz  $\alpha_{sum} \approx 2,5$  (par  $\approx 17$  %), tādējādi liecinot par uzlaboto biomasas termiskās sadalīšanas produktu sadegšanu. Šādu secinājumu arī apliecina CO<sub>2</sub> koncentrācijas pieaugums liesmas reakcijas zonā vidēji par 37 % (49. att. – B). Kūdras biomasas degšanas procesā, elektriskā lauka ietekmē, gaisa pārākums virpuļplūsmā samazinās no 2,3 līdz 1,8 (par  $\approx 20$  %), un par 36 % pieaug CO<sub>2</sub> koncentrācija liesmas reakcijas zonā (49. att. – D). Savukārt koksnes degšanas eksperimentos ar ārējo elektrisko lauku gaisa pārākums svārstās pie vidējās  $\alpha_{sum} \approx 1,75 \pm 0,15$  vērtības, bet CO<sub>2</sub> koncentrācijas pieaugums reakcijas zonā sasniedz tikai 5 % pie  $E\varphi' > 0$ .

### 3.7. Siltuma pārnese uzlabošanās no liesmas uz kurtuves sienām

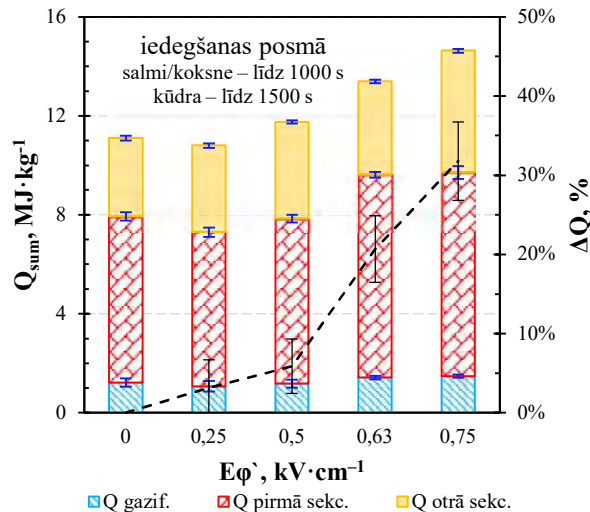
Apkopojot eksperimentālo pētījumu rezultātus (3.2.–3.6. nodaļa) par elektriskā lauka iedarbību uz biomasas termisko sadalīšanos, gaistošo savienojumu veidošanos, to uzliesmošanu un degšanu, ir konstatēts, ka virpuļplūsmas struktūras izmaiņas (43. att.) ārējā elektriskā lauka iedarbības rezultātā veicina degšanas zonas radiālu izplešanos ( $L/D = 1,5$  pie  $r/r_0$  no 0 līdz 0,3), palielinot temperatūras vidējās vērtības, bet samazinot tās maksimālās vērtības (45. att. – B, 46. att. – A). Degšanas zonas radiālā izplešanās (42. att. – B) palielina liesmas temperatūru degšanas zonas ārējā daļā (46. att. – B), ar korelējošu saražotā siltuma pārnese intensifikāciju uz sildvirsmām (44. att. – B). Savukārt liesmas garuma samazināšanās (42. att. – A, 44. att. – A) uzlabo siltuma apmaiņu starp liesmas virpuļplūsmas centrālo daļu un biomasas granulu slāni, aktivizējot biomasas termisko sadalīšanos (47. att.). Elektriskā lauka un liesmas mijiedarbības efekti intensificē degošo komponentu izdalīšanos (49. att. – B, C, D), palielina šo komponentu uzturēšanās ilgumu reakcijas zonā (42. att. – A), aizdegšanos un siltuma izdalīšanos degšanas kamerā, veicinot siltuma pārnese uz degšanas kameras sienām.



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

Atbilstoši biomasas termiskās sadalīšanās procesa izmaiņām (47. att.) un elektriskajā lauka ierosinātai siltuma un masas pārnesei lauka virzienā, kas saistīta ar “jonu vēja” veidošanos (42. att. – B), elektriskā lauka un liesmas mijiedarbības procesā vērojams degšanas zonas vidējās temperatūras (46. att. – A, 46. att. – B), un iekārtas siltuma jaudas pieaugums ar vienlaicīgu saražotās enerģijas daudzuma pieaugumu termiskās sadalīšanās produktu degšanas procesā. Šāda pozitīva elektriskā lauka ietekme ir saistīta arī ar intensīvāku siltuma pārnese procesu veidošanos biomasas degšanas sākuma stadijā, intensificējot gaistošo savienojumu un gaisa virpuļplūsmas sajaukšanos degšanas zonas ārējā daļā, to uzliesmošanu un degšanu. Ja elektriskā lauka intensitāte degšanas zonā sasniedz  $E\varphi = [0,25; 0,5]$   $\text{kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ , salmu un koksnes biomasas degšanas procesā

līdz 1000 s (bet kūdras degšanas procesā līdz 1500 s) ir novērojama holocelulozes termiskās sadalīšanas intensifikācija (47. att.), kura saistīta ar endotermisko efektu ietekmi (2. att.) uz siltuma izdalīšanos degšanas procesa veidošanās sākuma stadijā (50. att. – B). Palielinot elektriskā lauka intensitāti, pārsvaru gūst termiskās sadalīšanās produktu uzliesmošanas un degšanas procesa veidošanās eksotermiskais efekts, izmainot siltuma jaudas kinētiku. Ja  $E\varphi' \geq 0,63 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ , laika posmā līdz 1000 s (kūdrai līdz 1500 s) ir novērojams ātrāks siltuma jaudas vērtību pieaugums (vidēji par 20 %). Pašuzturošā degšanas stadijā, laika posmā no 1000 s līdz  $\approx 2200$  s, elektriskais lauks ietekmē siltuma pārnesi tikai tajos degšanas kameras posmos, kuros ir novērojama liesmas veidošanās (sk. 1.4.1. apakšnodaļā), par ko liecina degšanas kameras pirmās un otrās sekcijas siltuma jaudas pieaugums, kas salmu degšanas procesā sasniedz 10–15 % (50. att. – B, C). Ir jāatzīmē, ka lielāks siltuma jaudas pieaugums (0,2 kW pret 0,1 kW) ir novērojams pirmajā sekcijā, kurā maksimālo vērtību sasniedz jonu strāva un ir novērojama liesmas virpuļplūsmas radiālā paplašināšanās (44. att. – B). Savukārt gazifikātorā siltuma jaudas izmaiņas elektriskā lauka iedarbības rezultātā ir minimālās (50. att. – A), jo gazifikātorā siltuma pārnesi nosaka konduktīvā un IS starojuma siltuma pārnese no pārņemtā biomasas slāņa (31. att. – A). Šāda veida siltuma apmaiņas dominēšana salmu granulu degšanas procesā sākās pēc 1800 s, kad eksperimentālajā iekārtā novēro degšanas procesa pāreju no liesmas degšanas uz ogle virsmas gruzdēšanas procesiem (35. att. – B).



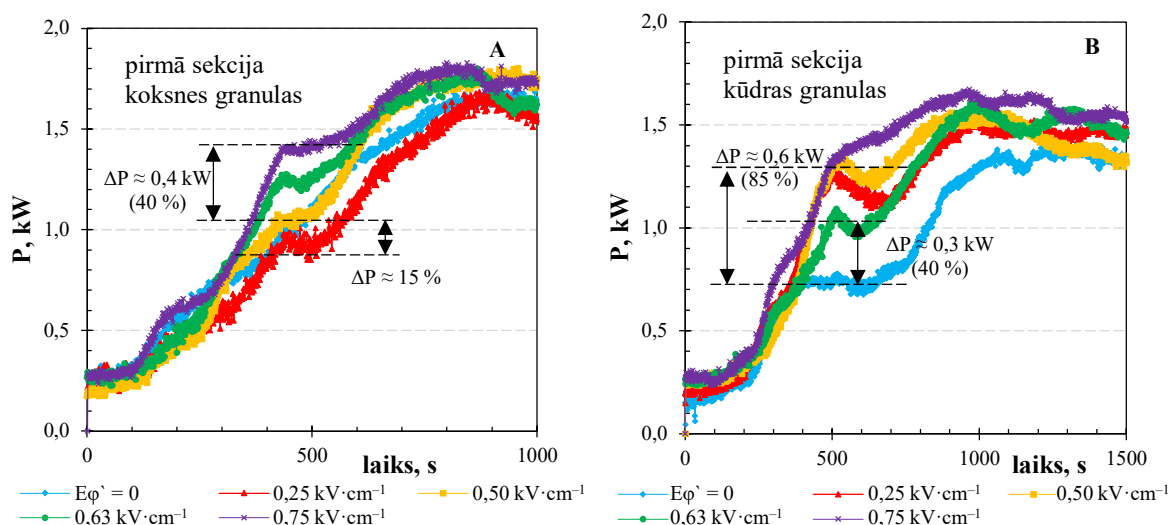
51. att. Saražotā siltuma daudzuma izmaiņas salmu granulētās biomasas degšanas procesa sākuma stadijā ( $t < 1000$  s) atkarībā no pieliktā elektriskā lauka intensitātes.

Ja  $E\varphi' \leq 0,50 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ , endotermisko holocelulozes sadalīšanas procesu intensifikācija elektriskā lauka iedarbības rezultātā vidēji par  $15 \pm 4$  % samazina siltuma jaudas pieaugumu laika posmā  $t < 1000$  s (50. att. – B), un ierobežo saražotā siltuma daudzuma pieaugumu salmu granulu iedegšanas posmā (51. att.). Savukārt, ja ārējā elektriskā lauka intensitāte  $E\varphi' > 0,50 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ , biomasas termiskās sadalīšanas produktu degšanas procesa intensifikācija elektriskā lauka

iedarbības rezultātā (49. att.) palielina saražotā siltuma daudzumu salmu granulu degšanas procesa sākuma stadijā ( $t < 1000$  s) līdz pat  $32 \pm 5$  % (51. att.), intensificējot biomasas granulu sildīšanas, žāvēšanas un primārā termiskās sadalīšanas procesus, kad notiek intensīvā hemicelulozes un celulozes sadalīšanās (30. att. – A).

Arī koksnes un kūdras biomasas granulu termoķīmisko pārvērtību sākuma stadijā ( $t < 1000$  –  $1500$  s) elektriskā lauka iedarbības rezultātā novērojams siltuma jaudas izmaiņas. Koksnes biomasas degšanas attīstīšanas posmā holocelulozes termiskās sadalīšanās endotermiskie efekti, kuri tiek intensificēti elektriskā lauka efektu iedarbības rezultātā, samazina siltuma jaudas pieaugumu vidēji par  $\approx 15$  %, ja  $E\varphi' \leq 0,50 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$  (52. att. – A). Savukārt, palielinot elektriskā lauka intensitāti ( $E\varphi' \geq 0,63 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ ), ir novērojams siltuma jaudas pieaugums vidēji par 40 %.

Kūdras biomasas degšanas procesa sākuma stadijā (līdz  $1500$  s) ir novērojams siltuma jaudas pieaugums 40–85 % robežās (52. att. – B) pie visām pētījumos izmantotām elektriskā lauka intensitātēm, kas liek secināt, ka endotermisko un eksotermisko efektu līdzsvara nobīdi, kūdras granulu termoķīmisko pārvērtību procesā, izraisa atšķirīgais biomasas oglehidrātu saturs (2. un 12. tab.), kas nosaka kopējo gaistošo vielu daudzumu (4. un 13. tab.) un biomasas liesmas garumu (sk. 3.2. nodaļā).

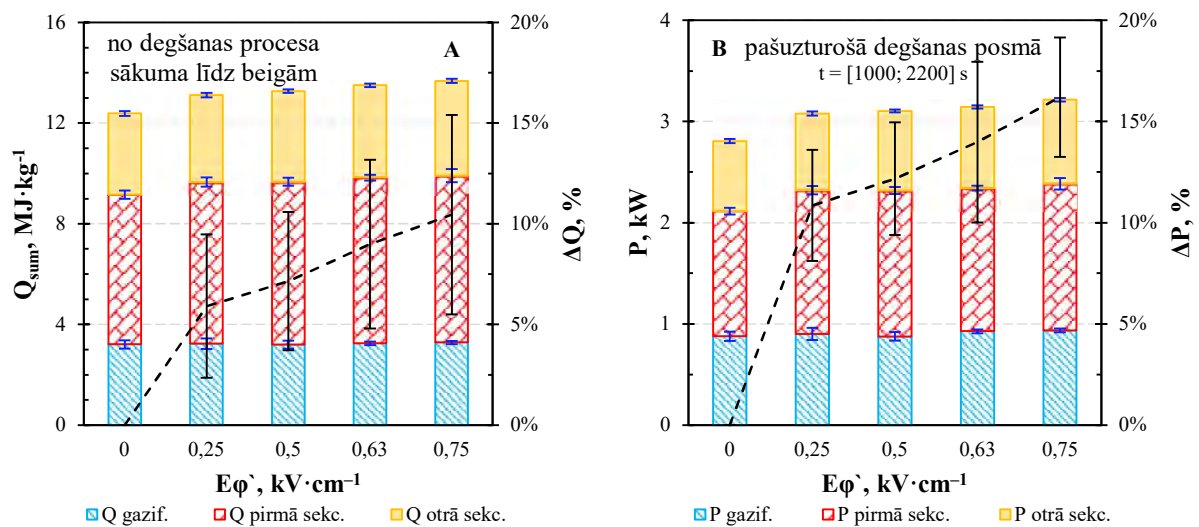


52. att. Koksnes (A) un kūdras (B) degšanas siltuma jaudas kinētika degšanas procesa veidošanās sākuma stadijā atkarībā no pieliktā elektriskā lauka intensitātes.

Kūdras biomasas gaistošo vielu daudzums ir mazāks, un to izdalīšanas ātrums ir daudz lēnāks, salīdzinot ar attiecīgo parametru vērtībām (30., 13. tab.) salmu un koksnes biomasām. Līdz ar to samazinās liesmas garums, bet palielinās temperatūras gradients starp liesmas reakcijas zonu un degmaisījuma samaisīšanas zonu, paātrinot siltuma pārneši uz kūdras biomasas granulu slāni (33. form.). Elektriskajā laukā izraisītās virpuļplūsmas aksiālā ātruma samazināšanās (42. att. – A) izraisa liesmas garuma samazināšanos (44. att. – A) un palielina gaistošo vielu uzturēšanās ilgumu degšanas zonā (49. att. – D). Tas, savukārt, palielina degšanas zonas temperatūru un uzlabo siltuma apmaiņu starp liesmas virpuļplūsmas reakcijas zonu un kūdras granulu slāņa virskārtu, samazinot

endotermisko efektu iedarbību uz gaistošo savienojumu degšanas procesa veidošanos pie zemākajām elektriskā lauka intensitātēm ( $E\varphi \leq 0,50 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ ).

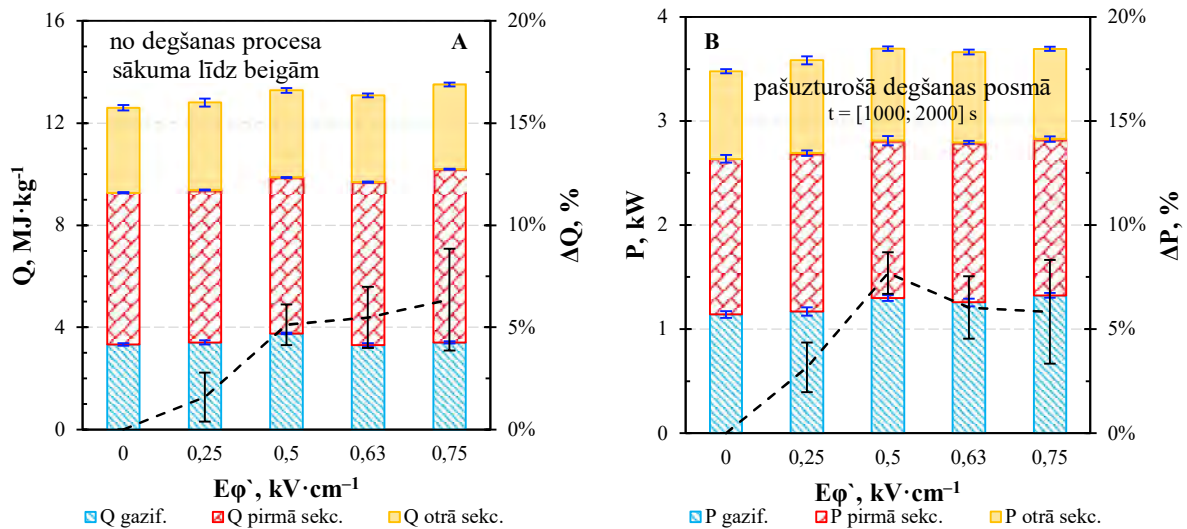
“Jonu vēja” ierosinātā siltuma un masas pārnese elektriskā spēka darbības virzienā uzlabo arī konvektīvo siltuma pārnese, palielinot iekārtas siltuma jaudu biomasas granulu pašuzturošā degšanas posmā un kopējo saražotā siltuma daudzumu degšanas kameras sekcijās. Salmu biomasas degšanas procesā elektriskā lauka iedarbības rezultātā tika novērots kopējā saražotā siltuma daudzuma pieaugums no 6 % līdz 10 % ar vidējo rezultātu novirzi līdz  $\pm 4$  % (53. att. – A). Turklāt eksperimentālās iekārtas siltuma jaudas pieaugums salmu biomasas degšanā elektriskajā laukā sasniedza no 11 % līdz 16 % ar novirzi  $\pm 4$  % (53. att. – B).



53. att. Iekārtas kopējā saražotā siltuma un jaudas izmaiņas atkarībā no pieliktā elektriskā lauka intensitātes salmu biomasas dažādās degšanas attīstības stadijās.

Ņemot vērā eksperimentālos pētījumos izmantoto siltuma jaudas mērīšanas metodiku (sk. 2.2.10. apakšnodaļā), var secināt ka vidējo rezultātu novirzi siltuma jaudas mērījumos visvairāk ietekmē termosensoru kalibrēšanas kļūda (3 %). Ir jāatzīmē, ka siltuma jaudas mērījumiem pie katra elektroda potenciāla vērtības eksperiments tika atkārtots vismaz piecas reizes, kontrolējot eksperimentu precizitāti un atkārtojamību pēc vairākiem parametriem: temperatūras, siltuma, gaisa pārsvara un dūmgāzu emisiju sastāva mērījumiem (sk. 2.2. nodaļā). Siltuma jaudas mērījumus ietekmē arī liesmas reakcijas zonas novietojums degšanas kamerā, kuru nosaka biomasas granulu slāņa augstuma izmaiņas termolīmisko pārvērtību procesā (31. att. – A), izraisot siltuma jaudas pakāpenisku samazināšanos (50. att. – B). Salmu degšanas procesā stipri mainās liesmas veidošanās kinētika (sk. 3.2. nodaļā), un šādu izmaiņu rezultātā stipri pieaug ar elektisko lauku izraisīto efektu rezultātu izkliede (39. att. – B), t.s. paaugstinot vidējās siltuma jaudas un kopējā saražotā siltuma vērtības kļūdu starp dažādiem eksperimentiem. Kaut gan elektroda aksiālā kustība bija īslaicīga, ik pēc 200–300 s, tomēr šāda kustība var izraisīt degšanas procesa izmaiņas,

ietekmējot kopējā siltuma daudzumu, un palielinot iekārtas vidējās siltuma jaudas vērtību izkliedi dažādiem eksperimentiem.

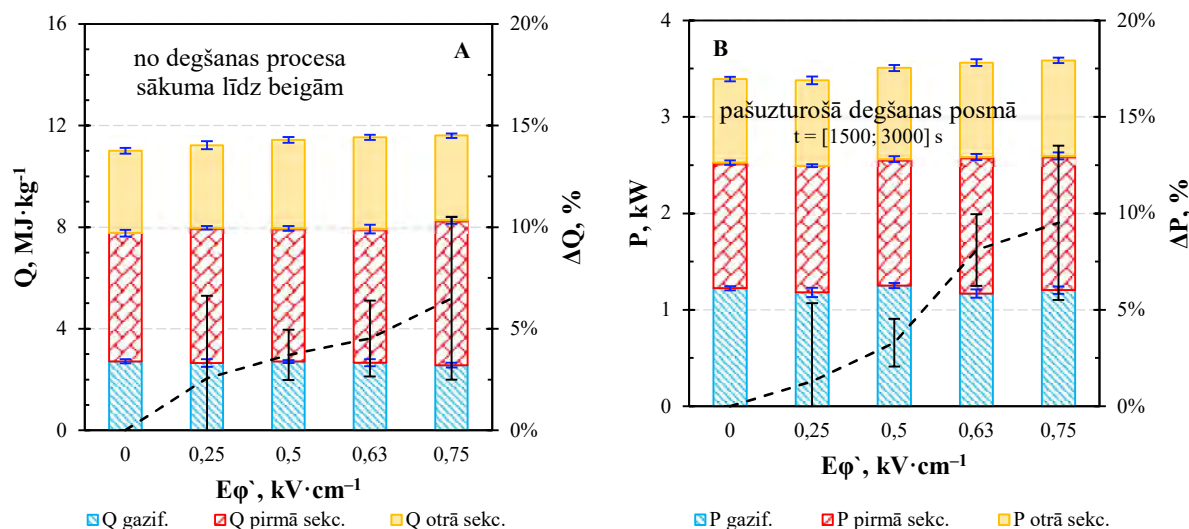


54. att. Kopējā saražotā siltuma un iekārtas siltuma jaudas izmaiņas koksnes biomasas degšanas procesā atkarībā no pieliktā elektriskā lauka intensitātes.

Ja elektriskā lauka intensitāte pārsniedz  $0,5 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ , kopējais saražotais siltuma daudzums koksnes biomasas degšanas procesā elektriskā lauka iedarbības rezultātā pieaug par 5–6 % ar vidējo rezultātu novirzi līdz  $\pm 2 \%$  (54. att. – A), turklāt saražotā siltuma daudzuma pieaugums atbilst  $\approx 5 \%$   $\text{CO}_2$  koncentrācijas pieaugumam liesmas reakcijas zonā. Tostarp iekārtas vidējais siltuma jaudas pieaugums pašuzturošā procesā ir 6–8 % ar vidējo novirzi  $\pm 2 \%$  (54. att. – B). Maksimālā rezultātu novirze no vidējās vērtības ir  $\pm 5 \%$  pie  $E\varphi \approx 0,75 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Labāka elektriskā lauka efekta atkārtojamība uz koksnes granulu degšanas procesa uzlabošanu ir konstatēta eksperimentālā iekārtā ar jaudu līdz 1,5 kW [239], kurai pie vienāda biomasas slāņa augstuma tā virsmas laukums ir par 30 % mazāks un koksnes degšanas process attīstās lēnāk, ar mazāku siltuma daudzuma izdalīšanu. Ievērojot koksnes biomasas degšanas liesmas garumu (sk. 3.2. nodaļā), biomasas slāņa augstuma izmaiņas, eksperimenta laikā, mazāk ietekmē siltuma atdeves procesu dzesējamām degšanas kameras sienām, bet to stipri ietekmē degšanas kameras dzesētās sienas laukums. Lai uzlabotu koksnes granulu degšanas procesa siltuma noņemšanu no degšanas zonas, eksperimentos ar pielikto elektrisko lauku, ir nepieciešams palielināt degšanas kameras un elektroda garumu.

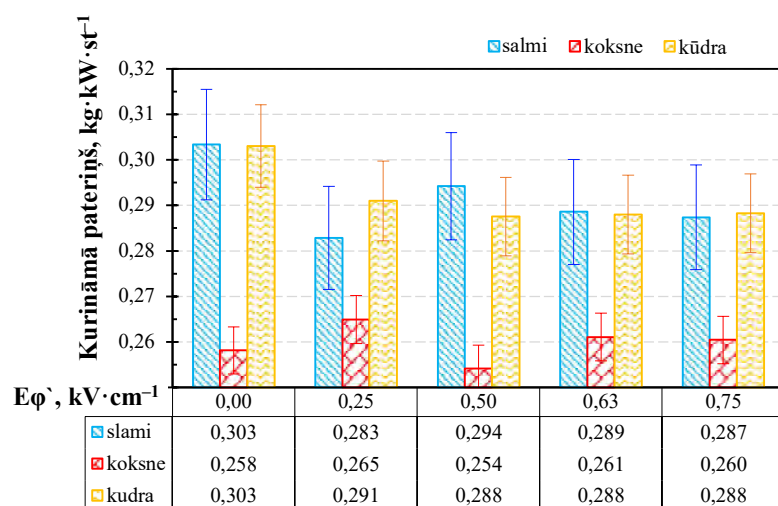
Fotoattēlos liesmas garuma izmaiņas elektriskajā laukā, kūdras granulu termokīmisko pārvērtību procesā, praktiski nav novērojamas, jo kūdras liesmas garums jau pie  $E\varphi = 0$  ir stipri mazāks, salīdzinot ar liesmas garumu salmu un koksnes biomasas degšanas procesā. Nelielā liesmas garuma dēļ, kūdras granulu degšanas procesā, iekārtas siltuma jaudas izmaiņas var novērot tikai degšanas kameras pirmajā sekcijā un nedaudz arī gazifikatorā. Respektīvi, kūdras biomasas

degšanas procesu pētījumos ir novērojams saražota kopējā siltuma palielinājums elektriskā lauka iedarbības rezultātā par 3–6 % ar vidējo vērtību novirzi  $\pm 3$  % (55. att. – A).



55. att. Kopējā saražotā siltuma daudzuma un iekārtas vidējās siltuma jaudas izmaiņas atkarībā no pieliktā elektriskā lauka intensitātes kūdras biomasas degšanas procesā.

Tomēr iekārtas vidējās siltuma jaudas palielinājums ir konstatēts tikai pie  $E\varphi' > 0,5 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ , sasniedzot 8–10 % ar  $\pm 3$  % novirzi (55. att. – B). Ievērojot siltuma parametru izmaiņu vērtību novirzes, var secināt, ka elektriskā lauka efekts uz iekārtas siltuma jaudu ir stabils tikai pie augstākām elektriskā lauka intensitātēm.



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

Vienlaicīgi ar iekārtas siltuma ražības pieaugumu, ārējā elektriskā lauka un liesmas mijiedarbības procesā ir konstatēta salmu un kūdras degvielas patēriņa samazināšanās uz siltuma jaudas vienību ( $dV_{\text{kurin.}} \cdot dP_{\text{vid.}}^{-1}$ ) par 5 % (56. att.), nodrošinot izdevīgāku siltuma enerģijas

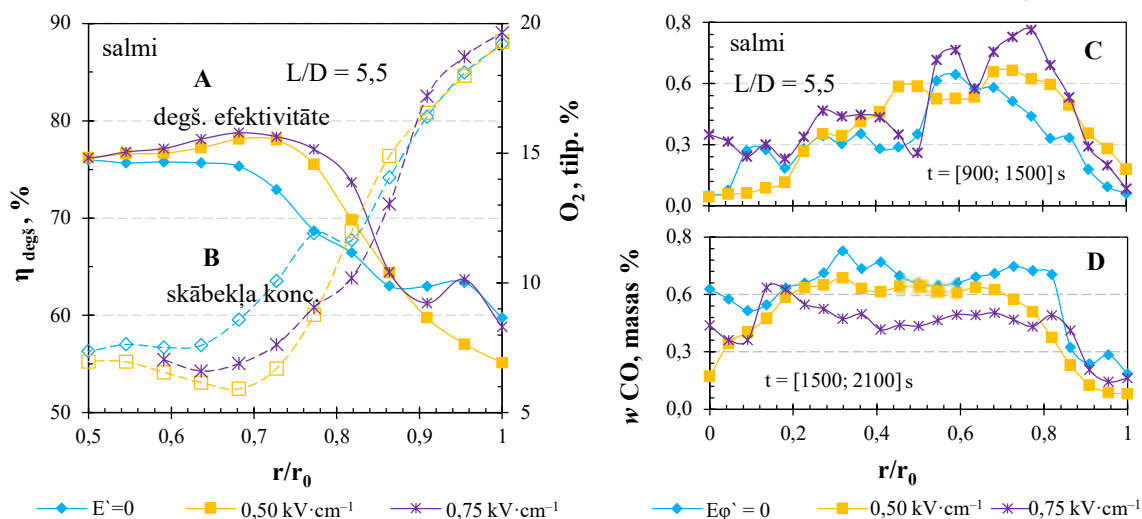


ražošanas procesu. Līdzīgā kurināmā patēriņa ekonomija ir novērota arī *Purmalis et al.* rūpnieciskajos dabas gāzes degšanas procesa pētījumos [256], veicot degšanas procesu elektrodinamisko kontroli centralizētās siltumapgādes DKVR-10-13 katlam ar jaudu 3–4 MW. Tomēr procesa neviendabības dēļ, siltuma pieauguma kļūda šajos pētījumos ir relatīvi augsta, lai veiktu precīzus secinājumus par kurināmā ekonomiju, izmantojot elektriskā lauka un liesmas mijiedarbības efektus. Kurināmā ekonomija nav novērojama koksnes biomasas degšanas eksperimentos ar elektrisko lauku, jo degvielas patēriņa izmaiņas uz siltuma jaudas vienību vērojamas vidēji 1 % robežās.

Respektīvi, eksperimentālo pētījumu rezultāti ļauj secināt, ka koksnes degšanas procesā siltuma apmaiņa starp liesmas virpuļplūsmu un dzesējamām kameras sienām notiek neefektīvi. Turklāt biomasas termiskās sadalīšanas intensifikācija, elektriskajā laukā, veido vairāk gaistošo savienojumu, īpaši CO, kas, relatīvi augstās aktivācijas enerģijas dēļ, liesmas garumā nepaspēj pilnībā izraģēt un saražot siltumu, samazinot elektriskā lauka pozitīvo efektu uz iekārtas siltuma jaudu, kā arī izraisot negatīvo efektu uz degšanas procesa emisiju sastāvu.

### 3.8. Dūmgāzes emisiju veidošanās biomasas degšanā ar elektrisko lauku

Elektriskajā lauka ierosinātās liesmas virpuļplūsmas reakcijas zonas raksturojošo parametru izmaiņas nosaka arī dūmgāzes sastāva un degšanas procesa efektivitātes izmaiņas, kuru kinētika, kā arī aksiālā un radiālā sadalījuma izmaiņas ir cieši saistītas ar elektriskajā laukā ierosināto granulētās biomasas termisko sadalīšanos (47. att.), gaistošo vielu veidošanās intensifikāciju (49. att.), šo vielu uzliesmošanu un degšanas zonas struktūras izmaiņām (44. att.).

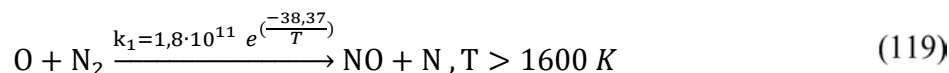


57. att. Gaistošo savienojumu degšanas procesa efektivitātes (A); skābekļa (B) un oglekļa monoksīda (C, D) koncentrācijas radiālā sadalījuma izmaiņas elektriskajā laukā.

Liesmas virpuļplūsmas reakcijas zonas paplašināšanos (44. att.), elektriskā lauka ietekmē, izraisa ne tikai temperatūras profila (46. att. – B), bet arī skābekļa koncentrācijas un degšanas

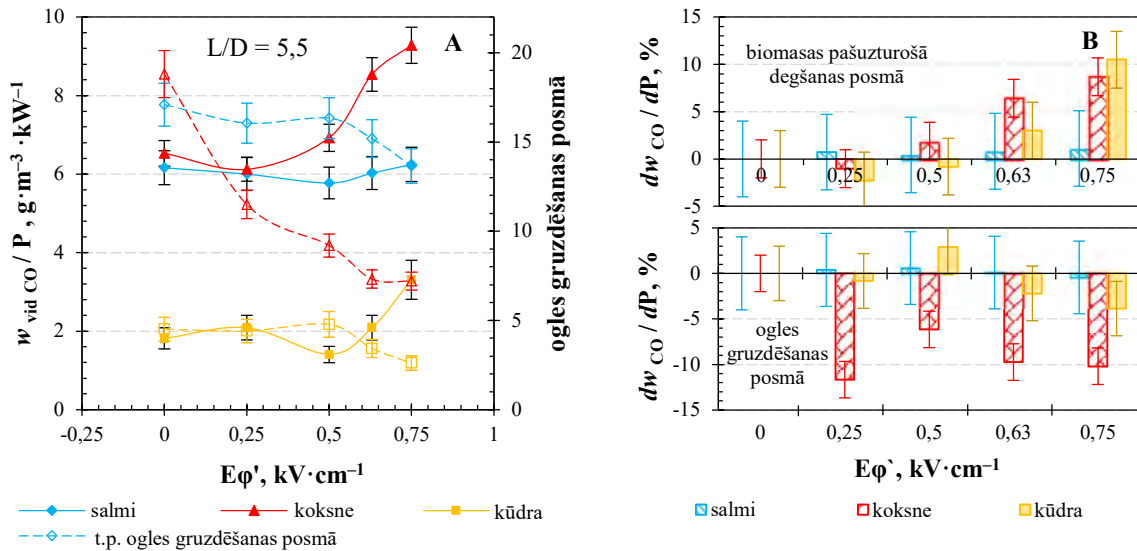
procesu efektivitātes radiālā sadalījuma nobīdi pie  $r/r_0 = [0,6; 0,85]$  ar sekojošu degšanas procesu efektivitātes pieaugumu un skābekļa koncentrācijas samazināšanos vidēji par 4–10 % (57. att. – A), ko nosaka degšanas procesa intensifikācija liesmas perifērijā. Tomēr degšanas procesa uzlabošanās elektriskā lauka un liesmas mijiedarbības procesā nav pietiekama, lai kompensētu salmu un koksnes biomasu termiskās sadalīšanas intensifikācijas efektu. Holocelulozes termiskās sadalīšanas intensifikācijas dēļ (47. att. – B, C) pašuzturošā degšanas posmā līdz 1500 s ir konstatēts neliels CO koncentrācijas pieaugums (57. att. – C) degšanas kamerā pie  $L/D = 5,5$ , īpaši plūsmas perifērijā pie  $r/r_0 = [0,5; 0,8]$ . Tomēr posmā pēc 1500 s, kad ir novērojama degšanas kinētikas pāreja uz virsmas reakciju dominējošiem procesiem, CO koncentrācijas radiāla sadalījuma izmaiņas (57. att. – D) ļauj secināt par uzlabotiem degšanas apstākļiem šajā posmā, jo, pieaugot elektriskā lauka intensitātei, novēro CO koncentrācijas samazināšanos par 20–45 %.

Intensificējot endotermiskos biomasas holocelulozes sadalīšanās procesus (47. att. – B) elektriskā lauka iedarbībā, tiek palielināta gaistošo vielu koncentrācija gazifikatora izejā pie  $L/D = 0,6$  (49. att. – B, C), vienlaikus ierobežojot degmaisījuma vidējās temperatūras pieaugumu (45. att. – B). Savukārt degšanas procesa attīstīšanās strauji samazina gaistošo vielu koncentrāciju (49. att. – D), un izraisa vidējās temperatūras palielināšanos degšanas zonā pie  $L/D = 1,5$  (45. att. – B). Šo konkurējošo procesu līdzsvara nobīde nosaka dažādu emisiju koncentrācijas izmaiņas liesmas virpuļplūsmā. No vienas puses CO oksidēšanas reakcijai ar OH radikāliem ir nepieciešama temperatūra, kas ir augstāka par 1000 K (6. tab.), bet no otras – pie augstām temperatūrām intensificējās slāpekļa oksīdu ( $\text{NO}_x$ ) veidošanās pēc Zeldoviča mehānisma [122], [257], kuru nosaka divpakāpju reakciju ierosināšana un ierobežo atomārā skābekļa veidošanās liesmā:



Pēc 58. attēla (A) grafika ir redzams, ka ārējā elektriskā lauka izmantošana biomasas degšanas procesos negatīvi ietekmē CO emisiju veidošanās pašuzturošā degšanas posmā un pozitīvi – ogleis gruzdēšanas posmā. Lai visiem eksperimentiem nodrošinātu nemainīgu virpuļplūsmas dinamiku, gaisa padeves režīms eksperimentos ar dažādām biomasām bija vienāds (sk. 2.1.2. apakšnodaļā). Tomēr gaisa padeve bija vairāk pielāgota salmu pašuzturošā procesa nodrošināšanai, specifiskā ogleis slāņa veidošanās dēļ (sk. 3.2. nodaļā). Minēto iemeslu dēļ, kūdras un koksnes degšanas procesi, elektriskajā laukā, bija izteikti jūtīgi pret gaisa pārākuma izmaiņām liesmas reakcijas zonā (49. att. – A). Līdz ar to CO emisiju pieaugums salmu biomasas pašuzturošā degšanas posmā (par  $\approx 20$  %) atkarībā no elektriskā lauka intensitātes ir mazāks par CO emisiju pieaugumu koksnes ( $\approx 35$  %) un kūdras ( $\approx 70$  %) pašuzturošā degšanas procesā. Paaugstināto CO emisiju veidošanās koksnes biomasas pašuzturošā degšanas posmā izskaidro ar lielāku gaistošo vielu saturu biomasā (4. un 12. tab.) un īpašo hemicelulozes struktūru (3. pielik. 2. att.), kas savukārt nosaka ātrāku gaistošo vielu veidošanās un aizplūdi no liesmas reakcijas zonas. Salmu biomasai palielinātais CO emisiju daudzums ir saistīts ar aglomerēto pelnu virskārtas veidošanās uz granulu virsmas, kas samazina skābekļa piekļuvi granulām. Kaut gan gaistošo vielu spektrālo mērījumu rezultāti liesmas reakcijas zonā ( $L/D = 0,6$ ) ļauj secināt par uzlabotu CO

konversiju (49. att. – D), mērījumu rezultāti, kas iegūti ar gāzes analizatoru pie  $L/D = 5,5$ , liecina par CO emisiju pieaugumu elektriskajā laukā.



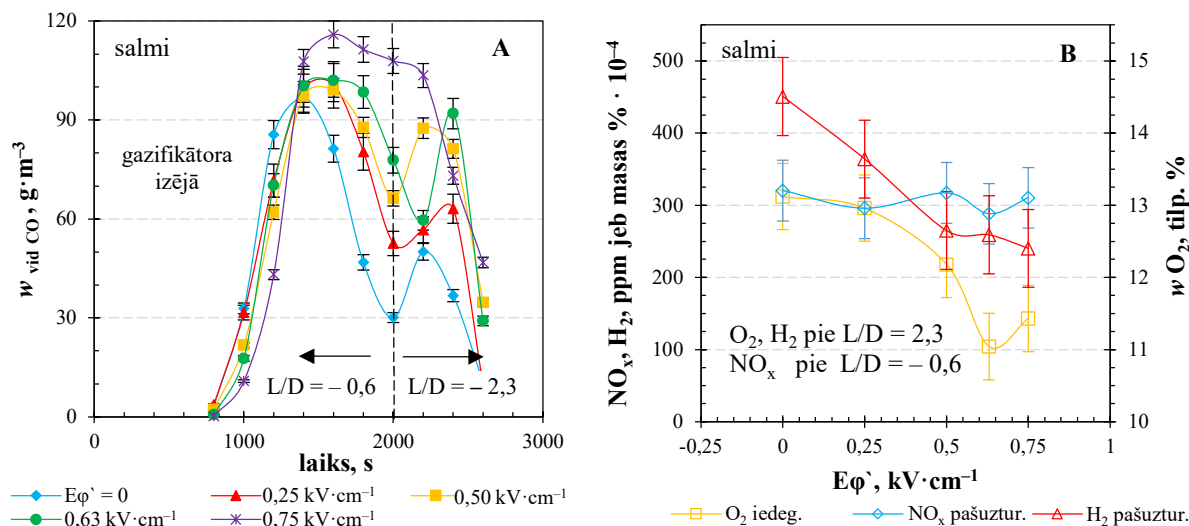
58. att. Elektriskā lauka un liesmas mijiedarbības procesu izraisītās CO emisiju vidējās (A) un relatīvās (B, C) izmaiņas dažādu biomasu degšanas un ogles gruzdēšanas posmā.

Iegūtie rezultāti nav pretrunīgi, jo liesmas sastāva spektrālie mērījumi tika veikti tikai reakcijas zonas centrālajā daļā, bet gāzes analizatora mērījumi nosaka emisiju sastāvu pie  $L/D > 2$ , kur CO emisiju izmaiņas ietekmē aksiālās plūsmas sajaukšanās ar gaisa virpuļplūsmu (sk. 2.1.2. apakšnodaļā).

Salīdzinot vidējo relatīvo CO emisiju pieaugumu ar vidējo iekārtas siltuma jaudas pieaugumu (58. att. – B), ir konstatēts, ka elektriskajā laukā izraisītais CO emisiju pieaugums salmu biomasas degšanas procesā atbilst iekārtas siltuma jaudas izmaiņām, bet koksnes un kūdras eksperimentos relatīvais CO emisiju pieaugums pie  $E\varphi' > 0,63$  kV·cm<sup>-1</sup> ir lielāks un sasniedz 5–10 %. Līdz ar to CO emisiju samazināšanai ir nepieciešams veikt koksnes un kūdras biomasas degšanas procesu optimizāciju, koriģējot gaisa padevi iekārtā.

Biomasas degšanas procesa ātruma izmaiņas ietekmē arī gruzdēšanas posma ilguma samazināšanos ar atbilstošu emisiju daudzumu samazināšanos šajā posmā (58. att. – A). Pret šādām izmaiņām īpaši jūtīgi ir koksnes un kūdras degšanas procesi, kuriem relatīvās CO emisiju veidošanās ogles gruzdēšanas posmā samazinās aptuveni par 60 %. Dažādām biomasām CO emisiju samazināšanās gruzdēšanas posmā ir svarīgāka par CO emisiju paaugstināšanos stacionārā degšanas stadijā, jo gruzdēšanas posmā veidotais CO emisiju daudzums ir krietni lielāks (36. att.). Pēc relatīvām CO emisiju daudzuma izmaiņām (58. att. – C) pārģoloto koksnes granulu gruzdēšanas posmā ir konstatēts CO emisiju samazinājums no 5 % līdz 10 %, kurš tomēr varētu būt saistīts arī ar vispārējo biomasas sadalīšanas ātruma pieaugumu un degšanas ilguma samazināšanos. Kūdras degšanas procesos CO emisiju samazinājums gruzdēšanas posmā ir īpaši

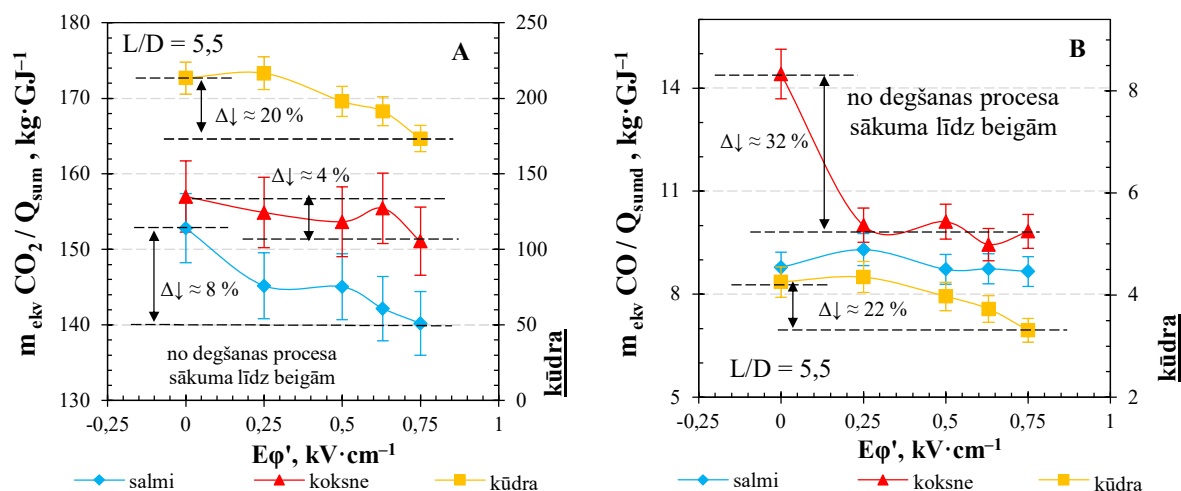
svarīgs, jo pāroglotās kūdras gruzdēšanas posms var sasniegt līdz pat 30 % no kopējā degšanas procesa ilguma (31. att.).



59. att. CO veidošanās kinētikas izmaiņas gazifikatora izejā (A); O<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, H<sub>2</sub> (B) vidējā daudzuma izmaiņas degšanas kamerā ar elektrisko lauku.

Lai izprastu mazās intensitātes elektriskā lauka efektu uz CO emisiju veidošanos dažādas izcelsmes biomasu degšanas procesos, ir nepieciešams aplūkot to veidošanas kinētiku dažādos laika posmos. Biomasas gazifikācijas CO produkta koncentrācijas palielināšanās biomasas termiskās sadalīšanas intensifikācijas dēļ ir novērojama gazifikatora izejā pie  $L/D = -0,6$ . Aplūkojot CO veidošanās kinētikas līknes (salmu degšanas eksperimentos) 59. attēlā (A), laika intervālā no 1200 s līdz 1800 s var konstatēt divkārtoto CO koncentrācijas vērtību pieaugumu. Šeit ir nepieciešams atzīmēt, ka gazifikācijas produktu sastāva mērījumi pie  $L/D = -0,6$  aizkavējās vidēji par 600–800 s, ko nosaka granulu slāņa augstuma izmaiņas līdz diagnostikas atverei. Līdz 2000 s, kad biomasas slānis sasniedz  $L/D = -2,3$  CO vērtības līdz gazifikatora izejai praktiski nemainās, jo ogles gruzdēšanas posmā CO konversija stipri palēninās (ievērojot 6. tab, 31. att. – B un 36. att. – B datus). Tāpēc pieņem, kā CO emisiju vērtības pie granulu virsmas praktiski atbilst mērījumiem, kas veikti attālumā  $L/D = -0,6$ .

Intensīvāks CO koncentrācijas pieaugums ir novērojams pāroglotās biomasas termokīmisko pārvērtību posmā ( $t = 2000\text{--}2600 \text{ s}$ ), kad beidzās termiskās sadalīšanas produktu liesmveida degšana un degšanas procesa veidošanos nosaka reakcijas, kas veidojas uz pārogloto granulu virsmas. Pāroglotās biomasas termiskās sadalīšanas intensifikācija, palielinot ārējā elektriskā lauka intensitāti, izraisa CO veidošanās kinētikas izmaiņas un maksimālo vērtību pieaugumu, līdz ar to gruzdēšanas posms uz CO kinētikas grafika vairs nav īpaši izteikts (59. att. – A). Šī posma ātruma izmaiņas ir saistītas ar uzlaboto siltuma apmaiņu un oksidētāja difūziju pie pārogloto granulu virsmas atbilstoši cietās fāzes degšanas kontrakcijas modelim (7. att.), kas izraisa heterociklisko aromātisko savienojumu (3. pielik. 4. att. – A) termiskās konversijas paātrināšanos un raksturojās ar uzlaboto siltuma izdalīšanos degšanas procesa beigu stadijā [13], [56].



60. att. Degšanas procesā veidoto CO<sub>2</sub> (A) un CO (B) emisiju relatīvā daudzuma izmaiņas.

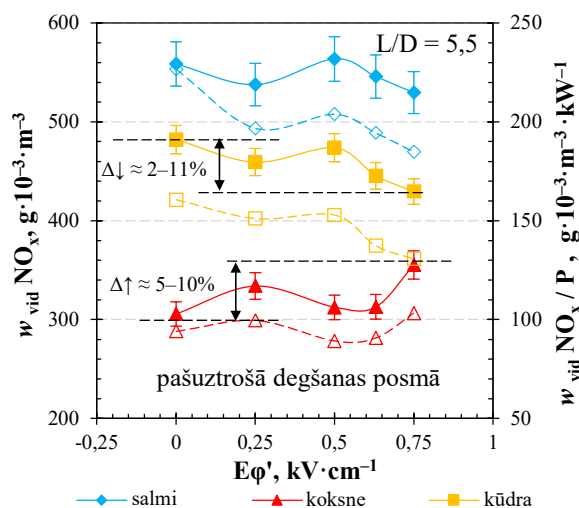
Kopsavilkumā, holocelulozes termiskās sadalīšanas procesa intensifikācija (47. att.) kopā ar uzlaboto gaistošo vielu veidošanos (49. att.) nosaka gaisa skābekļa koncentrācijas samazināšanos biomasas degšanas procesa veidošanās posmā (59. att. – B). Savukārt liesmas virpuļplūsmas vidējas temperatūras pieaugumu reakcijas zonā pie  $L/D = 1,5$  (45. att. – B) nosaka gaistošo savienojumu uzliesmošanas intensifikācija, secinot pēc H<sub>2</sub> (59. att. – B) koncentrācijas samazināšanās liesmas kodolā pašuzturošā degšanas posmā. Ūdeņraža degšanas procesā veidotie OH radikāļi (5. tab.) paātrina CO oksidēšanas reakciju kinētiku (6. tab.) un sekmē CO<sub>2</sub> veidošanos reakcijas zonā (49. att. – B, C, D).

Elektriskajā laukā izraisīto virpuļplūsmas struktūras izmaiņu, ka arī siltuma ražošanas un siltuma apmaiņas procesu izmaiņu rezultātā, novēro siltumnīcefekta izraisošo CO<sub>2</sub> emisiju relatīvā (12. form.) daudzuma samazināšanos attiecībā pret kopējo saražoto siltumu visā degšanas procesā (60. att. – A), kas viennozīmīgi saistītas ar biomasas termiskās sadalīšanas produktu (t.s. CO) uzlaboto termo-kīmisko konversiju elektriskajā laukā (60. att. – B).

$$m_{CO_2_{ekv}} / Q_{summarais} = \frac{\sum_{end}^0 m_{CO_2,TESTO} / m_{granulu\ porcija}}{\sum_{beigas}^0 P_{eksp. iekarta}}, \quad (120)$$

Pēc koksnes emisiju sastāva izmaiņām redzams, ka CO<sub>2</sub> emisiju relatīvo daudzuma vērtību kritums ir mazāks (uz 4 %) par attiecīgo CO vērtību kritumu (uz 32 %). CO emisiju relatīvā daudzuma samazināšanas efekts (par 22 %), elektriskajā laukā, novērojams arī kūdras biomasas degšanas procesā, ko nosaka uzlabotais gruzdēšanas process. Turklāt visā eksperimentā saražoto CO<sub>2</sub> emisiju relatīvais daudzums, kūdras degšanas eksperimentos, ar elektrisko lauku samazinājās vidēji par ≈ 20 %. Savukārt, salmu biomasas 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, (sk. 1.1.1. un 3.2. nodaļā). Tomēr, pateicoties intensificētam salmu granulu termiskās sadalīšanas un gaistošo vielu degšanas procesam, kā arī uzlabotiem siltuma ražošanas un apmaiņas procesiem, visā eksperimentā saražoto

CO<sub>2</sub> emisiju relatīvais daudzums pret saražotās siltuma enerģijas vienību samazinās par 8 % (pie  $E\varphi = 0,75 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ ).



61. att. Slāpekļa oksīdu koncentrācijas izmaiņas dūmgāzēs dažādu biomasu degšanas procesā ar ārējo elektrisko lauku.

Izvērtējot 3.5. un 3.6. nodaļās aprakstītos elektriskā lauka ietekmes efektus uz biomasas termiskās sadalīšanas ātrumu un liesmas virpuļplūsmas vidējām temperatūrām, ir sagaidāmas arī NO<sub>x</sub> emisiju izmaiņas degšanas produktos, kuru veidošanos nosaka termiski-jūtīgais Zeldoviča mehānisms (119. form.). Kaut gan stipri izteiktu NO<sub>x</sub> koncentrācijas izmaiņas, kas saistītas ar biomasas slāpekļa saturošo savienojumu izdalīšanās un oksidēšanās intensifikāciju [257] gazifikatora izejā, nav novērotas (59. att. – B), salmu un kūdras degšanas produktu sastāva mērījumi pie  $L/D = 5,5$  ļauj secināt, ka elektriskā lauka iedarbības rezultātā kopējais NO<sub>x</sub> saturs izplūdes gāzēs samazinās: salmiem par 4–5 % un kūdrai par 2–11 % (61. att.), ko nosaka degšanas zonas temperatūras maksimālu vērtību samazināšanās (46. att. – A) liesmas centrā (46. att. – B). NO<sub>x</sub> relatīvās koncentrācijas izmaiņas, ņemot vērā iekārtas siltuma jaudas izmaiņas, uzrāda izteiktu kopējā procesa uzlabošanas elektriskā lauka un liesmas mijiedarbības procesā, sasniedzot NO<sub>x</sub> relatīvo emisiju samazinājumu pret iekārtas jaudas vienību līdz 18%, ko novēro gan salmu, gan arī kūdras biomasas degšanas eksperimentos. 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, izraisot NO<sub>x</sub> koncentrācijas pieaugumu dūmgāzēs par 10 %. Slāpekļa oksīdu veidošanās intensīvāk attīstās koksnes degšanas procesos, ko nosaka relatīvi karstākas un garākas liesmas veidošanās (sk. 3.2. nodaļa un 31. att. – B), uzlabojot termiski jutīgā NO<sub>x</sub> veidošanos pēc Zeldoviča mehānisma (119. form).

## 4. JAUNĀS TEHNOLOĢIJAS PROTOTIPA APROBĀCIJA UN NOVERTĒJUMS AR RŪPNIECISKO GRANULU DEGLI

Promocijas darba ietvaros ir veikta arī granulētās koksnes biomasas degšanas procesu elektrodinamiskās kontroles tehnoloģijas pārnese no 4 kW jaudas eksperimentālās iekārtas uz rūpnieciskā prototipa iekārtu ar iebūvētā komerciālā degļa nominālo jaudu 20 kW. Prototipa katlu iekārtas apraksts ir dots 2.3. nodaļā. Lai paveiktu tehnoloģiskās iekārtas aprobāciju, tika veikti pieci granulētās koksnes biomasas degšanas eksperimenti pie katra elektroda potenciāla (14. tab.).

Elektrods tika uzstādīts aksiāli horizontālās kameras centrā 240 mm attālumā no degļa izejas, kā uzrādīts 29. attēlā. Elektroda efektīvais garums, virzienā uz degļa izeju, ir 60 mm. Šāda garuma elektrods bija ievietots liesmas zonā  $X/D = [0,27; 0,36]$ , kurā bija konstatēta intensīva jonu veidošanās. Ievērojot intensīvās jonu veidošanās zonas izvietojuma eksperimentālajā iekārtā  $L/D = [-0,35; +0,2]$ , uzskata biomasas granulu slāņa virsmu par atskaites punktu un pārrēķina elektroda garumu tehnoloģiskā prototipa iekārtā  $L/D = [0; 0,54]$ , lai to varētu salīdzināt ar elektroda pozīciju eksperimentālajā iekārtā. Secināms, ka elektroda garums, atbilstoši iekārtas mērogam, ir īsāks par līdzīgo eksperimentālajā iekārtā. Tomēr tuvākā elektroda izvietojuma biomasas slānim un garāka elektroda izvēle bija ierobežota ar iespējamās dzirksteļizlādes veidošanās starp elektrodu pārogloto biomasas granulu virsmu.

Elektroda potenciāls attiecībā pret kanāla sienām tika mainīts robežās no +0,6 līdz +1,8 kV, bet maksimālais strāvas lielums dažādās gaistošo savienojumu degšanas procesa attīstības stadijās mainījās robežās no  $\approx 2,1$  līdz  $\approx 7,2$  mA. Ņemot vērā elektriskā lauka sadalījuma veidošanos, pie dotās elektroda konfigurācijas, un potenciāla sadalījumu 4 kW iekārtā (22. att., 7. tab.), ir paredzēts, ka rūpnieciskā prototipa iekārtā elektriskā lauka sadalījums būs līdzīgs. Rezultātu grafiskai attēlošanai ir izmantots elektroda potenciāla pozitīvās vērtības ( $U\phi_+$ ), jo rūpnieciskā prototipa iekārtā netika veikti elektriskā lauka sadalījuma mērījumi.

Granulētās koksnes biomasas degšana tehnoloģiskā prototipa iekārtā veidojās, kā divpakāpju process ar izteiktu primāro kurināmā iedegšanās procesu (200–500 s), kad tiek ierosināta biomasas termiskās sadalīšanās, termiskās sadalīšanās produktu intensīva veidošanās (gazifikācija), to uzliesmošana ar sekojošu degšanas procesa stabilizāciju pēc  $\approx 1000$  s. Lai novērtētu kopējā saražotā siltuma daudzuma izmaiņas granulētās koksnes biomasas termo-ķīmisko izmaiņu procesā atkarībā no elektriskā lauka intensitātes, tika veikti kompleksi liesmas temperatūras, degšanas produktu sastāva un iekārtas jaudas izmaiņu kinētiskie mērījumi, mainot aksiāli ievadītā elektroda potenciālu.

### 4.1. Tehnoloģijas prototipa aprobācijas rezultatīvie radītāji

Elektrodinamiskās kontroles tehnoloģijas aprobācijas rezultāti, kuri iegūti ar rūpnieciskā prototipa iekārtu, atbilst rezultātiem, kas iegūti, veicot pētījumus ar mazas jaudas eksperimentālo iekārtu, kā kurināmo izmantojot koksnes biomasas granulas. Pētījumu rezultāti apliecina, ka

elektriskā lauka iedarbības rezultātā laika posmā no 200 līdz 500 s paātrinās biomasas gaistošo vielu uzliesmošana, palielinot vidējo temperatūru liesmas reakcijas zonā  $T_1$  (6. diagnostiskā atvere) par 10–20 % un degšanas produktu plūsmā  $T_2$  (7. diagnostiskā atvere) par  $\approx 10$  % (14. tab.). Līdzīgs temperatūras pieaugums biomasas termiskās sadalīšanas sākuma stadijā, elektriskā lauka iedarbības rezultātā, bija novērojams arī mazas jaudas eksperimentālā iekārtā (45. att. – A).

Ir jāatzīmē, ka tehnoloģiskā iekārtā ir samērā liela degšanas temperatūras mērījumu relatīvā kļūda, kas ir saistīta galvenokārt ar granulu padeves specifiku deglī, izmantojot šneku un veidojot periodisku siltumietilpīgo biomasas žāvēšanas un gaistošo vielu veidošanas procesu aktivizēšanu, kas izmaina degšanas siltuma izdalīšanos un liesmas temperatūru, izraisot periodiskas temperatūras svārstības 50 K ( $\pm 6$  %) robežās. Šādas periodiskās izmaiņas stipri ietekmē arī temperatūras mērījumu kļūdas, tāpēc 14. tabulā sistemātiskā eksperimenta kļūda netika atzīmēta.

14. tabula

#### Vidējās temperatūras izmaiņas granulu iedegšanas posmā elektriska lauka iedarbībā

$U_{\varphi+}$ , kV	$I$ , mA	$T_1$ , K	$T_2$ , K	$\Delta T_1$ , %	$\Delta T_2$ , %
0	0	768	516		
0,6 $\pm$ 0,06	2,14 $\pm$ 0,18	875	561	14%	9%
0,9 $\pm$ 0,06	3,32 $\pm$ 0,31	904	567	18%	10%
1,2 $\pm$ 0,06	4,57 $\pm$ 0,25	911	568	19%	10%
1,5 $\pm$ 0,06	5,71 $\pm$ 0,34	943	580	23%	12%
1,8 $\pm$ 0,06	7,25 $\pm$ 0,45	843	567	10%	6%

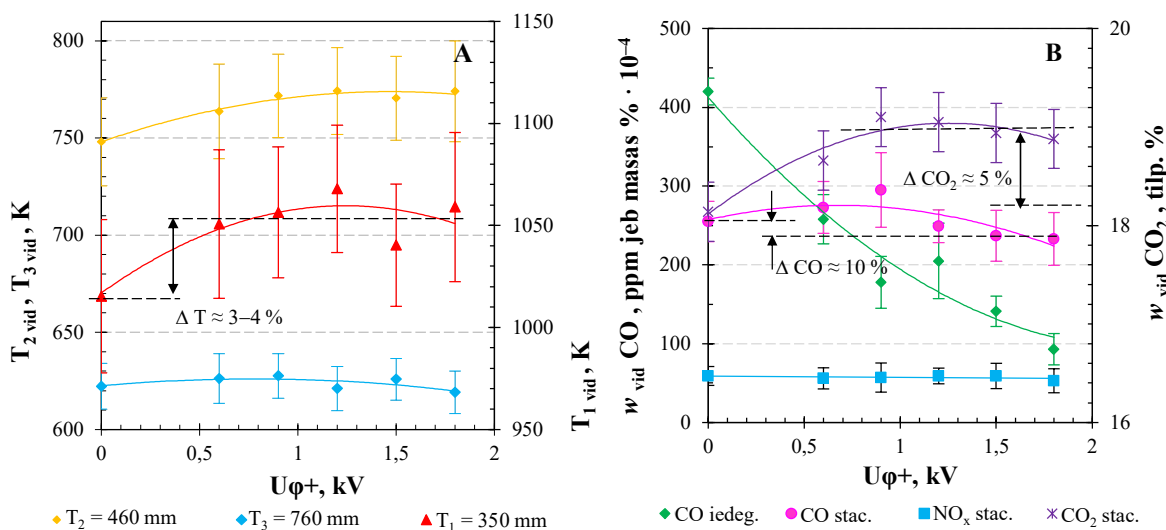
Degšanas zonas vidējās temperatūras paaugstināšanās, ko nosaka reakcijas zonas radiālā izplešanās liesmas un elektriskā lauka mijiedarbības procesā, ir novērojama arī stacionārā degšanas režīmā (62. att. – A), tomēr vidējās temperatūras paaugstinājums visiem eksperimentiem nepārsniedz aptuveni 4 %. Degšanas produktu plūsmas vidējās temperatūras pieaugumus par 3 % ir reģistrējams arī rūpnieciskā prototipa iekārtas vertikālās sekcijas vidusposmā ( $Y = 460$  mm).

Gaistošo savienojumu uzlabotā aizdegšanās, ka arī vispārējās degšanas procesa efektivitātes palielināšanās, elektriskā lauka iedarbības rezultātā, tehnoloģiskā prototipa iekārtā ir konstatēta arī pēc galvenā degšanas produkta – CO<sub>2</sub> vidējās koncentrācijas pieauguma dūmgāzēs – no 3 % līdz 5 % (62. att. – B). Turklāt kaitīgo CO emisiju daudzums ( $\approx 420$  ppm), mainot elektroda potenciālu, biomasas granulu degšanas sākuma posmā samazinās robežās no 38 % līdz 77 %. Tomēr stacionārajā degšanas posmā CO emisiju ( $\approx 250$  ppm) koncentrācijas izmaiņas ir mazāk izteiktas, samazinoties aptuveni par 10 % no sākuma vērtības pie  $U_{\varphi} = 0$ . Savukārt NO<sub>x</sub> emisiju daudzums ( $\approx 50$ – $60$  ppm) praktiski neizmainās elektriskā lauka iedarbības rezultātā gan biomasas degšanas procesa sākuma stadijā, gan stacionārā degšanas posmā (62. att. – B). Iegūtie rezultāti ļauj secināt, ka kaitīgo emisiju koncentrācijas pieaugums produktos ir saistīts galvenokārt



ar biomasas termiskās sadalīšanās procesa intensifikāciju elektriskajā laukā, nevis ar liesmas temperatūras paaugstināšanos, jo liesmas temperatūras pieaugums ir pārāk mazs, lai izsauktu termiski jutīgā NO koncentrācijas pieaugumu (119. form.).

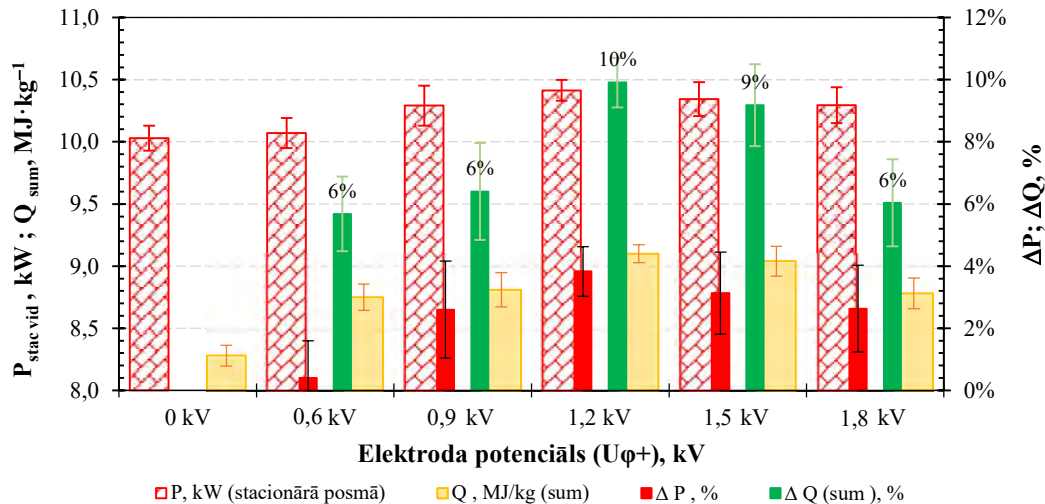
Pēc dūmgāzu vidējas temperatūras mērījumiem stacionārajā degšanas posmā ( $\approx 600\text{--}630\text{ K}$ ) ir konstatēts, ka dūmgāzu siltums iekārtā nav pilnīgi izmantots. Lietderīgai siltuma ražošanai, izmantojot tehnoloģiskā prototipa iekārtu, nepieciešams nodrošināt siltuma apmaiņas procesu intensifikāciju. Vislielākais elektriskā lauka efekts uz degšanas un siltuma pārneses procesiem ir konstatēts tehnoloģiskās iekārtas horizontālajā sekcijā jeb degšanas kamerā. Tāpēc tālākai rezultātu interpretācijai un izvērtēšanai bija norādīti tikai horizontālās sekcijas siltuma parametru izmaiņas elektriskā lauka iedarbības rezultātā.



62. att. Tehnoloģiskā prototipa iekārtas dažādu parametru izmaiņas elektriskā lauka iedarbībā: plūsmas temperatūra (A) un  $\text{CO}_2$ , CO,  $\text{NO}_x$  emisiju daudzuma (B) izmaiņas.

Tehnoloģiskajā aprobācijas pētījuma rezultātā bija konstatēts arī elektrodinamiskās kontroles pozitīvais efekts attiecībā uz iekārtas jaudu. Kaut gan stacionārā degšanas procesa jaudas izmaiņas nav tik stipri izteiktās un nepārsniedz 3–4 %, degšanas siltuma pieaugums biomasas degšanas procesa sākuma posmā uzlabo kopējo saražoto siltumu par 6–10 % (63. att.). Kaut gan tehnoloģiskās aprobācijas rezultāti apstiprina rezultātus, kas iegūti 4 kW iekārtā, kā kurināmo izmantojot granulēto koksnes biomasu (54. att.), tomēr eksperimentos ar 4 kW iekārtu vidējais siltuma jaudas pieaugums pašzūtrošā degšanas procesā bija augstāks, sasniedzot 6–8 % ar vidējo novirzi  $\pm 2\%$ . Ievērojot, ka tehnoloģiskā prototipa iekārtā relatīvais elektroda garums bija par 40 % īsāks, var secināt, ka elektriskā lauka efektu uz siltuma jaudu tehnoloģiskai iekārtai ir iespējams paaugstināt, palielinot elektroda garumu. Tālākai rūpnieciskā prototipa eksperimentālai izstādei var izmantot elektrodu ar palielinātu garumu par 120 mm pretējā virzienā. Izmantojot garāku T-veida elektrodu, var panākt pilnīgāku jonizācijas zonas izmantošanu, robežās no  $L/D = 0,27$  līdz 0,55.

Ir nepieciešams arī atzīmēt, ka komerciālā granulū degļa gaisa un kurināmā padeves režīma koriģēšana tehnoloģiskā iekārtā nav iespējama, jo deglis ir pilnīgi automatizēts, un šie parametri ir ieprogrammēti un pielāgoti A kvalitātes koksnes granulū degšanas režīmam. Cita veida biomasas granulū izmantošana bija ierobežota ar ražotāja garantijas līgumu. Šādu minēto iemeslu dēļ tehnoloģijas aprobācija uz 20 kW degļa, izmantojot par kurināmo salmu un kūdras biomasas granulū, netika veikta.



63. att. Elektriskā lauka efekts uz tehnoloģiskā prototipa iekārtas horizontālās sekcijas siltuma parametriem.

Pozitīvo elektrodinamiskās tehnoloģijas efektu ir iespējams uzlabot, izmainot tehnoloģiskās iekārtas konstruktīvo daļu: ievadot vertikālajā kamerā plūsmas atsietena vairogus, tādā veidā samazinot plūsmas ātrumu un palielinot tās turbulenci, kā arī palielinot siltuma apmaiņas virsmas laukumu, izmantojot papildus dzesēšanas caurules siltuma noņemšanai.

## 4.2. Tehnoloģijas ekonomijas aprēķins un drošības pasākumi

Biomasas degšanas elektrodinamiskās kontroles tehnoloģijas ieviešanas izdevumi ir saistīti ar katla degšanas kameras pārbūvi, tāpēc jau katla projektēšanas stadijā ir nepieciešams paredzēt šīs tehnoloģijas izmantošanu. Izdevumi, kas saistīti ar elektrodinamiskās kontroles tehnoloģijas izmantošanu katlu iekārtās, reducējās uz elektriskās daļas instalāciju un izmaksām par elektroenerģijas patēriņu augstsprieguma līdzstrāvas bloka barošanai. Projektējot katlu ar noteikto jaudu, ir iespējams paredzēt optimālā augstsprieguma barošanas bloka izvēli, turklāt barošanas bloka cena vairumtirdzniecībā ir zemāka.

Aprēķinot elektriskās daļas instalācijas izmaksas, tika veikta pašreizējā tirgus izpēte, lai noteiktu tuvinātās cenas par augstsprieguma līdzstrāvas barošanas bloku, elektroda izgatavošanu, elektroda izolāciju un uzstādīšanas/montāžas darbiem (15. tab.). Lai noteiktu kopējās uzstādīšanas izmaksas, ir veikti pieņēmumi, ievērojot LUFİ tehnisko darbinieku sniegto informāciju.

Ekspērimētālajā darbā ietvaros tika izmantots augstsprieguma barošanas bloks, kuru izvēle tirgū ir plaša, ar lielu cenu izkliedi no 2680 līdz 3980 EUR [258]–[260]. Ir 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. Svarīgs faktors ir arī darba strāva, kuru augstsprieguma blokam ir jānodrošina ārējā ķēdē. Izdevumu aprēķiniem tika paņemts APS-1915 barošanas bloks no *T&M Atlantic Inc.* ražotāja.

15. tabula

**Izdevumi saistītie ar degšanas elektrodinamiskās kontroles tehnoloģijas uzstādīšanu**

Izdevumu pozīcija/ Nosaukums	Izdevumu summa, EUR	Atsauce
APS-1915 barošanas bloks DC 5000 V; 10 mA	260 – 500 EUR	[261]
elektroda izgatavošana materiāli (NiCr stienis)	8 – 10 EUR/st x 2 = 16 – 20 EUR 1,5 – 5 EUR	[262], [263]
elektriskās daļas izolācija (keramika)	50 – 100 EUR	[264]
uzstādīšanas/montāžas darbi materiāli (vadi, izolācijas materiāls)	≈ 45 EUR/st x 2 = 90 EUR līdz 250 EUR	[263]
PVN, VSOAI, ievaduitas nodoklis	185 – 290 EUR	[265]–[267]
cenās sadārdzinājums līdz 10 %	81 – 126 EUR	[268]
<b>Kopējie izdevumi</b>	<b>≈ 884 – 1380 EUR</b>	

Barošanas bloka elektroenerģijas patēriņu var aprēķināt, kā nodrošinātā sprieguma ( $U_{\varphi+}$ , kV), plūstošās strāvas ( $I$ ,  $A \cdot 10^{-3}$ ) un laika ( $t$ , st) reizinājumu, ņemot vērā, ka barošanas bloka lietderības koeficients, bastoties ražotāja datos, ir 50 %. Nepieciešams pievērst uzmanību, ka augstsprieguma līdzstrāvas barošanas bloku lietderības koeficients parasti nepārsniedz 60 %, tāpēc, izvēloties pēc cenas optimālo barošanas bloku, ir nepieciešams izpētīt strāvas piesātinājumu un strāvas īsslēguma robežu (sk. 3.3. nodaļā), lai pareizi izvēlētos maksimālo barošanas bloka izejas strāvu. Ievērojot eksperimentālā darbā izmantotā bloka lietderības koeficientu pie dažādiem elektroda potenciāliem un atbilstošiem strāvas lielumiem, tika aprēķināts elektroenerģijas patēriņš degšanas procesu elektrodinamiskai kontrolei (16. tab.).

16. tabula

**Elektroenerģijas patēriņa aprēķins**

Elektroda potenciāls $U_{\varphi+}$ , kV	Strāva plūstošā starp elektrodiem (14. tab.) $I$ , $A \cdot 10^{-3}$	Barošanas elektriskā jauda $P_{el} = \frac{U_{+} \cdot I}{60\%}$ , W	Enerģijas pašpatēriņš $W_{el} = P_{el} \cdot t$ , kWh
0,6±0,06	2,14±0,18	2,57±0,22	0,003
0,9±0,06	3,32±0,31	5,81±0,56	0,006

1,2±0,06	4,57±0,25	10,97±0,60	0,012
1,5±0,06	5,71±0,34	17,13±1,02	0,018
1,8±0,06	7,25±0,45	26,10±1,62	0,028

Pēc elektroenerģijas patēriņa aprēķiniem, tehnoloģiskās aprobācijas priekšizpētē pie pieliktā elektrodam sprieguma +1,8 kV un maksimālā strāvas stipruma 7,25 ±0,45 mA maksimālais barošanas bloka elektroenerģijas patēriņš sasniedz 0,028 kWh. Patērētā elektriskā jauda lauka nodrošināšanai ir aptuveni 2,5 % no prototipa iekārtas horizontālās sekcijās siltuma jaudas. Turklāt, vislietderīgākā ( $\eta_{vid} \approx 96\%$ ) tehnoloģijas izmantošana no enerģijas patēriņa viedokļa notiek  $U_{\varphi+} = [0,9; 1,5]$  kV elektroda potenciāla robežās (17. tab.), jo relatīvais elektroenerģijas patēriņš ir tikai  $\approx 2-6\%$  no saražotā siltuma pieauguma ( $\Delta Q_{silt}$ ).

17. tabula

### Tehnoloģijas enerģētiskās bilances lietderīgums

Elektroda potenciāls $U_{\varphi+}$ , kV	Kopējais elektroenerģijas pašpatēriņš $W_{el}$ , kWh	Saražotā siltuma pieaugums $\Delta Q_{silt}$ , kJ	Relatīvs enerģijas pašpatēriņš $\frac{W_{el}}{Q_{silt} \cdot st}$ , %	Tehnoloģijas lietderības koeficients $1 - \frac{W_{el}}{Q_{silt} \cdot st}$ , %
0,6	0,003	0,04	7%	93%
0,9	0,006	0,26	2%	98%
1,2	0,012	0,38	3%	97%
1,5	0,018	0,31	6%	94%
1,8	0,028	0,26	11%	89%

Ievērojot 3.7. nodaļā konstatēto kurināmā  $dV/dQ$  ekonomiju 5 % (56. att.), vidējo kokskaidu granulu cenu tirgū 2020.gadā – 0,182 EUR·kg<sup>-1</sup>, un 15. tabulas datus par iespējamām elektrodinamiskās kontroles tehnoloģijas pašizmaksām, tika veikts perioda aprēķins, kura laikā tiks kompensēti izdevumi, kas saistīti ar degšanas procesa elektrodinamiskās kontroles izveidi. Aprēķini tika veikti, balstoties tikai uz kurināmā ekonomijas pozitīvā efekta no tehnoloģijas izmantošanas katlu iekārtās (18. tab.). Aprēķinos tika iekļauta arī korekcija, kas saistītā ar elektrības patēriņu, tomēr šādas korekcijas ietekme aprēķinos ir minimālā, respektīvi –0,15 % no kurināmā ekonomijas.

Pēc 18. tabulā sniegtajiem aprēķina rezultātiem ir noteikts, ka tehnoloģijas izmantošanas atmaksāšanas periods 20 kW jaudas katla iekārtā ir no 2,7 līdz 4,2 gadiem. Pieņemot, ka kurināmā ekonomija saglabājas, lineāri ekstrapolējot granulu degļa jaudas vērtību, var secināt, ka tehnoloģijas atmaksāšanas periods samazinās aptuveni līdz 1 gadam, ja tehnoloģiju pielieto 300 kW koksnes granulu degļa ekspluatācijas laikā, pat neievērojot citus pozitīvos efektus, kas saistīti ar kaitīgo emisiju daudzumu samazināšanos (sk. 3.8. nodaļā). Mērogojot elektrodinamiskās kontroles tehnoloģijas izmantošanas pozitīvo efektu katlu iekārtās ar jaudu augstāku par 20 kW,

autors ievēroja paaugstinātos izdevumus, kas saistīti ar barošanas bloka izvēli ar paaugstinātu jaudu pie lielāka elektroenerģijas patēriņa. Tomēr, ievērojot citu autoru datus [256], pašlaik nav iespējams teorētiski precīzi noteikt tehnoloģijas elektrisko patēriņu noteiktās jaudas deglim. Pēc *Purmalis et al.* datiem [256], veicot elektrodinamiskās kontroles tehnoloģijas lineāro mērogošanu 3–4 MW katlu iekārtās, kurināmā ekonomijas efekts var sasniegt  $\approx 5\%$ , patērējot tikai 0,14 kW elektriskās jaudas un nodrošinot elektriskā lauka intensitāti  $\approx 0,9 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Tāpēc var pieņemt, ka 18. tabulas aprēķins pie  $P_{silt} > 0$  attēlo pašatmaksāšanas 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 tehnoloģiju ir jāparedz katlu projektēšanas stadijā un jāoptimizē to izmantošanu eksperimentāli, lai panāktu zemākas tehnoloģijas pašizmaksas.

18. tabula

### Tehnoloģijas pašatmaksāšanas perioda aprēķins pēc kurināmā ekonomijas

Iekārtas jauda $P_{silt}$ , kW	Kurināmā patēriņš $V_{kurin}$ , $\text{kg}\cdot\text{st}^{-1}$	Kurināmā cena, $\text{EUR}\cdot\text{kg}^{-1}$ [Atsauce]	Ekonomija $V_{kurin} \cdot \text{EUR} \cdot \frac{dV}{dQ}$ , $\text{EUR}\cdot\text{st}^{-1}$	Atmaksāšanas periods pēc izdevumiem	
				MIN, gadi	MAKS, gadi
20 <sup>1</sup>	4,13	0,167 [269] 0,174 [270]	0,0376	2,7	4,2
100 <sup>2</sup>	20,65	0,207 [271] 0,171 [272]	0,1880	2,5	3,7
200 <sup>2</sup>	41,3	0,190 [273]	0,3759	1,3	1,8
300 <sup>2</sup>	60,95	vidējā: <b>0,182</b>	0,5638	0,8	1,2

1 – izdevumi no 16.tabulas; 2 – izdevumi no 11. pielikuma tabulas.

Izmantojot elektrodinamiskās kontroles tehnoloģiju degšanas procesu uzlabošanai, ir īpaši svarīgi veikt elektrodrošības pasākumus: pareizi izolēt elektroda daļu, kura ir tiešā saskarsmē ar konstruktīvām katla iekārtas daļām, pārklājot daļu elektroda, kas nav saskarsmē ar degšanas zonu, ar izolācijas pārklājumu, saņemot visas iekārtas konstruktīvās daļas, izolēt elektroda barošanas sistēmu no iekārtas automātisko sistēmu elektronikas. Saskaņā ar Aizsargjoslu likumu, apkārt elektriskā augstsprieguma līnijām ar spriegumu robežās no 6 līdz 20 kV ir nepieciešams nodrošināt 2,5 m aizsargjoslu zem elektrisko tīklu gaisvadu līnijas ass pilsētās un ciemos. Ministru kabineta noteikumi Nr. 1041 “Noteikumi par obligāti piemērojamo energostandartu, kas nosaka elektroapgādes objektu ekspluatācijas organizatoriskās un tehniskās drošības prasības” nosaka augstsprieguma elektroietaisies elektrobīstamības zonas ārējo robežu 1 m un norobežotās teritorijas galējo robežu 2,5 m. Šī aizsargjosla paredz ierobežoto piekļuvi pie objekta, kā arī ir ieteicams neparedzēt elektromagnētiski jūtīgo elektroierīču izvietojumu šajā aizsargjoslā, bet esošo katla elektroniku pasargāt no elektromagnētisku lauku iedarbības ar lauka ekranēšanas paņēmieniem. Kaut gan elektriskais lauks ar intensitāti, mazāku par  $1 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$  veidojas degšanas kamerā un to nosaka sprieguma kritums uz liesmas (sk. 2.1.1. apakšnodaļā), tomēr pastāv bīstamība no

Īssavienojuma caursītes un elektriskā lādiņa veidošanās uz iekārtas virsmām. Augstsprieguma elektroietaisis veido arī elektromagnētisko lauku, kuru vērtību nosaka plūstošā strāva. 2015. gada 13. oktobra Ministru kabineta noteikumi Nr. 584 “Darba aizsardzības prasības nodarbināto aizsardzībai pret elektromagnētiskā lauka radīto risku darba vidē” regulē ekspozīcijas robežvērtības personālam, strādājot elektrisko lauku iedarbībā noteiktās darbības vērtības diapazonā no  $25 \leq f < 50$  Hz. Šie noteikumi nosaka elektriskā lauka robežvērtības:  $10 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ , strādājot ar zemas intensitātes elektrisko lauku, un  $20 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ , strādājot ar augstas intensitātes elektrisko lauku. Tomēr strādājot ar magnētisko lauku ekspozīcijas robežvērtības ir  $1,0\cdot 10^3 \mu\text{T}$  un  $6,0\cdot 10^3 \mu\text{T}$ , atbilstoši zemākai un augstākai magnētiskā lauka vērtībai. Ievērot ar Teslametru izmērīto magnētiskā lauka sadalījumu eksperimentālās iekārtas tuvumā, magnētiskā lauka intensitātes vērtība samazinās līdz nullei 1 m attālumā, savukārt iekārtas tuvumā magnētiskā lauka plūsmas blīvums nepārsniedz robežvērtību, kas saistīta ar lokalizēta magnētiskā lauka ietekmi uz rokām un kājām  $18\cdot 10^3 \mu\text{T}$ .

Apkalpojošām personālam ir nepieciešams nodrošināt personālas aizsardzības līdzekļus: biežus dielektriskus gumijas cimds ( $7500 \text{ V}$ ) un VDE antistatiskus elektriķa zābakus, jo augstsprieguma izmantošana ir bīstama ne tikai elektronikai, bet arī cilvēka veselībai. 2013. gada 8. oktobra Ministru kabineta noteikumi Nr. 1041 “Noteikumi par obligāti piemērojamo energostandartu, kas nosaka elektroapgādes objektu ekspluatācijas organizatoriskās un tehniskās drošības prasības” regulē personāla kvalifikāciju, strādājot ar augstsprieguma elektroietaisēm. Atsaucoties uz šiem noteikumiem, personālam jānodrošina elektrodrošības kvalifikācijas B līmeni un jāveic noteikumos minētos darba organizatoriskus pasākumus. Drošības pasākumus, strādājot vidē ar elektromagnētiska lauka iedarbībā, regulē 2006. gada 5. septembra Ministru kabineta noteikumi Nr. 745 “Darba aizsardzības prasības nodarbināto aizsardzībai pret elektromagnētiskā lauka radīto risku darba vidē”.

## SECINĀJUMI

1. Dažādas izcelsmes granulēto biomasu (salmu, kūdras, koksnes) elementārā un ķīmiskā sastāva daudzveidība nosaka būtiskās atšķirības gazifikācijas un degšanas procesos.

2. Granulētās biomasas degšanas liesmas virpuļplūsmas eksperimentālajā izpētē (bez pieliktā elektriskā lauka) konstatēts, ka maksimālā vidējā degšanas temperatūra, augstāka iekārtas jauda un mazākais emisiju daudzums, veidojās pie sekundārā gaisa ieplūdes leņķa ( $\neq \theta_{ieejas}$ ) – 40° un virpuļskaitļa ( $S$ )  $\approx 0,6$ –0,9.

3. Dažādas izcelsmes biomasu degšanā jonu strāva sasniedz maksimālo vērtību (līdz 6 mA) attālumā no 0 līdz 50 mm no biomasas granulu slāņa virsmas. Lai efektīvi kontrolēt 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. Elektriska lauka iedarbībā par 15–20 % paplašinās biomasas termiskās sadalīšanas produktu degšanas zona un līdz 50 % samazinās liesmas garums, izraisot par  $\approx 10$  % temperatūras maksimālās vērtības samazināšanos liesmas centrālajā daļā un par  $\approx 15$ –20 % temperatūras paaugstināšanos 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 sekojošo gaisa pārākuma koeficienta samazināšanos dažādām biomasām par  $\approx 15$ –30 %.

5. Pie  $E\varphi = 0,75 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$  ir konstatēts kviešu salmu granulu sadalīšanas ātruma pieaugums par  $\approx 10$  %. Savukārt koksnes biomasas un kūdras termiskās sadalīšanas ātruma maksimālais pieaugums elektriskajā laukā sasniedz  $\approx 5$  %.

6. CO<sub>2</sub> pieaugums liesmas reakcijas zonā līdz  $\approx 36$ –37 %, kā arī degšanas procesa efektivitātes pieaugums par 4–10 % pie degšanas kameras sienām, netieši liecina par konvektīvās siltuma pārneses 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. Elektriskajā laukā izraisītās virpuļplūsmas izmaiņas veicina CO<sub>2</sub>, CO un NO<sub>x</sub> emisiju relatīvo daudzumu samazināšanos (īpaši gruzdēšanas posmā) dažāda veida biomasas granulu degšanas procesā par  $\approx 4$ –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  $\approx 3$ –5 %, uzlabojot biomasas termiskās sadalīšanas produktu (CO) sadegšanu par  $\approx 10$  % ar sekojošo tehnoloģiskā prototipa iekārtas vidējais siltuma jaudas pieaugumu  $\approx 3$ –4 %, un 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  $\pm 0,45$  mA strāvas stipruma, maksimālais barošanas bloka

elektroenerģijas patēriņš sasniedz 0,028 kWh. Patērētā, lauka nodrošināšanai, elektriskā jauda ir aptuveni 2,5 % no prototipa iekārtas siltuma jaudas, bet relatīvais elektroenerģijas patēriņš ir tikai  $\approx 2-6$  % no saražotā siltuma pieauguma.



## CONCLUSIONS

1. The variety of elemental and chemical composition of granular biomass of different origin (straw, peat, wood) determines significant differences in the gasification and combustion processes.

2. An experimental study of the swirling flow of flames of the combustion process of granular biomass (without an applied electric field) has shown that the optimal mode of the swirling flow is formed when an angle of entry of the secondary air ( $\alpha$   $\theta_{\text{inlet}}$ ) is  $40^\circ$  and the number of vortices ( $S$ ) is 0.6–0.9, which provides maximum average flame temperature, more heat of the device and lower emissions.

3. During the experimental study of the combustion of biomass of various origins, the ion current reaches its maximum value (up to 6 mA) at a distance of 0 to 50 mm from the surface of the biomass pellets layer. For effective control of the swirling structure of the flame the optimal electrode length should be at least 63 mm.

4. In a low-intensity electrostatic field (up to  $1 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ ), the influence of the "ionic wind" provokes an increase in the swirl number (1.1–1.3) of the downward flow vortex. Induced by the electric field, a combustion zone of the products of thermal decomposition of biomass expands by 15–20 %, the flame length decreases up to 50 %, causing a decrease in the maximum temperature in the center of the flame stream by  $\approx 10$  % and an increase in the average temperature at the flame periphery. As a result of changes in the swirling dynamics, the axial flow velocity decreases in the combustion zone (up to  $0.3\text{--}0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), increasing the residence time of the air-fuel mixture, improving the combustion of volatile substances with a subsequent decrease in the air excess ratio for different types of biomass by 15–30 %.

5. Considering the average field-induced variation in the biomass mass loss, an increase in the rate of thermal decomposition of wheat straw pellets is observed by  $\approx 10$  % at  $E\varphi' = 0.75 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ . In turn, the maximum increase in the rate of thermal decomposition of woody biomass and peat reaches  $\approx 5$  %.

6. An increase in  $\text{CO}_2$  in the flame reaction zone up to  $\approx 36\text{--}37$  %, as well as an increase in the efficiency of the combustion process by 4–10 % close to the chamber walls indirectly indicates an increase in convective heat transfer from the reaction zone to the cooling walls of the combustion chamber, thus increasing the average amount of heat collected during combustion process by 6–10  $\pm 4$  % for straw biomass, by 5–6  $\pm 2$  % for woody biomass, and by 3–6  $\pm 3$  % for peat. Consequently, a decrease in the relative fuel consumption by an average of 5 % has been calculated due to the effect of an external electric field applied.

7. Swirling flow deviations caused by the electric field contribute to a better burnout of volatiles, reducing relative  $\text{CO}_2$ , CO and  $\text{NO}_x$  emissions (especially during char combustion stage) for different types of biomass pellets by  $\approx 4\text{--}20$  %, 20–30 % and 5–10 %, respectively.

8. Approbation of the electrodynamic control technology on an industrial pellet burner (20 kW) confirmed the positive effect of the applied electric field, increasing the average

combustion temperature in the reaction zone by  $\approx 3\text{--}5\%$ , improving the burnout of the products of thermal decomposition of biomass (CO) by  $\approx 10\%$ , with a subsequent increase in the thermal power of technological prototype by  $\approx 3\text{--}4\%$ , an increase in the average heat amount produced by  $6\text{--}8\%$  with an average deviation of  $\pm 2\%$ .

9. According to the calculations of power consumption in the feasibility study of the technology, if the potential of  $+1.8\text{ kV}$  is applied to the electrode, the current reaches the value of  $7.25 \pm 0.45\text{ mA}$ , and the maximum power consumption of the power supply is  $0.028\text{ kWh}$ . The electricity consumed to create the field is about  $2.5\%$  of the thermal power of the horizontal sections of the technological prototype. In addition, the relative electricity consumption is only  $\approx 2\text{--}6\%$  of the increase in heat amount produced.

## IZMANTOTĀ LITERATŪRA

Bibliogrāfijas organizēšanai un noformēšanai promocijas darbā tika izmantots *IEEE* stils inženierzinātnēs, izmantojot bezmaksas programmatūru *Mendeley (Elsevier Inc., ASV)*.

- [1] European Commission, “2030 climate & energy framework.” [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en).
- [2] INFORSE, “DIERET: Biomass.” [Online]. Available: <http://www.inforse.org/europe/dieret/Biomass/biomass.html>. [Accessed: 17-Jan-2018].
- [3] AEBIOM, “Bioenergy Europe Statistical Report 2018,” Brussels, 2018.
- [4] FAOSTAT, “Crops,” 2017. [Online]. Available: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/>. [Accessed: 01-Nov-2019].
- [5] Danish Energy Agency, “Energy Statistics 2017,” Copenhagen, 2017.
- [6] D. G. Christian, “Biomass for renewable energy, fuels and chemicals,” *J. Environ. Qual.*, vol. 29, no. 2, p. 662, 2000.
- [7] T. Nussbaumer, *Biomass combustion in Europe: overview on technologies and regulations : Final Report*, 3rd ed., vol. 8. New York: NYSERA, 2008.
- [8] 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.
- [9] S. Vasilev, D. Baxter, L. K. Andersen, and C. G. Vasileva, “An overview of the chemical composition of biomass,” *Fuel*, vol. 89, pp. 913–933, 2010.
- [10] H. Vīgants, “Granulu ražošanas ilgtspējīga attīstība,” Riga Technical University, Riga, 2017.
- [11] 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.
- [12] S. Wu, D. Shen, J. Hu, R. Xiao, and H. Zhang, “TG-FTIR and Py-GC-MS analysis of a model compound of cellulose – glyceraldehyde,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 101, pp. 79–85, May 2013.
- [13] M. Brebu, T. Tamminen, and I. Spiridon, “Thermal degradation of various lignins by TG-MS/FTIR and Py-GC-MS,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 104, pp. 531–539, Nov. 2013.
- [14] 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.
- [15] X. Gu, X. Ma, L. Li, C. Liu, K. Cheng, and Z. Li, “Pyrolysis of poplar wood sawdust by TG-FTIR and Py-GC/MS,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 102, pp. 16–23, Jul. 2013.
- [16] 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.
- [17] I. Obernberger and G. Ther, “Physical characterization and chemical composition of densified biomass with regard to their combustion behaviour,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 27, pp. 653–669, 2004.
- [18] 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.
- [19] I. Barmina *et al.*, “Effect of biomass high-frequency pre-treatment on combustion characteristics,” *Chem. Eng. Trans.*, vol. 29, pp. 895–900, 2012.

- [20] I. Barmina, M. Zake, and R. Valdmanis, “Electric field-induced variations of combustion dynamics,” *Chem. Eng. Trans.*, vol. 39, pp. 1531–1536, 2014.
- [21] J. Lawton and F. J. Weinberg, *Electrical Aspects of Combustion*, In Russian. Moscow: Energija, 1976.
- [22] 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.
- [23] K. G. Payne and F. J. Weinberg, “A preliminary investigation of field-induced ion movement in flame gases and its applications,” *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 250, no. 1262, pp. 316–336, Mar. 1959.
- [24] M. Zake, I. Barmina, I. Bucenijs, and V. Krishko, “Magnetic field control of combustion dynamics of the swirling flame flow,” *Magnetohydrodynamics*, vol. 46, no. 2, pp. 171–186, 2010.
- [25] I. Barmina, A. Lickrastina, V. Suzdalenko, and M. Zake, “Gradient magnetic field promotion of pelletized biomass combustion,” *Magnetohydrodynamics*, vol. 48, no. 2, p. 351360, 2012.
- [26] A. Sakrieh, G. Lins, F. Dinkelacker, T. Hammer, A. Lepertz, and D. W. Branston, “Electric control of a premixed turbulent flame at high pressure,” in *Book of abstracts of the European Combustion Meeting “ECM 2005,”* 2005, pp. 1–5.
- [27] 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.
- [28] J. Colannino, “Electrodynamic combustion control TM technology, A clear Sign white paper,” Seattle, 2012.
- [29] 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.
- [30] P. Basu, *Biomass gasification and pyrolysis : practical design and theory*. Oxford, UK: Elsevier Inc., 2010.
- [31] 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.
- [32] B. R. . Simoneit, “Biomass burning — a review of organic tracers for smoke from incomplete combustion,” *Appl. Geochemistry*, vol. 17, no. 3, pp. 129–162, Mar. 2002.
- [33] A. Chouchene, M. Jeguirim, B. Khiari, F. Zagrouba, and G. Trouvé, “Thermal degradation of olive solid waste: Influence of particle size and oxygen concentration,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 54, no. 5, pp. 271–277, Mar. 2010.
- [34] Y. Su, Y. Luo, W. Wu, Y. Zhang, and S. Zhao, “Characteristics of pine wood oxidative pyrolysis: Degradation behavior, carbon oxide production and heat properties,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 98, pp. 137–143, Nov. 2012.
- [35] S. V. Vassilev, C. G. Vassileva, and V. S. Vassilev, “Advantages and disadvantages of composition and properties of biomass in comparison with coal: An overview,” *Fuel*, vol. 158, no. May, pp. 330–350, 2015.
- [36] 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.
- [37] S. V. Vassilev, D. Baxter, L. K. Andersen, C. G. Vassileva, and T. J. Morgan, “An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass,” *Fuel*, vol. 94, pp. 1–33, 2012.
- [38] K. Froment, J.-M. Seiler, F. Defoort, and S. Ravel, “Inorganic species behaviour in

- thermochemical processes for energy biomass valorisation,” *Oil Gas Sci. Technol. – Rev. d’IFP Energies Nouv.*, vol. 68, no. 4, pp. 725–739, Jul. 2013.
- [39] D. Sietske Boschma, I. Kees, and W. Kwant, *Rice straw and wheat straw potential feedstocks for the biobased economy*, no. June. Wageningen, Netherlands: NL Agency - Ministry of Economic Affairs, 2013.
- [40] P. McKendry, “Energy production from biomass (part 1): overview of biomass,” *Bioresour. Technol.*, vol. 83, no. 1, pp. 37–46, May 2002.
- [41] Q. Ma, L. Han, and G. Huang, “Evaluation of different water-washing treatments effects on wheat straw combustion properties,” *Bioresour. Technol.*, vol. 245, pp. 1075–1083, 2017.
- [42] 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.
- [43] C. Wang, Y. Wu, Q. Liu, H. Yang, and F. Wang, “Analysis of the behaviour of pollutant gas emissions during wheat straw/coal cofiring by TG-FTIR,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 92, no. 5, pp. 1037–1041, 2011.
- [44] T. S. Farrow, C. Sun, and C. E. Snape, “Impact of CO<sub>2</sub> on biomass pyrolysis, nitrogen partitioning, and char combustion in a drop tube furnace,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 113, no. February, pp. 323–331, 2015.
- [45] N. Nwokolo, S. Mamphweli, and G. Makaka, “Analytical and thermal evaluation of carbon particles recovered at the cyclone of a downdraft biomass gasification system,” *Sustain.*, vol. 9, no. 4, 2017.
- [46] G. Özbay, E. S. Kökten, A. Ozcifci, and H. Toker, “Bio-char production from pyrolysis of furniture products waste,” *27th Int. Conf. Res. Furnit. Ind.*, vol. 27, pp. 2013–2016, 2015.
- [47] C. H. Fuchsman, *Peat: Industrial Chemistry and Technology*, 1st Ed. New York: Academic Press Inc., 1980.
- [48] J. Krumins, “The influence of peat composition on metallic element accumulation in fens,” University of Latvia, Riga, 2006.
- [49] J. P. Andriessse, *Nature and management of tropical peat soils*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1988.
- [50] I. Silamikele, N. O., L. Kalnina, O. Purmalis, J. Sire, and M. Klavins, “Properties of peat in ombrotrophic bogs depending on the humification process,” *Mires Peat*, 2003.
- [51] T. Hardy, W. Kordylewski, and K. Mo’ścicki, “Aluminosilicate sorbents for control of KCl vapors in biomass combustion gases,” *J. Power Technol.*, vol. 93, no. 1, pp. 37–43, 2013.
- [52] B. Shrivastava, K. K. Jain, A. Kalra, and R. C. Kuhad, “Bioprocessing of wheat straw into nutritionally rich and digested cattle feed,” *Sci. Rep.*, vol. 4, no. 1, p. 6360, May 2015.
- [53] A. Gani and I. Naruse, “Effect of cellulose and lignin content on pyrolysis and combustion characteristics for several types of biomass,” *Renew. Energy*, vol. 32, no. 4, pp. 649–661, 2007.
- [54] 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.
- [55] S. V. Vassilev, D. Baxter, L. K. Andersen, and C. G. Vassileva, “An overview of the chemical composition of biomass,” *Fuel*, vol. 89, no. 5, pp. 913–933, 2010.
- [56] 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.
- [57] M. Ochoa-Villarreal, E. Aispuro-Hernandez, I. Vargas-Arispuro, and M. Ngel, “Plant cell wall polymers: function, structure and biological activity of their derivatives,” in

- Polymerization*, A. D. S. Gomes, Ed. InTech, 2012.
- [58] S. Azhar, G. Henriksson, H. Theliander, and M. E. Lindström, “Extraction of hemicelluloses from fiberized spruce wood,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 117, pp. 19–24, Mar. 2015.
- [59] P. Alvira, M. J. Negro, I. Ballesteros, A. González, and M. Ballesteros, “Steam explosion for wheat straw pretreatment for sugars production,” *Bioethanol*, vol. 2, no. 1, pp. 66–75, 2016.
- [60] 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.
- [61] R. Sun, J. M. Lawther, and W. B. Banks, “Fractional and structural characterization of wheat straw hemicelluloses,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 29, no. 4, pp. 325–331, 1996.
- [62] W. A. Côté, “Chemical composition of wood,” in *Principles of Wood Science and Technology*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1968, pp. 55–78.
- [63] G. A. Adams and A. E. Castagne, “Hemicelluloses of wheat straw,” *Can. J. Chem.*, vol. 29, no. 2, pp. 109–122, Feb. 1951.
- [64] R. C. Pettersen, “The Chemical Composition of Wood,” in *Journal of Polymer Science*, vol. 51, no. 155, 1984, pp. 57–126.
- [65] NCBI, “PubChem Compound,” 2015. [Online]. Available: <http://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/>. [Accessed: 06-Dec-2015].
- [66] O. Faruk and M. Sain, *Lignin in polymer composites*. Oxford, UK: Elsevier, 2015.
- [67] M. Brebu and C. Vasile, “Thermal degradation of lignin—a review,” *Cellul. Chem. Technol.*, vol. 44, no. 9, pp. 353–363, 2010.
- [68] R. Sun, J. M. Lawther, and W. B. Banks, “A tentative chemical structure of wheat straw lignin,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 6, no. 1, pp. 1–8, 1997.
- [69] X. Lu, B. Xi, Y. Zhang, and I. Angelidaki, “Microwave pretreatment of rape straw for bioethanol production: Focus on energy efficiency,” *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 17, pp. 7937–7940, Sep. 2011.
- [70] B. W. Alexander, A. H. Gordon, J. A. Lomax, and A. Chesson, “Composition and rumen degradability of straw from three varieties of oilseed rape before and after alkali, hydrothermal and oxidative treatment,” *J. Sci. Food Agric.*, vol. 41, no. 1, pp. 1–15, 1987.
- [71] M. Brahim, N. Boussetta, N. Grimi, E. Vorobiev, I. Zieger-Devin, and N. Brosse, “Pretreatment optimization from rapeseed straw and lignin characterization,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 95, pp. 643–650, Jan. 2017.
- [72] S. H. Ghaffar and M. Fan, “Structural analysis for lignin characteristics in biomass straw,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 57, pp. 264–279, 2013.
- [73] L. Jiménez, F. López, and C. Martínez, “Biological pretreatments for bleaching wheat-straw pulp,” *Process Biochem.*, vol. 29, no. 7, pp. 595–599, 1994.
- [74] G. Mancini, S. Papirio, P. N. L. Lens, and G. Esposito, “Increased biogas production from wheat straw by chemical pretreatments,” *Renew. Energy*, vol. 119, pp. 608–614, 2018.
- [75] I. Sable *et al.*, “Properties of wood and pulp fibers from lodgepole pine (*pinus contorta*) as compared to scots pine (*pinus sylvestris*),” *BioResources*, vol. 7, no. 2, pp. 1771–1783, Feb. 2012.
- [76] B. Kuznecov, “Obtaining liquid fuels and their components from woody biomass,” *Russ. Khimicheskij Zhurnal*, vol. 48, no. 6, pp. 83–91, 2003.
- [77] B. Waliszewska, W. Pradzynski, M. Zborowska, A. Stachowiak-Wencek, H. Waliszewska, and A. Spak-Dzwigala, “The diversification of chemical composition of pine wood depending on the tree age,” *Ann. Warsaw Univ. Life Sci. - SGGW. For. Wood Technol.*, no. 91, pp. 182–187, 2015.

- [78] 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.
- [79] K. Werner, L. Pommer, and M. Broström, "Thermal decomposition of hemicelluloses," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 110, pp. 130–137, 2014.
- [80] D. K. Shen, S. Gu, B. Jin, and M. X. Fang, "Thermal degradation mechanisms of wood under inert and oxidative environments using DAEM methods," *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 2, pp. 2047–2052, 2011.
- [81] N. Liu, W. Fan, D. Dobashi, and Q. Lin, "New mass loss kinetic model for thermal decomposition of biomass," *Chinese Sci. Bull.*, vol. 46, no. 16, pp. 1398–1402, 2001.
- [82] L. Gašparovič, J. Labovský, J. Markoš, and L. Jelemenský, "Calculation of kinetic parameters of the thermal decomposition of wood by distributed activation energy model (DAEM)," *Chem. Biochem. Eng. Q.*, vol. 26, no. 1, pp. 45–53, 2012.
- [83] Y. Peng and S. Wu, "The structural and thermal characteristics of wheat straw hemicellulose," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 88, no. 2, pp. 134–139, 2010.
- [84] Q. Yang and S. Wu, "Thermogravimetric characteristics of wheat straw lignin," *Cellul. Chem. Technol.*, vol. 43, no. 4–6, pp. 133–139, 2009.
- [85] F. C. Beall, "Thermogravimetric Analysis of wood lignin and hemicelluloses," *WOOD FIBER Sci.*, no. 3, pp. 215–226, 1969.
- [86] M. Ishikawa, M. Tamura, Y. Nakagawa, and K. Tomishige, "Demethoxylation of guaiacol and methoxybenzenes over carbon-supported Ru–Mn catalyst," *Appl. Catal. B Environ.*, vol. 182, pp. 193–203, Mar. 2016.
- [87] H. Sugimoto and M. Norimoto, "Dielectric relaxation due to interfacial polarization for heat-treated wood," *Carbon N. Y.*, vol. 42, no. 1, pp. 211–218, Jan. 2004.
- [88] 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.
- [89] P. Giudicianni, G. Cardone, and R. Ragucci, "Cellulose, hemicellulose and lignin slow steam pyrolysis: Thermal decomposition of biomass components mixtures," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 100, pp. 213–222, 2013.
- [90] V. Mamliev, S. Bourbigot, and J. Yvon, "Kinetic analysis of the thermal decomposition of cellulose: The main step of mass loss," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 80, no. 1, pp. 151–165, Aug. 2007.
- [91] L. Sanchez-Silva, D. López-González, J. Villaseñor, P. Sánchez, and J. L. Valverde, "Thermogravimetric–mass spectrometric analysis of lignocellulosic and marine biomass pyrolysis," *Bioresour. Technol.*, vol. 109, pp. 163–172, 2012.
- [92] V. Tihay, C. Boulnois, and P. Gillard, "Influence of oxygen concentration on the kinetics of cellulose wadding degradation," *Thermochim. Acta*, vol. 525, no. 1–2, pp. 16–24, Oct. 2011.
- [93] R. K. Jain, K. Lal, and H. L. Bhatnagar, "A kinetic study of the thermal degradation of cellulose and its derivatives," *Die Makromol. Chemie*, vol. 183, no. 12, pp. 3003–3017, 1982.
- [94] I. Milosavljevic and E. M. Suuberg, "Cellulose thermal decomposition kinetics: global mass loss kinetics," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 34, no. 4, pp. 1081–1091, 1995.
- [95] M. Szubel, M. Filipowicz, W. Goryl, and G. Basista, "Characterization of the wood combustion process based on the TG analysis, numerical modelling and measurements performed on the experimental stand," *E3S Web Conf.*, vol. 10, p. 00133, Oct. 2016.
- [96] X. Lin, S. Sui, S. Tan, C. U. Pittman, J. Sun, and Z. Zhang, "Fast pyrolysis of four lignins from different isolation processes using Py-GC/MS," *Energies*, vol. 8, no. 6, pp. 5107–5121,

- 2015.
- [97] 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.
- [98] 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.
- [99] M. Olsson, "Wheat straw and peat for fuel pellets—organic compounds from combustion," *Biomass and Bioenergy*, vol. 30, no. 6, pp. 555–564, Jun. 2006.
- [100] H. Liu, L. Su, Y. Shao, and L. Zou, "Biodiesel production catalyzed by cinder supported CaO/KF particle catalyst," *Fuel*, vol. 97, pp. 651–657, Jul. 2012.
- [101] G. Dorez, L. Ferry, R. Sonnier, A. Taguet, and J.-M. Lopez-Cuesta, "Effect of cellulose, hemicellulose and lignin contents on pyrolysis and combustion of natural fibers," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 107, pp. 323–331, 2014.
- [102] E. Daouk, L. Van de Steene, F. Paviet, 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.
- [103] T. Nocquet, C. Dupont, J. Commandre, M. Grateau, S. Thiery, and S. Salvador, "Volatile species release during torrefaction of wood and its macromolecular constituents: Part 1 – Experimental study," *Energy*, vol. 72, pp. 180–187, Aug. 2014.
- [104] H. Kawamoto, H. Morisaki, and S. Saka, "Secondary decomposition of levoglucosan in pyrolytic production from cellulosic biomass," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 85, no. 1–2, pp. 247–251, 2009.
- [105] N. Liu, B. Wang, and W. Fan, "Kinetic compensation effect in the thermal decomposition of biomass in air atmosphere," *Fire Saf. Sci.*, vol. 7, pp. 581–592, 2003.
- [106] S. Zhao, Y. Luo, Y. Su, Y. Zhang, and Y. Long, "Experimental investigation of the oxidative pyrolysis mechanism of pinewood on a fixed-bed reactor," *Energy and Fuels*, vol. 28, no. 8, pp. 5049–5056, 2014.
- [107] X. Zhang, W. Yang, and C. Dong, "Levoglucosan formation mechanisms during cellulose pyrolysis," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 104, pp. 19–27, 2013.
- [108] X. Zhang, W. Yang, and W. Blasiak, "Thermal decomposition mechanism of levoglucosan during cellulose pyrolysis," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 96, pp. 110–119, 2012.
- [109] X. Zhang, W. Yang, and W. Blasiak, "Kinetics study on thermal dissociation of levoglucosan during cellulose pyrolysis," *Fuel*, vol. 109, pp. 476–483, 2013.
- [110] 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.
- [111] M. Milhé, L. van de Steene, M. Haube, J.-M. Commandré, W.-F. Fassinou, and G. Flamant, "Autothermal and allothermal pyrolysis in a continuous fixed bed reactor," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 103, pp. 102–111, Sep. 2013.
- [112] A. V. Talantov, *The theory of combustion*, In Russian., vol. 1. Kazan, Russia: Kazan Aviation Institute, 1975.
- [113] F. A. Williams, *Combustion Theory: The Fundamental Theory of Chemically Reacting Flow Systems*, 2nd ed. California, USA: The Benjamin/Cummings Publishing Company, 1985.
- [114] C. W. Hand and G. B. Kistiakowsky, "Ionization accompanying the acetylene-oxygen reaction in shock waves," *J. Chem. Phys.*, vol. 37, no. 6, pp. 1239–1245, 1962.
- [115] C. S. T. Marques, L. H. Benvenuti, and C. A. Bertran, "Kinetic modeling for chemiluminescent radicals in acetylene combustion," *J. Braz. Chem. Soc.*, vol. 17, no. 2, pp.



- 302–315, 2006.
- [116] A. J. C. Nicholson and D. L. Swingle, “Ion formation in the flame ionization detector,” *Combust. Flame*, vol. 39, pp. 43–52, 1980.
- [117] R. Hedef, K. P. Geigle, W. Meier, and M. Aigner, “Soot characterization with laser-induced incandescence applied to a laminar premixed ethylene-air flame,” *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 49, no. 8, pp. 1457–1467, 2010.
- [118] 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.
- [119] H. Bladh *et al.*, “Probing the smallest soot particles in low-sooting premixed flames using laser-induced incandescence,” *Proc. Combust. Inst.*, vol. 35, no. 2, pp. 1843–1850, 2015.
- [120] F. A. Williams, *The Mathematics of Combustion*. Illinois: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1985.
- [121] A. Tohidi, M. J. Gollner, and H. Xiao, “Fire Whirls,” *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 50, no. 1, pp. 187–213, 2017.
- [122] Ö. L. Gülder, “AER 1304 - Fundamentals of combustion: Graduate level course,” Toronto, 2008.
- [123] C. K. Law, “Propagation, structure, and limit phenomena of laminar flames at elevated pressures,” *Combust. Sci. Technol.*, vol. 178, no. 1–3, pp. 335–360, Jan. 2006.
- [124] 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.
- [125] N. M. Marinov, C. K. Westbrook, and W. J. Pitz, “Detailed and global chemical kinetics model for hydrogen,” in *Transport phenomena in combustion*, 1996, vol. 1, no. October, pp. 118–129.
- [126] I. Barmina, R. Valdmanis, and M. Zake, “The effects of biomass co-gasification and co-firing on the development of combustion dynamics,” *Energy*, vol. 146, pp. 4–12, Mar. 2018.
- [127] I. Barmina *et al.*, “Electric field effect on the thermal decomposition and co-combustion of straw with solid fuel pellets,” *Energies*, vol. 12, no. 8, p. 1522, Apr. 2019.
- [128] 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.
- [129] F. L. Dryer and I. Glassman, “High-temperature oxidation of CO and CH<sub>4</sub>,” *Symp. Combust.*, vol. 14, no. 1, pp. 987–1003, 1973.
- [130] G. Mayuri, A. Konnov, R. J. M. Bastiaans, and L. P. H. de Goey, “Updated (high H<sub>2</sub> / CO contents) Kinetic Mechanisms,” Eindhoven, The Netherlands, 2008.
- [131] J. P. Senosiain, C. B. Musgrave, and D. M. Golden, “Temperature and pressure dependence of the reaction of OH and CO: Master equation modeling on a high-level potential energy surface,” *Int. J. Chem. Kinet.*, vol. 35, no. 9, pp. 464–474, 2003.
- [132] M. L. de Souza-Santos, *Solid fuels combustion and gasification*, 2nd ed. New York: CRC Press, 2010.
- [133] K. Svoboda, M. Hartman, and J. Cermák, “Combustion Mechanisms — Solid Phase,” *Pollut. from Combust.*, pp. 35–50, 2012.
- [134] 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.
- [135] 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. October

- 2016, pp. 410–431, 2017.
- [136] A. N. Hayhurst and M. S. Parmar, “Does solid carbon burn in oxygen to give the gaseous intermediate CO or produce CO<sub>2</sub> directly? Some experiments in a hot bed of sand fluidized by air,” *Chem. Eng. Sci.*, vol. 53, no. 3, pp. 427–438, 1998.
- [137] H. Marsh and K. Kuo, “Kinetics and catalysis of carbon gasification,” in *Introduction to Carbon Science*, Newcastle, UK: Elsevier, 1989, pp. 107–151.
- [138] A. Fialkov, “Investigations on ions in flames,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 23, no. 5–6, pp. 399–528, 1997.
- [139] H. F. Calcote, “Mechanisms for the formation of ions in flames,” *Combust. Flame*, vol. 1, no. 4, pp. 385–403, 1957.
- [140] H. Zhang, “Numerical combustion of commercial fuels and soot formation,” The University of Utah, 2005.
- [141] P. Glarborg, J. A. Miller, and R. J. Kee, “Kinetic modeling and sensitivity analysis of nitrogen oxide formation in well-stirred reactors,” *Combust. Flame*, vol. 65, no. 2, pp. 177–202, 1986.
- [142] 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].
- [143] P. Saxena and F. A. Williams, “Testing a small detailed chemical-kinetic mechanism for the combustion of hydrogen and carbon monoxide,” *Combust. Flame*, vol. 145, no. 1–2, pp. 316–323, 2006.
- [144] G. Zhou, “Analytical studies of methane combustion and the production of hydrogen and/or synthesis gas by the uncatalyzed partial oxidation of methane,” University of Calgary, 1993.
- [145] 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.
- [146] J. Warnatz, U. Maas, and R. W. Dibble, *Combustion. Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation*, Russian Tr. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1996.
- [147] F. Battin-Leclerc *et al.*, “Towards cleaner combustion engines through groundbreaking detailed chemical kinetic models,” *Chem. Soc. Rev.*, vol. 40, no. 9, p. 4762, Jan. 2011.
- [148] Q. Zhang, Y. Li, Z. Tian, T. Zhang, J. Wang, and F. Qi, “Experimental study of premixed stoichiometric ethylene/oxygen/argon flame,” *Chinese J. Chem. Phys.*, vol. 19, no. 5, pp. 379–385, 2011.
- [149] R. M. Fristrom and A. A. Westenberg, *Flame structure*, Russian Tr. Moscow: Metallurgizdat, 1969.
- [150] Y. V. Krizhanovsky and V. N. Krizhanovsky, *Combustion chambers for jet propulsion engines: international series of monographs in aeronautics and astronautics*. Kyiv: Education of Ukraine, 2012.
- [151] V. S. Zuyev and L. S. Skubachevskii, *Combustion Chambers for Jet Propulsion Engines: International Series of Monographs in Aeronautics and Astronautics*, 5th ed. Burlington: Elsevier Science, 2013.
- [152] A. K. Gupta, D. G. Lilley, and N. Syred, *Swirl Flows*, Russian Translation. Moscow: Mir, 1987.
- [153] Y. B. Zeldovich, *Selected Works of Yakov Borisovich Zeldovich, Volume I*, Russian Tr. Moscow: Nauka, 1992.
- [154] Cardiff University Gas Turbine Research Centre, “Flame Speed Measurement Technique,” 2011. [Online]. Available: <http://www.cardiffuniversity-gasturbineresearchcentre.co.uk/content/25>. [Accessed: 15-Oct-2019].

- [155] ENERKOS Industries, “The automatic pellet burner,” 2019. [Online]. Available: <http://www.enerkos.it/en/enerkos-industries-production-of-ecological-heating-systems-hydronic-wood-and-pellets-fireplaces-stove-cooker-pellets-burner/p-6-pellets-burner-the-automatic-pellet-burner.html>. [Accessed: 16-Oct-2019].
- [156] Ecotec SWEDEN AB, “Technical data Bioline 20-25 - Pellet burner from Ecotec,” 2017. [Online]. Available: <http://www.ecotec.net/bostad/sma-villor/bioline-20-25-pelletsbrannare/>. [Accessed: 02-Nov-2019].
- [157] “Pellet burner with rotary combustion chamber,” *BLAZE HARMONY s.r.o.*, 2019. [Online]. Available: <https://www.blazeharmony.com/en/www/pellet-burner>. [Accessed: 16-Oct-2019].
- [158] D. Littlejohn, A. J. Majeski, S. Tonse, C. Castaldini, and R. K. Cheng, “Laboratory investigation of an ultralow NO<sub>x</sub> premixed combustion concept for industrial boilers,” in *Proceedings of the Combustion Institute*, 2002, vol. 29, no. 1, pp. 1115–1121.
- [159] R. K. Cheng, “Ultra-Low Emissions Low-Swirl Burner,” *2015-11-17*, 2012. [Online]. Available: <http://energy.lbl.gov/aet/combustion/LSC-Info/>. [Accessed: 17-Nov-2015].
- [160] 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.
- [161] P. Weigand, W. Meier, X. R. Duan, W. Stricker, and M. Aigner, “Investigations of swirl flames in a gas turbine model combustor,” *Combust. Flame*, vol. 144, no. 1–2, pp. 205–224, 2006.
- [162] C. Kulsheimer and H. Büchner, “Combustion dynamics of turbulent swirling flames,” *Combust. Flame*, vol. 131, no. 1–2, pp. 70–84, Oct. 2002.
- [163] T. Poinso and J. Dombard, “Experimental and numerical study of the influence of small geometrical modifications on the dynamics of swirling flows,” *Cent. Turbul. Res. Proc. Summer Progr.*, 2012.
- [164] Y. Wang, “A numerical study of combustion in meso-scale vortex chambers,” The Pennsylvania State University, 2006.
- [165] N. Syred, “A review of oscillation mechanisms and the role of the precessing vortex core (PVC) in swirl combustion systems,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 32, no. 2, pp. 93–161, Jan. 2006.
- [166] I. Barmina, R. Valdmanis, and M. Zaķe, “Control of the development of swirling airflow dynamics and its impact on biomass combustion characteristics,” *Latv. J. Phys. Tech. Sci.*, vol. 54, no. 3, pp. 30–39, 2017.
- [167] M. Abricka, I. Barmina, R. Valdmanis, and M. Zake, “Experimental and numerical study of swirling flows and flame dynamics,” *Latv. J. Phys. Tech. Sci.*, vol. 51, no. 4, pp. 25–40, 2014.
- [168] M. Zaķe, I. Barmina, V. Krishko, M. Gedrovics, and A. Desņickis, “Experimental study of the combustion dynamics of renewable fossil fuel co-fire in swirling flame,” *Latv. J. Phys. Tech. Sci.*, vol. 46, no. 6, pp. 3–14, Jan. 2009.
- [169] J. M. Burgers, “A mathematical model illustrating the theory of turbulence,” in *Advances in Applied Mechanics*, vol. 1, Delft, Holland: Elsevier Science, 1948, pp. 171–199.
- [170] J. M. Forthofer and S. L. Goodrick, “Review of vortices in wildland fire,” *J. Combust.*, vol. 2011, pp. 1–14, 2011.
- [171] C. C. Simpson, J. J. Sharples, and J. P. Evans, “Sensitivity of atypical lateral fire spread to wind and slope,” *Geophys. Res. Lett.*, vol. 43, no. 4, pp. 1744–1751, Feb. 2016.
- [172] J. J. Sharples, A. E. Kiss, J. Raposo, D. X. Viegas, and C. C. Simpson, “Pyrogenic vorticity

- from windward and lee slope fires,” *MODSIM2015, 21st Int. Congr. Model. Simul.*, pp. 291–297, 2015.
- [173] J. M. Goodings, D. K. Bohme, and C. W. Ng, “Detailed ion chemistry in methane–oxygen flames. II. Negative ions,” *Combust. Flame*, vol. 36, pp. 45–62, Jan. 1979.
- [174] J. M. Goodings, D. K. Bohme, and C.-W. Ng, “Detailed ion chemistry in methane–oxygen flames. I. Positive ions,” *Combust. Flame*, vol. 36, pp. 27–43, Jan. 1979.
- [175] H. F. Calcote, “Ion and electron profiles in flames,” *Symp. Combust.*, vol. 9, no. 1, pp. 622–637, 1963.
- [176] 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.
- [177] 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.
- [178] J. M. Rodrigues *et al.*, “Evolution of charged species in propane/air flames: Mass-spectrometric analysis and modelling,” *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. 16, no. 1, pp. 161–172, 2007.
- [179] D. K. Böhme, “Ion-molecule reactions in mass spectrometry,” *Encycl. Spectrosc. Spectrom.*, no. October 2013, pp. 338–346, 2016.
- [180] T. M. Sugden, “Elementary combustion reactions. Charged species,” *Symp. Combust.*, vol. 10, no. 1, pp. 539–544, 1965.
- [181] A. Engel and M. Steenbeck, *The physics and technique of electrical discharge in gases*, Russian Tr., vol. 2. Moscow: ONTI NKTP, 1936.
- [182] E. M. Stepanov and B. G. D’yachkov, *Ionization in Flames — The Electric Field*, In Russian. Moscow: Metallurgizdat, 1968.
- [183] 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.
- [184] C. Vinckier, M. P. Gardner, and K. D. Bayes, “A study of some primary and secondary chemi-ionization reactions in hydrocarbon oxidations,” *Symp. Combust.*, vol. 16, no. 1, pp. 881–889, 1977.
- [185] H. F. Calcote, S. C. Kurzius, and W. J. Miller, “Negative and secondary ion formation in low-pressure flames,” *Symp. Combust.*, vol. 10, no. 1, pp. 605–619, Jan. 1965.
- [186] 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.
- [187] A. B. Fialkov and B. S. Fialkov, “Experimental determination of primary and intermediate ions in a flame front,” *Combust. Explos. Shock Waves*, vol. 24, no. 5, pp. 569–575, 1989.
- [188] A. T. Blades, “Ion formation in hydrocarbon flames,” *Can. J. Chem.*, vol. 54, no. 18, pp. 2919–2924, Sep. 1976.
- [189] 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.
- [190] 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.
- [191] T. Pedersen and R. C. Brown, “Simulation of electric field effects in premixed methane flames,” *Combust. Flame*, vol. 94, no. 4, pp. 433–448, Sep. 1993.
- [192] H. Egsgaard and L. Carlsen, “The C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> chemi-ion. Acetyl cation or O-protonated ketene?,” *Chem. Phys. Lett.*, vol. 236, no. 1–2, pp. 78–82, Apr. 1995.
- [193] 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.
- [194] P. Gerhardt, K. H. Homann, S. Löffler, and H. Wolf, “Large ionic species in sooting acetylene and benzene flames,” in *20th Symposium (International) on Combustion*, 1988, pp. 1121–1128.
- [195] J. Guo, J. M. Goodings, A. N. Hayhurst, and S. G. Taylor, “A simple method for measuring positive ion concentrations in flames and the calibration of a nebulizer/atomizer,” *Combust. Flame*, vol. 133, no. 3, pp. 335–343, 2003.
- [196] J. Vinogradov, E. Sher, I. Rutkevich, and M. Mond, “Voltage-current characteristics of a flame-assisted unipolar corona,” *Combust. Flame*, vol. 127, no. 1–2, pp. 2041–2050, 2001.
- [197] D. Boothman, J. Lawton, S. J. Melinek, and F. Weinberg, “Rates of ion generation in flames,” *Symp. Combust.*, vol. 12, no. 1, pp. 969–978, 1969.
- [198] 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.
- [199] H. F. Calcote, “Ions in Flames,” in *Ion-Molecule Reactions*, Boston, MA: Springer US, 1972, pp. 673–706.
- [200] 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.
- [201] R. T. Ball and J. B. Howard, “Electric charge of carbon particles in flames,” *Symp. Combust.*, vol. 13, no. 1, pp. 353–362, Jan. 1971.
- [202] V. S. Karnani, “Electric Field-driven flame dynamics,” University of California, Irvine, 2011.
- [203] D. C. Murphy, “The measurement and application of electric effects in combustion,” University of California, Berkeley, 2015.
- [204] J. A. Tinajero, “Dynamics of chemi-ion driven flows in an applied electric field,” University of California, 2014.
- [205] S. V. Jacobs, “A study of ion and electron responses to dc electric field in a premixed methane-air flame,” The University of Alabama, Huntsville, 2015.
- [206] R. J. Bowser and F. J. Weinberg, “The effect of direct electric fields on normal burning velocity,” *Combust. Flame*, vol. 18, no. 2, pp. 296–300, 1972.
- [207] 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.
- [208] P. R. Salvador and K. G. Xu, “Direct current forcing of an atmospheric multiburner flame for rocket combustor emulation,” *J. Spacecr. Rockets*, vol. 55, no. 1, pp. 223–231, 2017.
- [209] H. Duan *et al.*, “Effects of electric field intensity and distribution on flame propagation speed of  $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$  flames,” *Fuel*, vol. 158, pp. 807–815, 2015.
- [210] 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.
- [211] X. Wu, Z. Gao, D. Jiang, and Z. Huang, “Experimental investigation of the effect of electrodes on the ionization current during combustion,” *Energy and Fuels*, vol. 22, no. 5, pp. 2941–2947, 2008.
- [212] M. Ahmad, “Modeling and simulation of an electrostatic precipitator,” Linnaeus University, Småland, 2011.
- [213] J. A. Tinajero, “Flame dynamics and chemi-ion flows driven by applied electric fields,”

University of California, Irvine, 2017.

- [214] 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.
- [215] H. F. Calcote, "Electrical properties of flames," *Symp. Combust. Flame, Explos. Phenom.*, vol. 3, no. 1, pp. 245–253, 1948.
- [216] H. C. Bolton, J. Grant, I. G. McWilliam, A. J. C. Nicholson, and D. L. Swingler, "Ionization in flames. II. Mass-spectrometric and mobility Analyses for the flame ionization detector," *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 360, no. 1701, pp. 265–277, Mar. 1978.
- [217] 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.
- [218] 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.
- [219] 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.
- [220] T. Asakawa, "Effect of an electrical field on liquid fuel combustion processes," in *Combustion Questions*, Russian Tr., Moscow: Metallurgizdat, 1963, pp. 419–426.
- [221] F. Bisetti and M. El Morsli, "Kinetic parameters, collision rates, energy exchanges and transport coefficients of non-thermal electrons in premixed flames at sub-breakdown electric field strengths," *Combust. Theory Model.*, vol. 18, no. 1, pp. 148–184, Jan. 2014.
- [222] 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.
- [223] 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.
- [224] J. Fang, X. Wu, H. Duan, C. Li, and Z. Gao, "Effects of electric fields on the combustion characteristics of lean burn methane-air mixtures," *Energies*, vol. 8, no. 4, pp. 2587–2605, 2015.
- [225] D. A. Yagodnikov and A. V. Voronetskii, "Effect of an external electrical field on ignition and combustion processes," *Combust. Explos. Shock Waves*, vol. 30, no. 3, pp. 261–268, May 1994.
- [226] P. J. Mayo and F. J. Weinberg, "On the size, charge and number-rate of formation of carbon particles in flames subjected to electric fields," *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 319, no. 1538, pp. 351–371, 1970.
- [227] 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.
- [228] D. A. Yagodnikov, "Investigation of the effect of electric field on the characteristics of heat transfer in a combustion chamber with a porous cooling flow Train," *High Temp.*, vol. 39, pp. 733–738, 2001.
- [229] W. Grassi and D. Testi, "Heat transfer enhancement by electric fields in several heat exchange regimes," *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, vol. 1077, no. 1, pp. 527–569, Sep. 2006.
- [230] D. A. Nelson and E. J. Shaughnessy, "Electric field effects on natural convection in enclosures," *J. Heat Transfer*, vol. 108, no. 4, p. 749, 1986.
- [231] I. Barmina, A. Kolmickovs, R. Valdmanis, and M. Zake, "Electrodynamic control of combustion dynamics and swirling flame structure at thermochemical conversion of

- biomass,” in *Baltic Heat Transfer Conference*, 2015, pp. 169–174.
- [232] I. Barmina, A. Kolmickovs, R. Valdmanis, and M. Zake, “Combustion dynamics of swirling flame at thermochemical conversion of biomass,” *Chem. Eng. Trans.*, vol. 43, 2015.
- [233] 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.
- [234] M. Zaķe, I. Barmina, D. Turlajs, M. Lubane, and A. Krumiņa, “Swirling flame. Part 2. Electric field effect on the soot formation and greenhouse emissions,” *Magnetohydrodynamics*, vol. 40, no. 2, pp. 183–202, 2004.
- [235] 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.
- [236] A. F. Pantelev, G. A. Popkov, and Y. N. Shebeko, “Effect of an electric field on the vaporization and burning of combustible liquids,” *Combust. Explos. Shock Waves*, vol. 28, no. 3, pp. 242–244, 1992.
- [237] J. E. Mitchell and F. J. Wright, “Effects in diffusion flames by radial electric fields,” *Combust. Flame*, vol. 13, no. 4, pp. 413–418, Aug. 1969.
- [238] M. Zake, I. Barmina, A. Kolmickovs, and R. Valdmanis, “Electric field impact on the biomass gasification and combustion dynamics,” *Int. J. Chem. Mol. Nucl. Mater. Metall. Eng.*, vol. 9, no. 7, pp. 793–799, 2015.
- [239] I. Barmina, A. Kolmickovs, R. Valdmanis, and M. Zake, “Control of combustion dynamics by an electric field,” *Chem. Eng. Trans.*, vol. 43, 2015.
- [240] 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.
- [241] Y. Wang, X. Wang, and V. Yang, “Evolution and transition mechanisms of internal swirling flows with tangential entry,” *Phys. Fluids*, vol. 30, no. 1, 2018.
- [242] K. A. Hartl, “Experimental Investigation of Laboratory Fire Whirls,” Princeton University, Princeton, 2016.
- [243] A. Friedl, E. Padouvas, H. Rotter, and K. Varmuza, “Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition,” *Anal. Chim. Acta*, vol. 544, no. 1–2, pp. 191–198, Jul. 2005.
- [244] 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.
- [245] T. S. & C. KGaA, “testo 435 Multifunction velocity/air flow meter.” [Online]. Available: <https://www.testo.com/en-US/testo-435-1/p/0560-4351>. [Accessed: 14-Aug-2019].
- [246] O. B. Козлов, *Электрический зонд в плазме*. Москва: Атомиздат, 1969.
- [247] Testo SE & Co. KGaA, “testo 350 - analyzer unit for flue gas analysis system | Testo Ltd.” [Online]. Available: <https://www.testo.com/en-UK/testo-350/p/0632-3510>. [Accessed: 16-Aug-2019].
- [248] D. I. Eremin and A. A. Akhtyamova, “Chemical composition of crop residues grown on different soil fertility background in forest-steppe zone of trans-urals,” *Vestn. KrasGAU*, no. 2, pp. 32–38, 2017.
- [249] 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.
- [250] C. Sosat and H. B. Schlegel, “Calculated Barrier Heights for OH C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> and OH C<sub>2</sub>H, Using

- Unrestricted Merller-Plesset Perturbation Theory with Spin Annihilation,” *J. Am. Chem. SOC*, no. 109, pp. 4193–4198, 1987.
- [251] L. Liu, Y. Li, and J. M. Farrar, “Dynamics study of the reaction  $\text{OH}^- + \text{C}_2\text{H}_2 \rightarrow \text{C}_2\text{H}^- + \text{H}_2\text{O}$  with crossed beams and density-functional theory calculations,” *J. Chem. Phys.*, vol. 124, no. 12, p. 124317, 2006.
- [252] V. Hoffmann *et al.*, “Conductive carbon materials from the hydrothermal carbonization of vineyard residues for the application in electrochemical double-layer capacitors (EDLCs) and direct carbon fuel cells (DCFCs),” *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 10, p. 1703, May 2019.
- [253] C. A. Balanis, J. L. Jeffrey, and Y. K. Yoon, “Electrical properties of eastern bituminous coal as a function of frequency, polarization and direction of the electromagnetic wave, and temperature of the sample,” *IEEE Trans. Geosci. Electron.*, vol. 16, no. 4, pp. 316–323, Oct. 1978.
- [254] I. Barmina, D. Turlajs, and M. Zake, “Electric field effects on the swirling combustion dynamics,” *HEAT POWER Therm. Phys.*, vol. 1, pp. 39–46, 2008.
- [255] V. L. A. Ricchiuti, “OpenFOAM simulations of impinging coflow flames, including chemionization and electric field,” University of California, Irvine, 2016.
- [256] 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.
- [257] J. Friend, “The chemistry of combustion processes,” in *ACS Symposium Series, FOREWORD*, vol. 249, M. J. Comstock, Ed. American Chemical Society, 1983, pp. 360–392.
- [258] Tektronix Inc, “Keithley 2290 Series.” [Online]. Available: <https://www.tek.com/tektronix-and-keithley-dc-power-supplies/keithley-2290-series>. [Accessed: 24-Jan-2020].
- [259] F.u.G. Elektronik GmbH, “Compact DC-High Voltage Power Supplies.” [Online]. Available: <https://www.fug-elektronik.de/netzgeraete/basic-series/?lang=en>. [Accessed: 24-Jan-2020].
- [260] DSC-Electronics Germany GmbH, “DP-PH series high-voltage laboratory power supplies.” [Online]. Available: [https://dsc-electronics.com/products/dc-laboratory-power-supplies/dp-ph-series/?gclid=Cj0KCQjw17nYBRCwARIsAL7O7dE\\_3PU4V4cWfH1F\\_Zs\\_S6DzByaEFJ3zj5dJ36D7ODOeQ49DrZRZbwQaAs40EALw\\_wcB](https://dsc-electronics.com/products/dc-laboratory-power-supplies/dp-ph-series/?gclid=Cj0KCQjw17nYBRCwARIsAL7O7dE_3PU4V4cWfH1F_Zs_S6DzByaEFJ3zj5dJ36D7ODOeQ49DrZRZbwQaAs40EALw_wcB). [Accessed: 24-Jan-2020].
- [261] T&M Atlantic Inc., “APS-1915 DC Power Supply 5kV / 10mA 1 Channel.” [Online]. Available: [http://www.aktakom.com/products/index.php?SECTION\\_ID=493&ELEMENT\\_ID=32882](http://www.aktakom.com/products/index.php?SECTION_ID=493&ELEMENT_ID=32882). [Accessed: 25-Jan-2020].
- [262] ARGUS SIA, “W4-NICR80/20-267; Nihroma stieple 2.67mm 0.82R/m.” [Online]. Available: <http://www.argus.lv/shop/productinfo/A042512>. [Accessed: 25-Jan-2020].
- [263] Latvijas Universitāte, “Latvijas Universitātes organizētā iepirkuma „Metālu un to izstrādājumu piegāde” NOLIKUMS Nr. LU 2018/9\_I,” Rīga, 2018.
- [264] Keramserviss SIA, “Tehniskā keramika.” [Online]. Available: <http://keramserviss.lv/public/index.php?lang=lv&section=65>. [Accessed: 25-Jan-2020].
- [265] Muita un valsts robeža; Administratīvā atbildība; Valsts robeža, “Muitas likums,” *Latvijas Vēstnesis*, 2016. [Online]. Available: <https://likumi.lv/ta/id/283024-muitas-likums>. [Accessed: 25-Jan-2020].
- [266] Valsts Ieņēmumu Dienests, “Valsts sociālās apdrošināšanas obligāto iemaksu likmes,”



- Latvijas Vēstnesis*, 2018. [Online]. Available: <https://www.vid.lv/vsaoi-likmes.html>. [Accessed: 25-Jan-2020].
- [267] Latvijas Republika, "Pievienotās vērtības nodokļa likums," *Latvijas Vēstnesis*, 2012. [Online]. Available: <https://likumi.lv/ta/id/253451>. [Accessed: 25-Jan-2020].
- [268] SIA Ernst & Young Baltic, "Izmaksu pamatotības un sadārdzinājuma riska novērtēšanas metodoloģija," Rīga, 2008.
- [269] SIA STAĻI, "Staļi - Premium kvalitātes kokskaidu granulas," 2016. [Online]. Available: <https://www.stali.lv/lv/granulas>. [Accessed: 25-Jan-2020].
- [270] SIA Latgales Granulas, "Kvalitatīvas ENplus - A1 standarta koksnes granulas," 2018. [Online]. Available: <http://www.latgalesgranulas.lv/cenas>. [Accessed: 25-Jan-2020].
- [271] SIA RaWood Rīga, "Rawood GRANULAS," 2020. [Online]. Available: <http://rawood.lv/lv/product-view/1488732157-granulas-15kg>. [Accessed: 25-Jan-2020].
- [272] Kurzemes granulas LTD, "Granulu realizācijas cenas," 2019. [Online]. Available: <http://granulas.lv/cenas/>.
- [273] SIA Mans dārzs, "Mans Darzs Granulas," 2019. [Online]. Available: <http://mansdarzs.lv/lv/granulas/>. [Accessed: 25-Jan-2020].
- [274] 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.
- [275] J. Peeters and G. Mahnen, "Reaction mechanisms and rate constants of elementary steps in methane-oxygen flames," *Symp. Combust.*, vol. 14, no. 1, pp. 133–146, Jan. 1973.
- [276] J. W. Hastie, "Mass spectrometric studies of flame inhibition: Analysis of antimony trihalides in flames," *Combust. Flame*, vol. 21, no. 1, pp. 49–54, Aug. 1973.
- [277] H. C. Bolton and I. G. McWilliam, "Current-voltage relationships for the flame ionization detector," *Proc. R. Soc. London. Ser. A, Math. Phys. Sci.*, vol. 321, no. 1546, pp. 361–380, 1971.

**PIELIKUMI**

## 1. pielikums

**Promocijas darba salīdzinājums ar citu autoru nozarē veiktajiem pētījumiem pēc galvenajiem pētījuma ieejas parametriem.**

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

\* zema < 1 kV·cm<sup>-1</sup>; vidēja E' ≈ [1; 6] kV·cm<sup>-1</sup>; augsta > 6 kV·cm<sup>-1</sup>

Atzinums par plānotā pētījuma nozīmību attiecīgās nozares attīstībai.

**Eiropas Reģionālā attīstības fonda projekta iesniegums 1.1.1.1. pasākumam  
"Praktiskas ievirzes pētījumi"**

Projekts „Biomases kombinēto degšanas procesu pētījumi un elektrodinamiskā vadība ekoloģiski tīrai un efektīvai enerģijas ražošanai”

<b>1. Atzinuma sniedzējinstāncijas nosaukums:</b>	<b>Latvijas Kokrūpniecības Federācija</b> Reģ. Nr. 40008053294
<i>(instāncijas nosaukums, reģistrācijas Nr.)</i>	
<b>1.2. Atzinuma sniedzējinstāncijas adrese un kontaktinformācija:</b>	
<b>Skaistkalnes iela 1, Rīga, LV- 1004</b>	
<i>(iela, mājas nosaukums, Nr./ dzīvokļa Nr., pilsēta, novads, pasta indekss)</i>	
<b>Kristaps Klauvs, izpilddirektors, tel.:67067371, kristaps.klauvs@latvianwood.lv</b>	
<i>(kontaktpersonas vārds, uzvārds, ieviejamais amats, tālrunis, e-pasts)</i>	
<b>1.3. Informācija par atzinuma sniedzējinstāncijas biedriem un to kopēja apgrozījumu pēdējā noslēgtā pārskata gadā: biedru kopējais apgrozījums pārsniedz 1,7 miljardus; 5 no lielākajiem biedriem:</b>	
<b>AS"Latvijas Finieris" 193 milj/Euro;</b>	
<b>SIA"PATA AB" 149 milj/Euro; SIA"Vika wood" 59 milj/Euro;</b>	
<b>SIA"Latgran" 73 milj/Euro; SIA"Graanul Invest" 32 milj/Euro</b>	
<b>1.4. Biedrības mājas lapas adrese: www.latvianwood.lv</b>	
<b>2. Atzinuma saņēmējinstāncijas nosaukums:</b>	<b>Latvijas Universitāte</b>
<i>(instāncijas nosaukums)</i>	
<b>2.2. Reģistrācijas numurs: 90000076669</b>	
<b>2.3. Adrese: Raiņu bulvāris 19</b>	
<i>(iela, mājas nr., dzīvokļa nr., pilsēta, novads)</i>	
<b>Maija Zake, phone:+371 29891137, m.zake@sal.lv, maija.zake@lu.lv</b>	
<i>(kontaktinformācija – tālrunis, e-pasts)</i>	
<b>3. Atzinuma sniegšanas datums:</b>	<b>16.05.2016</b>
<b>4. Atzinums par pētījuma nozīmību attiecīgās nozares vai konkrēta viena vai vairāku komersantu attīstībai, ievērojot Latvijas viedās specializācijas stratēģijas mērķus un izaugsmes prioritātes.</b>	
<b>4.1. Nozares NACE2 kods</b>	<b>Atzinuma teksts:</b> <b>Plānotais pētījums ir nozīmīgs kopējās nozares attīstībā saistībā ar kokapstrādes un mežizstrādes, kā arī lauksaimniecības atlikumu izmantošanas paplašināšanu siltumenerģētikā, īpaši granulētas biomasas ražošanas izejvielu bāzes paplašināšanā un granulū izmantošanā.</b>
<b>4.2. Komersanta NACE2 kods</b>	<b>Nozares kodī: A02; C16; C31;</b>

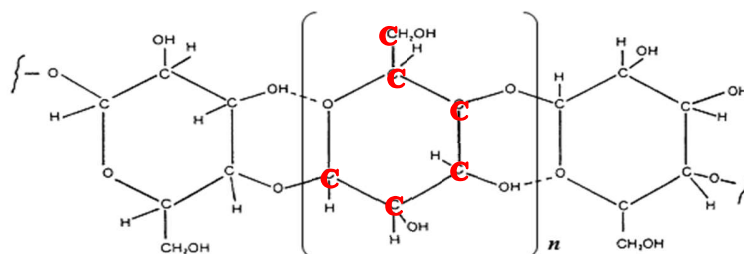
Atzinuma sniedzējs,

Atbildīgā persona




Paraksts un zīmogs

## 3. pielikums



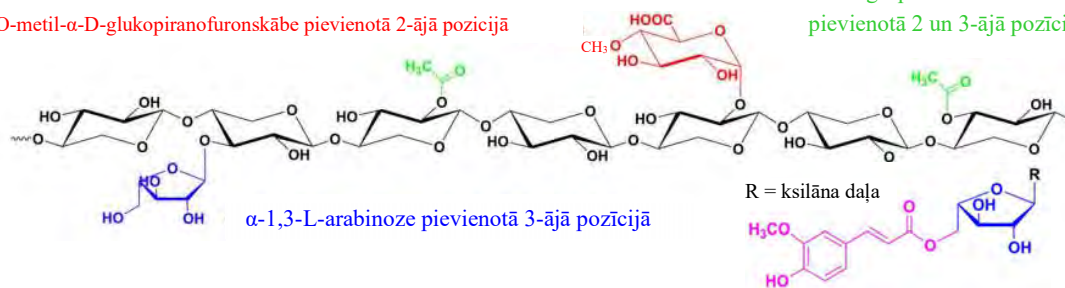
1. att. Celulozes struktūra [15], [30].

## A – Gluko-urono-arabino-ksilāns / arabino-gluko-urono-ksilāns

4-O-metil- $\alpha$ -D-glukopirano-furonskābe pievienotā 2-ājā pozīcijā

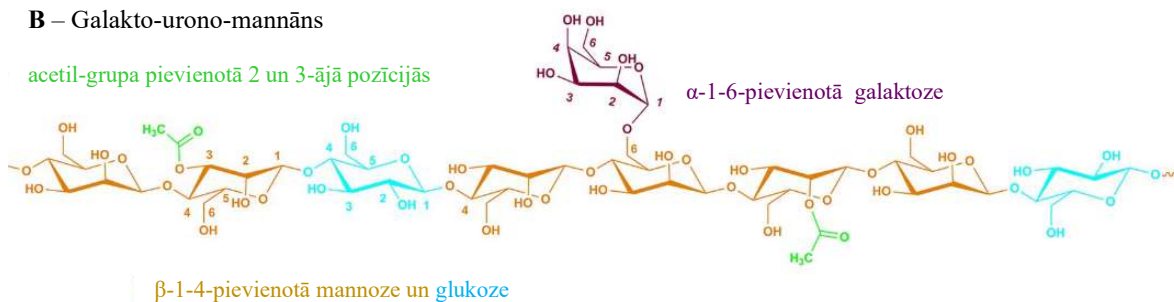
acetil-grupa

pievienotā 2 un 3-ājā pozīcijās



## B – Galakto-urono-mannāns

acetil-grupa pievienotā 2 un 3-ājā pozīcijās

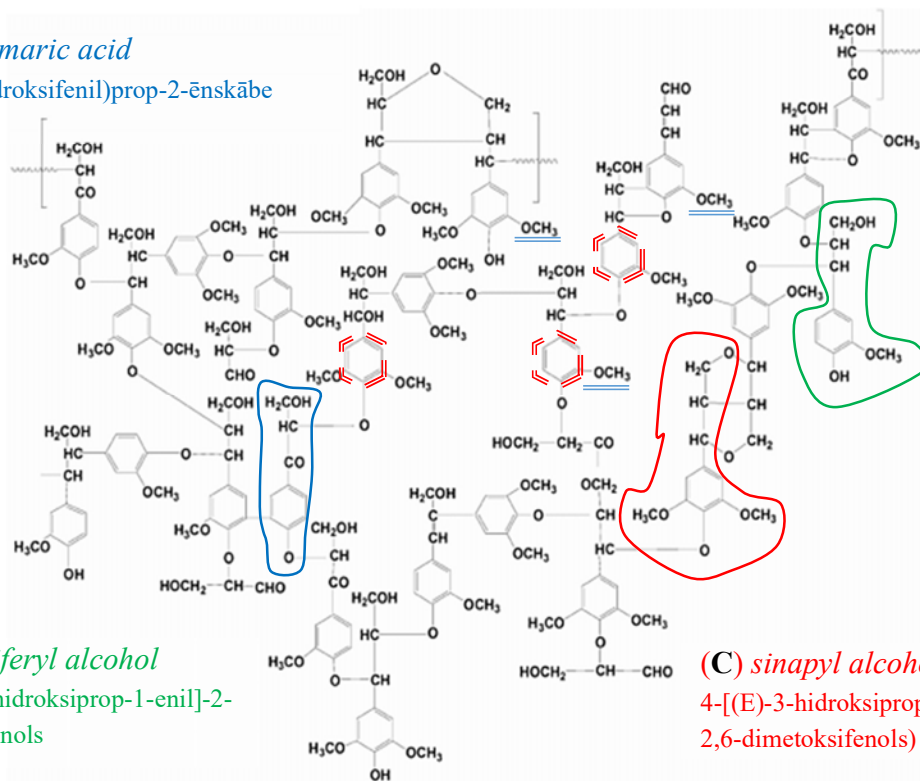
 $\alpha$ -1-6-pievienotā galaktoze

2. att. Salmu un koksnes hemicelulozes molekulas daļas struktūra [60].

## 3. pielikums

(A) *p*-coumaric acid

(E)-3-(4-hidroksifenil)prop-2-ēnskābe

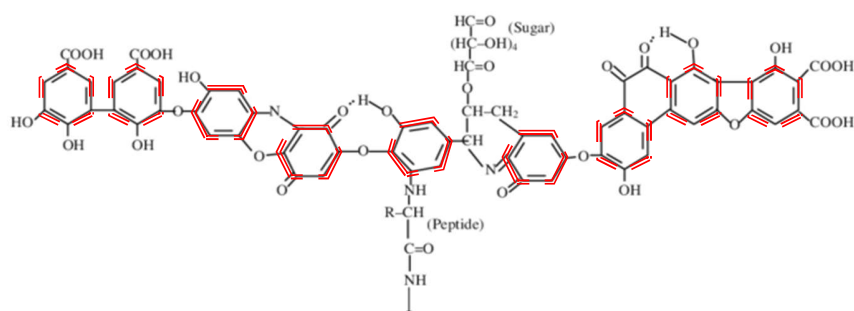
(B) *coniferyl alcohol*

4-[(E)-3-hidroksiprop-1-enil]-2-metoksifenols

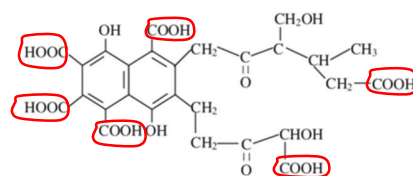
(C) *sinapyl alcohol*

4-[(E)-3-hidroksiprop-1-enil]-2,6-dimetoksifenols

3. att. Koksnes lignīna molekulas daļa pēc Freidenberga [66]–[68].



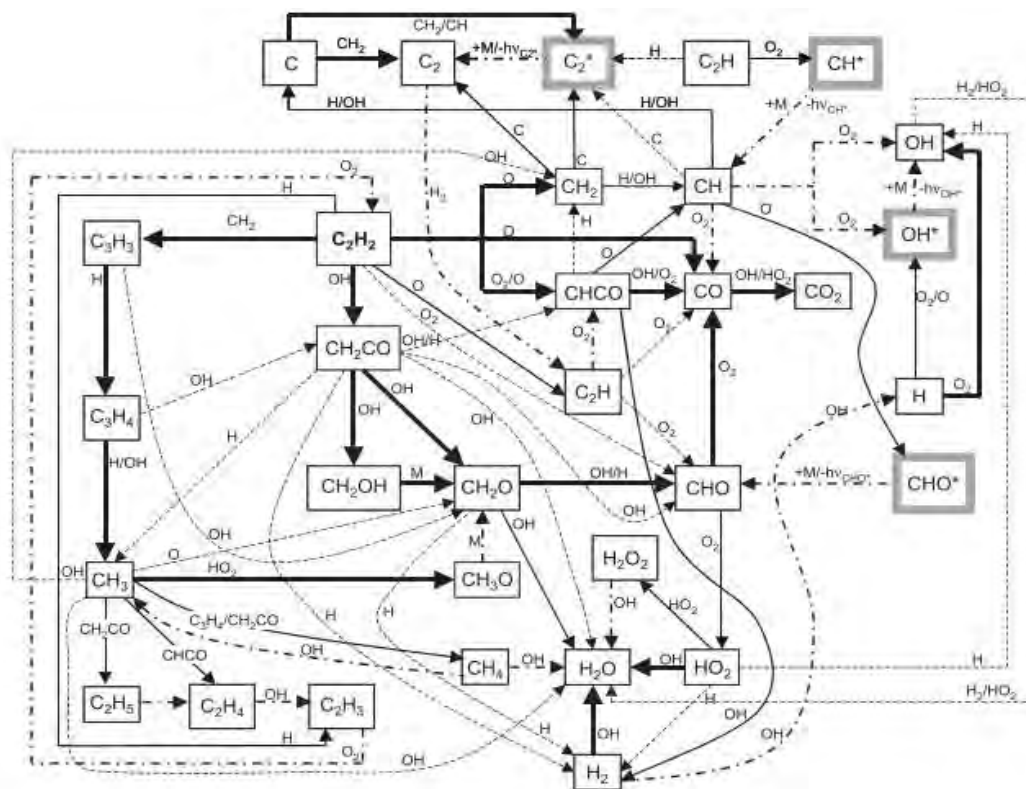
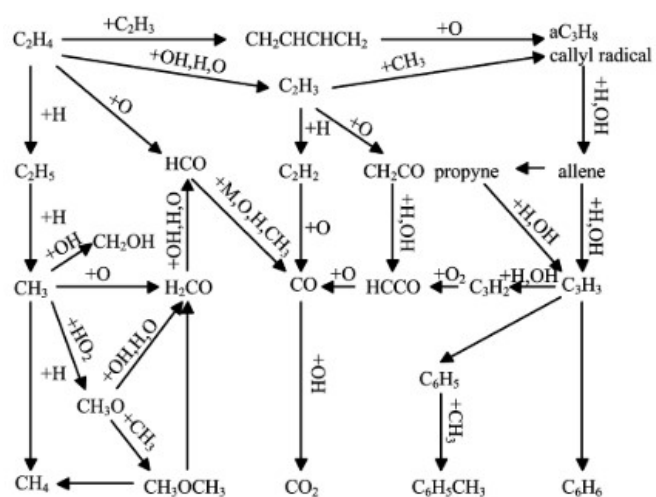
(A) humīnskābe (Stevenson 1982)



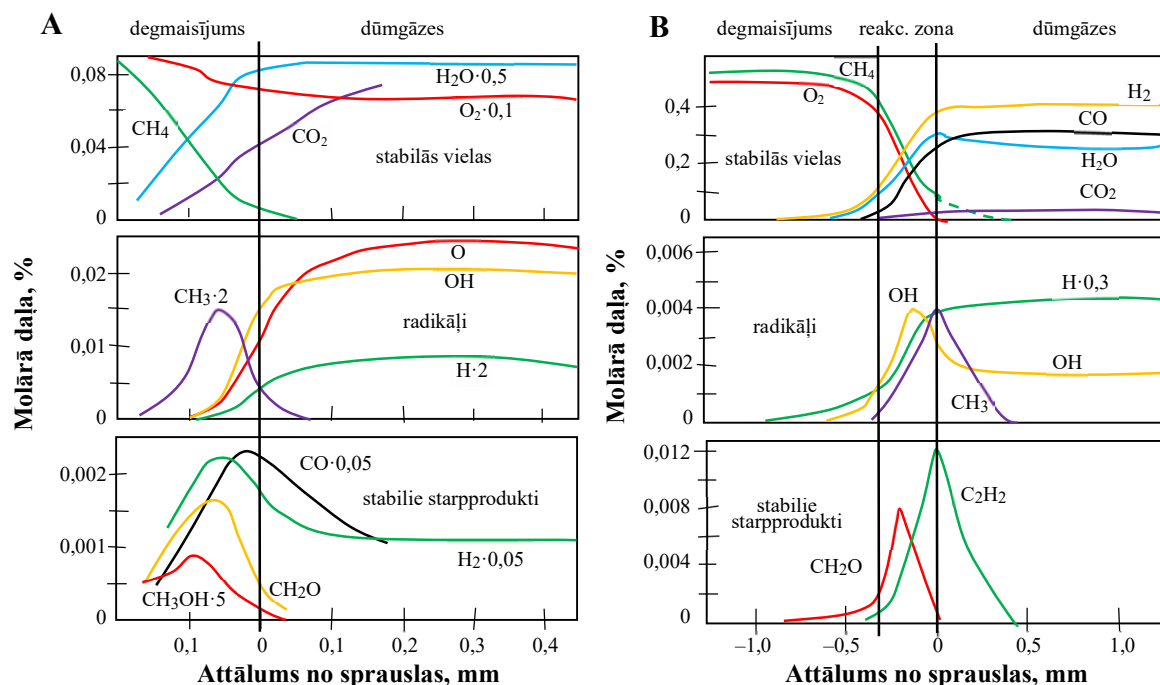
(B) fulvoskābe (Buffle 1977)

4. att. Humīnskābes un fulvoskābes hipotētiskā struktūra [274].

## 4. pielikums

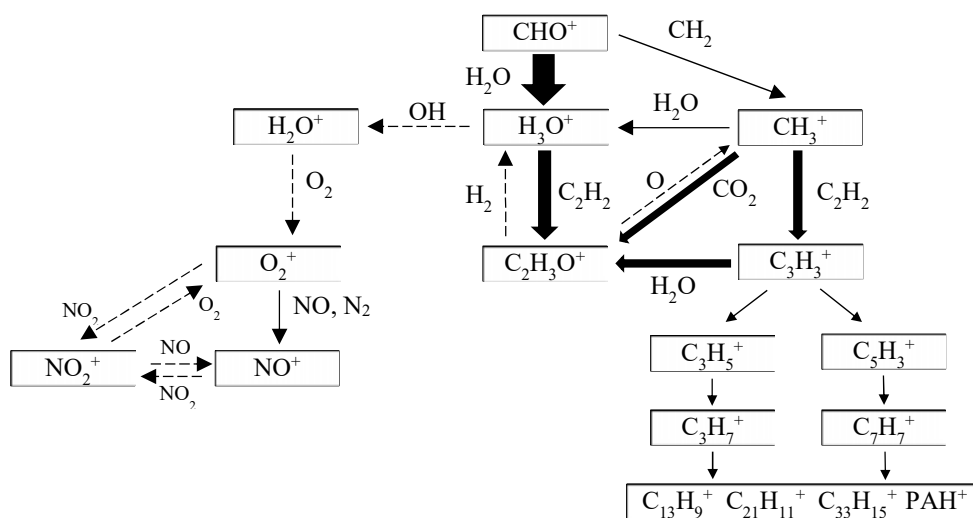
5. att. Acetilēna degšanas mehānisms gaisā ( $\alpha < 1$ ) [115].6. att. Etilēna degšanas mehānisms gaisā ( $\alpha < 1$ ) [148].

## 4. pielikums



7. att. Elektriski neitrālo vielu sadalījums metāna liesā (A) un treknajā (B) liesmā [275], [276]

## 5. pielikums



8. att. Stehiometriskās liesmas pozitīvo jonu veidošanas mehānisms [176], [190].

Shēmā ir apkopots pozitīvo jonu veidošanas mehānisms, kuru savas modelēšanas darbos piedāvāja Starik, Savelev un Titova [176], [190]. Lai gan mehānisms joprojām ir nepilnīgs, tās nosaka pozitīvo jonu veidošanas nozīmīgākus virzienus un kalpo kā mūsdienīga izpratne par



joniem stehiometriskā metāna degšanas procesā. Šis mehānisms saskan ar piedāvātām reakcijām, kurus publicēja *Vinckier et al.* [184] un *Eraslan et al.* [189] (86–93.reakc.), tomēr šis mehānisms nav pilnībā spējīgs prognozēt jonu veidošanas reakcijas un jonu daudzumu treknā degmaisiņumā.

## 6. pielikums

### Oglūdeņražu liesmas negatīvie joni

1970. gados, kad ar liesmas jonizācijas izmeklējumiem aktīvi nodarbojās *Lawton* un *Weinberg*, negatīvo jonu un to koncentrāciju identificēšana bija apgrūtināta, par ko liecināja pretrunīgie dati starp Langmuira zondes un masas spektrometrijas jonu mērījumiem [21]. Pašlaik vienprātība ir par to, ka lielāko daļu no negatīvā lādiņa liesmā rada elektroni, kuri veido gandrīz 90% no kopēja negatīvā lādiņa nesējiem [177]. *Calcote et al.* paskaidroja, ka tāds lādiņa sadalījums liesmā rodas, pateicoties augstam elektronu difūzijas ātrumam no liesmas degvielas samaisīšanas zonas [185], ko vēlāk skaitliski apliecināja arī *Prager et al.* [177].

*Goodings et al.* [173] treknai un liesai metāna liesmai raksturoja relatīvi augstu negatīvo jonu koncentrāciju un konstatēja, ka primārais negatīvo jonu veidošanas mehānisms ir trīs ķermeņu sadursmes ar elektrona pievienošanas (pēc 70. reakc. meh.):



Šī reakcija ir jūtīga pret temperatūras izmaiņām un notiek robežās no 195 K līdz 600 K [173], tāpēc novērojama degvielas un gaisa samaisīšanas zonā, turklāt elektroni, kuri piedalās reakcijā, veidojas pēc ķīmiskās jonizācijas mehānisma (83–84.reakc.), un, savas mobilitātes dēļ [138], [217] viegli difundē liesmas aukstajā zonā [177].

Negatīvā lādiņa pārnese rezultātā liesmas pamatnē pēc sekojošā mehānismā var veidoties arī negatīvie skābekļa un hidroksil joni [173]:



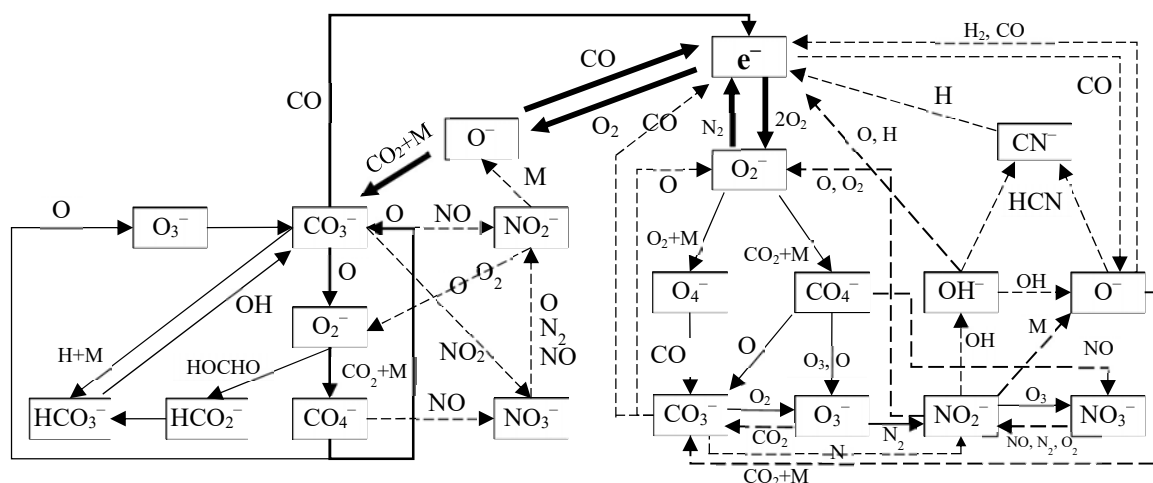
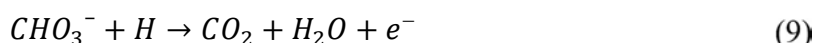
Šos jonus savā agrīnajā darbā (1965.gadā) novēroja arī *Calcote et al.* [185], tomēr veidošanas mehānismu tajā laikā skaidroja ar peroksīda sadalīšanos elektrona pievienošanas rezultātā. Tā kā skābekļa un hidroksil joni ir ļoti stipras bāzes, tiem ir tieksme pievienot protonu no citām neitrālajām molekulām pēc mehānisma [173]:



$CHO_2^{-}$  un  $CHO_3^{-}$  veidošanos ievērojamā daudzumā skaitliskajā simulācijā konstatēja *Prager et al.* [177]. *Goodings et al.* eksperimentāli reģistrēja lielā daudzumā arī  $CO_3^{-}$ ,  $HCO_3^{-}$ ,  $CO_4^{-}$  un  $HCO_4^{-}$  veidošanos, kuru nevarēja paskaidrot ar protona vai lādiņa pārnese mehānismiem [173]. *Starik et*

al. pilnveidoja šādu negatīvu jonu veidošanas modeli, konstruējot sarežģītu vairāku reakciju kopu mehānismu (6. pielik. 9. att.), kuru rezultātā liesmas kārstajā zonā varētu veidoties iepriekš minētie joni, un papildus slāpekļa saturošie joni: nitrītijs  $\text{NO}_2^-$  un nitrāts  $\text{NO}_3^-$  [176], [190].

Negatīvo jonu koncentrācija samazinās kritiski, ja ir novērojams hidroksīla (OH), skābekļa (O) un ūdeņraža (H) radikāļa koncentrācijas pieaugums, kurš ir stipri izteikts karstajā liesmas zonā, kas veidojas pēc reakcijas zonas. Praktiski ikviens negatīvs jons var zaudēt savu lādiņu disociatīvā elektrona atvienošanas (71. reakc. meh.) reakcijā sadursmēs ar radikāļiem [173], piem.:



9. att. Stehiometriskās liesmas negatīvo jonu veidošanas mehānisms [190]. [173]

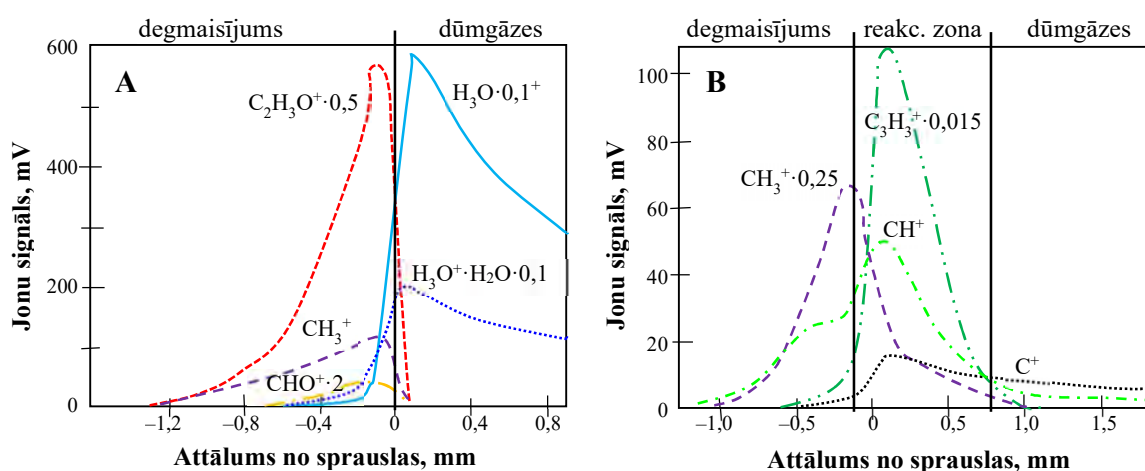
Savukārt  $\text{CO}_3^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$  un  $\text{NO}_3^-$  skaitliskās modelēšanas pētījumos uzrādīja samērā labu stabilitāti pret radikāļu iedarbību, tāpēc šo jonu koncentrāciju pietiekoši lielā daudzumā var novērot arī pēc liesmas reakcijas zonas [176], [190].

Treknā degvielas-gaisa maisījumā stiprās bāzes ( $\text{O}^-$  un  $\text{OH}^-$ ) pēc protona migrācijas mehānisma (63.reakc.) var piedalīties reakcijā ar ogļūdeņražiem, veidojot  $\text{C}_2\text{H}^-$  un citus nepiesātinātus jonus, tomēr ar lielāko tieksmi jonus ( $\text{C}_n\text{H}_x^-$ ) veido neitrālās nepiesātinātas ogļūdeņraža molekulas un to radikāļi lādiņa pārnese (73. reakc.) un elektrona pievienošanas reakcijās (70. reakc.) [173].

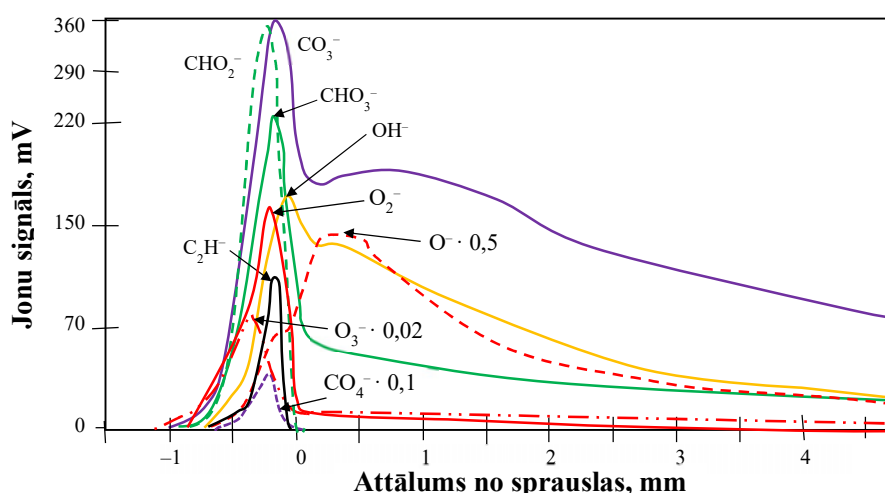
Joni ar lielāku oglekļa atomu saturu parasti ir poliaromātisko ogļūdeņražu (PAH) joni vai uzlādēto kvēpu daļiņu aglomerācijas. Ahrens *et al.* 1998. gadā savā darbā par PAH joniem liesmā liecināja, ka atsevišķi uzlādēti PAH joni ar masu  $> 3 \cdot 10^{-22}$  g drīzāk uzvedās kā līdzīgas pēc ķīmiskās struktūras molekulas bez lādiņa [193]. Tā kā elektrons ir daudz vieglāks par jebkuru jonu, elektronu piestiprināšanas koeficients kvēpu daļiņām ir daudz lielāks nekā joniem, tāpēc PAH joni var pievienot elektronus un saistīt tos savā aromātiskā nepiesātinātā struktūrā. Savukārt, kvēpu

daļiņām, kuri veidojās no *PAH* jonu aglomerācijām, lādiņš varētu būt lielāks par vienu elektronu. Parasti liesmā  $\approx 10$  nm izmēra kvēpu daļiņu lādiņš nav sastopams lielāks par trīs-piecu elektronu lādiņu summu, bet daļiņām ar izmēru virs 40 nm lādiņu var veidot līdz 10–12 elektroni [200], [201]. Piesaistot brīvus elektronus trenkā degvielas-gaisa maisījumā, kvēpu daļiņas var stipri samazināt liesmas elektrovadītspēju, jo kvēpu daļiņu mobilitāte ir daudz mazāka ( $10^{-3}$  līdz  $3 \cdot 10^{-2}$   $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  pēc *Mayo* un *Weinberg* 1970. gads [217]) salīdzinot ar jonu ( $2,14$  līdz  $2,68$   $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  [216]) un elektronu ( $2,5 \cdot 10^3$  līdz  $4 \cdot 10^3$   $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  pēc *Wilson et al.* 1930. gads [138]) mobilitāti.

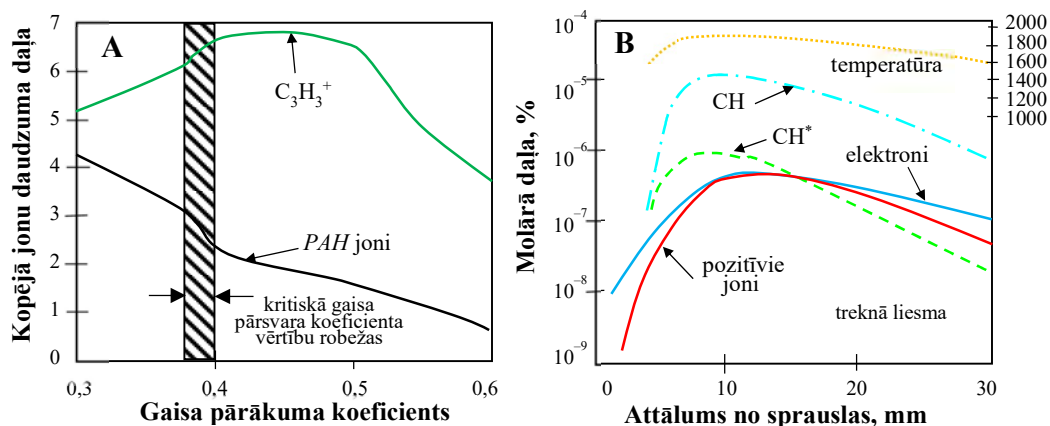
## 7. pielikums



10. att. Pozitīvo jonu sadalījums metāna liesmās (A) un treknās (B) liesmas garumā [174].

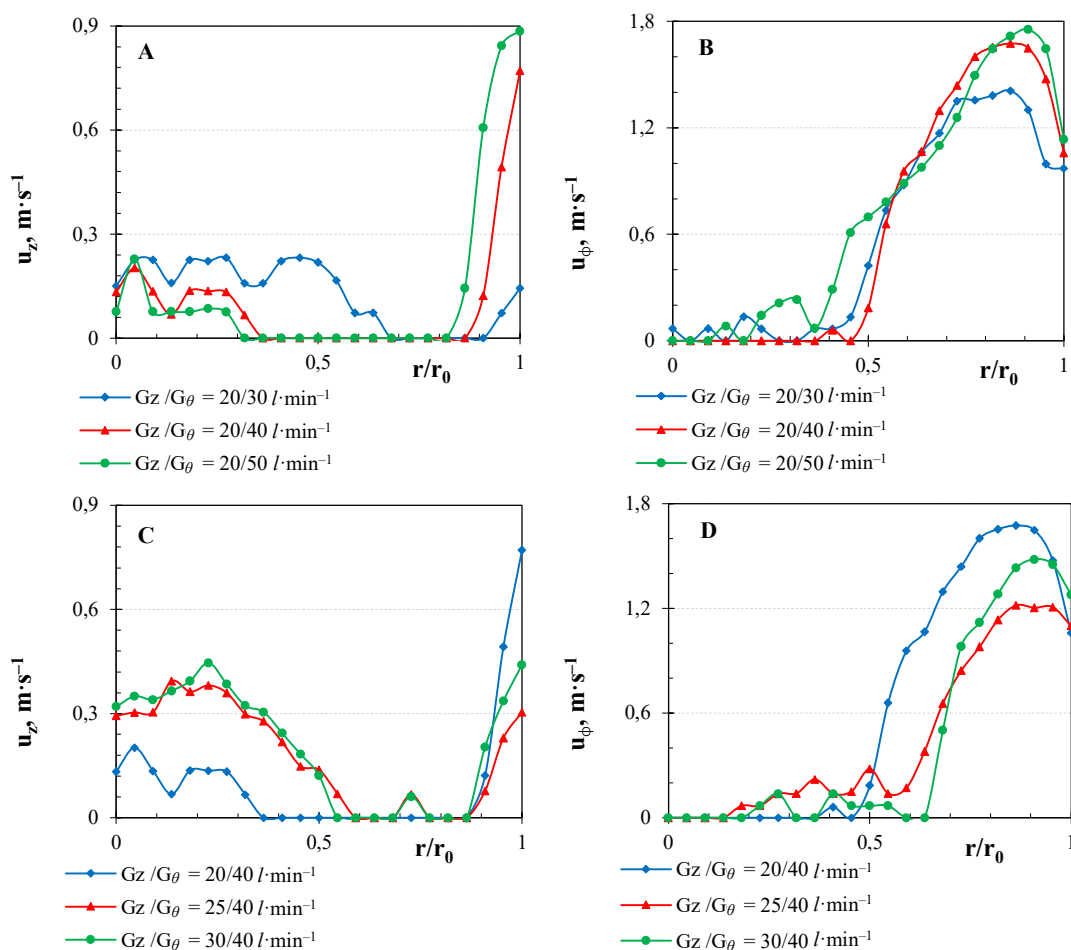


11. att. Negatīvo jonu sadalījums pa metāna liesmas garumā [173].

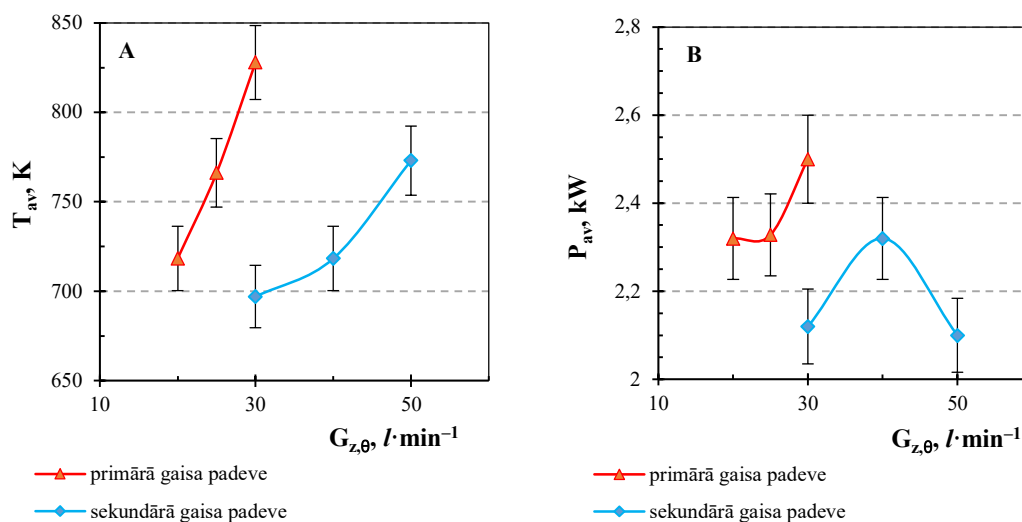


12. att. Trenkās kvēpu veidojošās liesmas jonizācijas procesa īpašības [189].

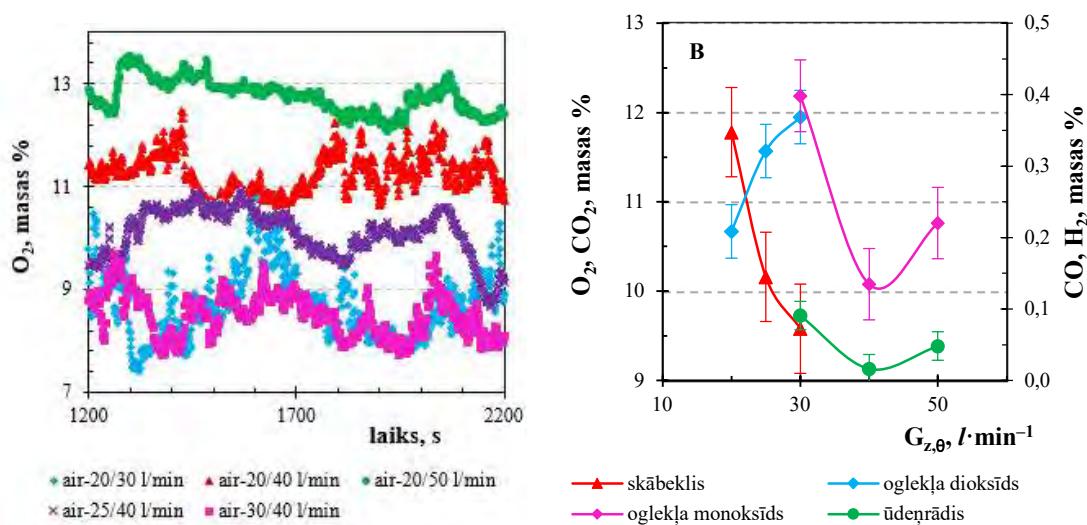
## 8. pielikums



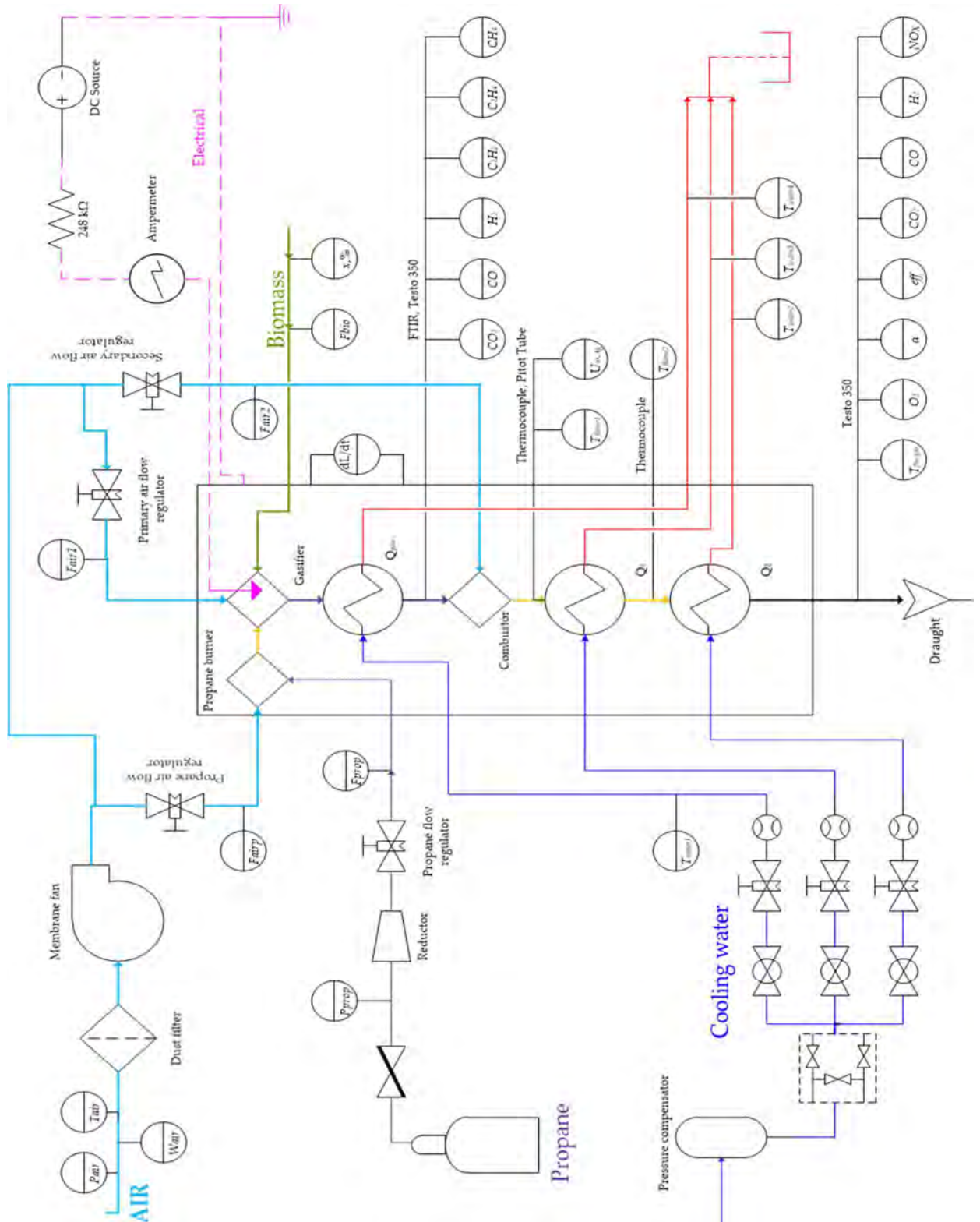
13. att. Salmu biomasas degšanas virpuļplūsmas kustības ātruma projekciju vērtību radiālā sadalījuma izskats atkarībā no gaisa azimutālās (A, B) un aksiālās (C, D) padves attiecības izmaiņām.



14. att. Salmu biomasas degšanas virpuļplūsmas struktūras izmaiņas ietekme uz liesmas temperatūras (A) un iekārtas vidējās jaudas (B) parametriem.



15. att. Salmu biomasas degšanas virpuļplūsmas struktūras izmaiņas ietekme uz degšanas procesa skābekļa pārākuma izmaiņu kinētiku (A) un emisiju daudzumu (B).



Eksperimentālās iekārtas principiālā shēma

## 10. pielikums



A

B

16. att. Salmu biomasas ogles – sānskats (A), kūdras biomasas ogles – skats no augšas (B).

## 11. pielikums

**Izdevumi saistītie ar degšanas elektrodinamiskās kontroles tehnoloģijas uzstādīšanu pie paaugstinātā sprieguma**

Izdevumu pozīcija/ Nosaukums	Izdevumu summa, EUR	Atsauce
DC 1000–12000 V 50 mA barošanas bloks	2680 – 3980 EUR	[258]–[260]
elektroda izgatavošana materiāli (NiCr vads)	8 – 10 EUR/h x 2 = 16 – 20 EUR 1,5 – 5 EUR	[262], [263]
elektriskās daļas izolācija (keramika)	50 – 100 EUR	[264]
uzstādīšanas/montāžas darbi materiāli (vadi, izolācijas materiāls)	8 – 10 EUR/h x 8 = 64 – 80 EUR līdz 150 EUR	[263]
PVN, VSOAI, ievadmuitas nodoklis	887 – 1300 EUR	[265]–[267]
cenās sadārdzinājums līdz 10%	298 – 398 EUR	
<b>Kopējie izdevumi</b>	<b>4147 – 6033 EUR</b>	

### Paplašinātie Secinājumi

1. Dažādas izcelsmes granulēto biomasu (salmu, kūdras, koksnes) elementārā un ķīmiskā sastāva daudzveidība nosaka būtiskās atšķirības gazifikācijas un degšanas procesos.

1.1. Intensīvo koksnes granulu termisko sadalīšanos nosaka: augstais gaistošo vielu saturs biomasā (67 %), specifiskā hemicelulozes struktūra (*Gal-Glu-Man*) un  $LHV$   $16,6 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ , kas veicina ātrāku līdzsvara veidošanos starp eksotermiskiem un endotermiskiem biomasas termiskās sadalīšanas procesiem, nodrošinot visgarāko (līdz  $\approx 450 \text{ mm}$ ) un viskarstāko (par  $\approx 16 \%$ ) liesmas virpuļplūsmu, salīdzinot ar citiem izpētītiem paraugiem. Intensīvā siltuma apmaiņa starp liesmas virpuļplūsmu un biomasas granulām nodrošina ātrāku gaistošo vielu sadegšanu, bet zemākais slāpekļa saturs koksnes biomasā ( $\approx 0,2 \%$ ) nosaka zemāku  $\text{NO}_x$  izmešu daudzumu ( $100 \text{ ppm}$ ), salīdzinot to ar salmu un kūdras granulu  $\text{NO}_x$  emisiju daudzumu dūmgāzēs ( $300\text{--}400 \text{ ppm}$ ).

1.2. Kviešu salmu degšanas process tiek raksturots ar laikā mainīga liesmas garuma veidošanos (līdz  $\approx 250 \text{ mm}$ ), ko nosaka ogles/pelnu slāņa veidošanās uz biomasas slāņa virsmas, kas pakāpeniski ierobežo gaisa piekļuvi reakcijas zonai pašuzturošā procesa beigu stadijā, atdzesējot pelnu virskārtu un ietekmējot liesmas veidošanās kinētiku. Šī degšanas procesa īpatnība izraisa problēmas salmu ogles gruzdēšanas laikā, kad dūmgāzēs veidojās paaugstināts  $\text{CO}$  daudzums (līdz  $30000 \text{ ppm}$ ) un samazinās siltuma atdeve gazifikātorā (par  $\approx 25 \%$ ).

1.3. Kūdras granulu termiskās sadalīšanās aizkavējās (par  $\approx 23 \%$ ) relatīvi lielā blīvuma ( $780 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), augstā mitruma satura ( $\approx 11,5 \%$ ) un zema gaistošo vielu ( $48 \%$ ) satura dēļ, kas apgrūtina liesmas veidošanos primārā biomasas termokīmisko pārvērtību stadijā. Tomēr kūdras degšanas process ir vienmērīgāks, kas īpaši novērojams ogļveida fāzes oksidēšanas posmā. Atšķirībā no koksnes un salmu degšanas, kūdras degšanas process raksturojas ar visīsāko (līdz  $150 \text{ mm}$ ) liesmu un ilgstošāko pārogleto granulu gruzdēšanas posmu, ko nosaka zemais gaistošo vielu un augstais oglekļa saturs kūdras granulās ( $53,8 \%$  pret  $46,6\text{--}49,8 \%$ ).

2. Granulētās biomasas degšanas liesmas virpuļplūsmas eksperimentālajā izpētē, bez pieliktā elektriskā lauka konstatēts, ka optimālais virpuļplūsmas režīms, kad pie relatīvi zemākās maksimālās liesmas temperatūras ir novērojama augstāka iekārtas jauda (par  $8\text{--}9 \%$ ) un mazākais emisiju daudzums (par  $45\text{--}66 \%$ ), veidojās pie sekundārā gaisa ieplūdes leņķa ( $\neq \theta_{ieejas}$ ) –  $40^\circ$  un virpuļskaitļa ( $S$ )  $\approx 0,6\text{--}0,9$ . Tāda virpuļplūsmas struktūra nosaka aksiālo plūsmas ātrumu centrā  $\approx 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  un perifērijā  $\approx [1,1; 1,2] \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , azimutālo plūsmas ātrumu pie sienas  $\approx [2,2; 2,6] \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  un Reinolda kritērija vidējo vērtību  $\approx 400$  centrā un  $\approx [1100; 1950]$  pie degšanas kameras sienas. Darbā izmantotā liesmas virpuļplūsmas struktūra nosaka paaugstinātu neizreagētā gaisa skābekļa noplūdi (līdz  $8 \%$ ) gar degšanas kameras sienas malām ( $r/r_0 > 0,8$ ), ierobežojot to izmantošanu enerģētikā, bez papildus ārējā spēka ietekmes, vai degšanas kameras konstruktīvās modifikācijas.

3. Biomasas termiskās sadalīšanas produktu liesmas virpuļplūsmas struktūru ir iespējams ietekmēt ar ārējo elektrisko spēku, kurš veidojās telpā starp pozitīvi lādēto elektrodu un zemēto degšanas kameras sienu. Maksimālo elektriskā lauka efektu novēro, ievietojot elektrodu zonā ar



maksimālo liesmas jonu strāvas piesātinājumu. Dažādas izcelsmes biomasu degšanas procesā jonu strāva sasniedz maksimālo vērtību (līdz 6 mA), no 0 līdz 50 mm attālumā no biomasas granulu slāņa virsmas. Savukārt, lai efektīvi kontrolēt virpuļplūsmas struktūru dažādos biomasas degšanas posmos, optimālajam elektroda garumam ir jābūt vismaz 63 mm.

4. Zemas intensitātes līdzstrāvas elektriskajā laukā (līdz  $1 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ ), pateicoties “jonu vēja” iedarbībai ar maksimālo teorētisko veidošanas ātrumu ( $u_\phi$ ) līdz  $\approx 0,18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , notiek lejupvērstās virpuļplūsmas intensifikācija ar virpuļskaitļa pieaugumu līdz 1,1–1,3, nodrošinot uzlaboto gaisa virpuļplūsmas sajaukšanos ar aksiālo gaistošo vielu plūsmu. Elektriska lauka iedarbībā, inducētā radiālā kustība, virzienā no centra uz degšanas kameras sienām, paplašina biomasas termiskās sadalīšanas produktu degšanas zonu un samazina liesmas garumu, izraisot temperatūras maksimālo vērtību samazināšanos liesmas centrālajā daļā vidēji par  $\approx 10 \%$  un temperatūras paaugstināšanos liesmas perifērijā par  $\approx 15\text{--}20 \%$ . Liesmas virpuļplūsmas dinamikas izmaiņu rezultātā samazinās plūsmas aksiālais ātrums centrā (līdz  $0,3\text{--}0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), palielinot degmaisījuma uzturēšanās ilgumu degšanas zonā, un kā rezultāts, uzlabojot gaistošo vielu sadegšanu ar sekojošo gaisa pārākuma koeficienta samazināšanos dažādām biomasām par  $\approx 15\text{--}30 \%$ .

5. Biomasas termokīmiskās konversijas izmaiņu efekts ir saistīts ar termiskās sadalīšanas procesa intensifikāciju (par  $20 \%$ ) un ar uzlaboto gaistošo vielu veidošanos degšanas procesa sākuma stadijā (par  $\approx 20\text{--}40 \%$ ). Ievērojot biomasas masas zudumu izmaiņu vidējo vērtību elektriskajā laukā, pie  $E_\phi = 0,75 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$  ir konstatēts kviešu salmu granulu sadalīšanas ātruma pieaugums par  $\approx 10 \%$ . Savukārt koksnes biomasas un kūdras termiskās sadalīšanas ātruma maksimālais pieaugums elektriskajā laukā sasniedz  $\approx 5 \%$ .

6. Gazifikācijas un degšanas produktu ( $\text{CO}_2$  pieaugums liesmas reakcijas zonā līdz  $\approx 36\text{--}37 \%$ ) koncentrācijas izmaiņas pie degšanas kameras sienām, elektriskajā laukā, kā arī degšanas procesa efektivitātes pieaugums par  $4\text{--}10 \%$ , netieši liecina par konvektīvās siltuma pārnese intensifikāciju virzienā uz sildvirsmām, palielinot iekārtas jaudu biomasas primārajā termokīmiskās konversijas procesā par  $\approx 10\text{--}15 \%$ , un palielinot degšanas procesa vidējo saražoto siltuma daudzumu par  $6\text{--}10 \pm 4 \%$  – salmu biomasai, par  $5\text{--}6 \pm 2 \%$  – koksnes biomasai un par  $3\text{--}6 \pm 3 \%$  kūdrai. Konsekventi ir konstatēts arī relatīvā kurināmā patēriņa samazinājums vidēji par  $5 \%$ , izmantojot ārējā elektriskā lauka efektu.

7. Elektriskajā laukā izraisītā radiālā plūsmas kustība, virzienā no centra uz degšanas kameras sienām, samazina virpuļplūsmas kontrakcijas efektu un uzlabo degšanas procesa apstākļus liesmas perifērijā, veicinot gaistošo biomasas termiskās sadalīšanas produktu uzlaboto sadegšanu, un samazinot  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  un  $\text{NO}_x$  emisiju relatīvus daudzumus dažāda veida biomasas granulu degšanas procesā par  $\approx 4\text{--}20 \%$ ,  $20\text{--}30 \%$  un  $5\text{--}10 \%$  atbilstoši.

8. *EFDFD* tehnoloģijas aprobācija ar rūpniecisko  $20 \text{ kW}$  granulu degli apstiprināja elektriskā lauka pozitīvo efektu, paaugstinot vidējo degšanas temperatūru reakcijas zonā par  $\approx 3\text{--}5 \%$ , uzlabojot biomasas termiskās sadalīšanas produktu ( $\text{CO}$ ) sadegšanu par  $\approx 10 \%$  ar sekojošo tehnoloģiskā prototipa iekārtas vidējais siltuma jaudas pieaugumu par  $\approx 3\text{--}4 \%$ , un kopējā saražotā siltuma vidējo pieaugumu par  $6\text{--}8 \%$  ar vidējo novirzi  $\pm 2 \%$ .

9. Atbilstoši elektroenerģijas patēriņa aprēķiniem tehnoloģiskās aprobācijas priekšizpētē, pie pieliktā elektrodam +1,8 kV potenciāla un maksimālā  $7,25 \pm 0,45$  mA strāvas stipruma, maksimālais barošanas bloka elektroenerģijas patēriņš sasniedz 0,028 kWh. Patērētā, lauka nodrošināšanai, elektriskā jauda ir aptuveni 2,5 % no prototipa iekārtas horizontālās sekcijās siltuma jaudas, bet relatīvais elektroenerģijas patēriņš ir tikai  $\approx 2-6$  % no saražotā siltuma pieauguma, izmantojot līdzstrāvas elektriskā lauka tehnoloģiju. *EFDFD* tehnoloģijas ieviešanas izdevumi, kas saistīti ar elektrodinamiskās kontroles tehnoloģijas izmantošanu katlu iekārtās, reducējās uz elektriskās daļas instalāciju un izmaksām par elektroenerģijas patēriņu augstsprieguma līdzstrāvas bloka barošanai, tāpēc šīs tehnoloģijas izmantošanu ir nepieciešams paredzēt jau degļa projektēšanas stadijā. Projektējot katlu ar noteikto jaudu, ir iespējams paredzēt optimālā augstsprieguma barošanas bloka izvēli, turklāt jaudīga barošanas bloka cena vairumtirdzniecībā ir svārstās 3000–4000 EUR robežās. Aprēķinātais tehnoloģijas izmantošanas pašatmaksāšanas periods 20 kW jaudas katla iekārtā ir no 2,7 līdz 4,1 gadiem. Ievērojot kurināmā ekonomiju un lineāri ekstrapolējot granulā degļa jaudas vērtību līdz 300 kW, tehnoloģijas pašatmaksāšanas periods samazinās aptuveni līdz 1 gadam, neierēķinot potenciālo kaitīgo emisiju kvotu ekonomiju.

#### **Priekšlikumi iekārtas izstrādei**

*EFDFD* tehnoloģijas izmantošanai granulētās biomasas degļos ir nepieciešama degļa darba režīma pielāgošana, ievērojot noteiktās biomasas degšanas procesa raksturīpašības un ar elektrisko lauku ierosinātās izmaiņas. Eksperimentālajā izpētē tika konstatēts, ka vienāda degšanas režīma izmantošana dažādām biomasām, elektriskajā laukā, izraisa savādāku efektu, granulā atšķirīga blīvuma, elementārā un ķīmiskā sastāva dēļ.

Piemērām, koksnes biomasas granulā degšanas procesam ir pamatota garākas degšanas kameras un elektroda izvēle, jo degmaisījuma reakcijas zona koksnes biomasas liesmai ir izstiepta. Tomēr maksimālo iekārtas jaudas pieauguma efektu ir iespējams iegūt, noņemot siltumu tieši no reakcijas zonas, kur notiek elektriskā lauka un liesmas mijiedarbība.

Atbilstoši noteiktās biomasas degšanas liesmas garumam un jaudai, ir nepieciešams optimāli izvēlēties elektroda garumu un elektroda darba virsmas izvietošanas vietu liesmā, jo maksimālais *EFDFD* tehnoloģijas efekts ir sasniedzams, ievietojot pozitīvo elektrodu liesmas zonā ar maksimālo elektriskā lādiņa blīvumu.

Ievērojot inženier-ekonomisko aprēķinu, ir secināms, ka nepieciešams veikt paplašinātu *EFDFD* tehnoloģijas efekta aprobāciju granulētās biomasas degļiem ar lielāku nominālo jaudu (> 20 kW), lai izvērtētu tehnoloģijas elektroenerģijas patēriņa maksimālās vērtības eksperimentālo un statistisko sakarību ar noteikto degļa jaudu.