

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte

Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts

Vladimirs Kirsanovs

Doktora studiju programmas “Vides zinātne” doktorants

Šķeldas gazifikācija singāzes iegūšanai

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
profesors *Dr. sc. ing.*
CLAUDIO ROCHAS

RTU Izdevniecība

Rīga 2018

Kirsanovs, V. Šķeldas gazifikācija singāzes iegūšanai.
Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība, 2018, 41 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU Promocijas padomes "P-19"
2018. gada 11. janvāra lēmumu, protokola Nr. 89.

ISBN 978-9934-22-089-0 (print)

ISBN 978-9934-22-090-6 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2018. gada _____ Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Rīgā, Āzenes ielā 12/1, 115. telpā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Gatis Bažbauers,
Rīgas Tehniskā universitāte

Vadošā pētniece *Dr. sc. ing.* Anna Volkova,
Tallinas Tehnoloģiju universitāte, Igaunija

Profesors *Dr. sc. ing.* Edmunds Teirumnieks,
Rēzeknes Tehnoloģiju akadēmija

APSTIPRINĀJUMS

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

Vladimirs Kirsanovs (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 66 attēli, 19 tabulu, kopā 133 lappuses. Literatūras sarakstā ir 156 nosaukumi.

SATURS

DARBA VISPARĪGAIS RAKSTUROJUMS	5
1. INOVATĪVAS SINGĀZES IEGŪŠANAS TEHNOLOĢIJAS PAMATOJUMS	9
1.1. Biomasas gazifikācijas nepieciešamība.....	9
1.2. Biomasas gazifikācijas tehnoloģiskā risinājuma izvēle	10
1.3. Gazifikācijas procesu ietekmējošie faktori.....	11
1.4. Gazifikācijas procesa blakusprodukti.....	13
2. GAZIFIKĀCIJAS PROCESA MATEMĀTISKĀ MODELĒŠANA	17
2.1. Gazifikācijas modeļa apraksts	17
2.2. Gazifikācijas procesa modelēšanas rezultāti	19
3. BIOMASAS GAZIFIKĀCIJAS EKSPERIMENTĀLĀ SISTĒMA.....	24
4. Iegūtie REZULTĀTI UN to ANALĪZE	27
4.1. Eksperimentālās sistēmas izpēte	27
4.1.1. Ievadītā gaisa priekšsildīšana	27
4.1.2. Kurināmā mitrums.....	28
4.2. Matemātiskā modeļa validācija	29
4.3. Eksperimentālas sistēmas optimizācija	31
4.4. Eksperimentālo datu analīze.....	33
4.5. Nekoksnes materiālu gazifikācijas iespējas	34
SECINĀJUMI.....	37
IZMANTOTĀ LITERATŪRA.....	39

DARBA VISPARĪGS RAKSTUROJUMS

Darba aktualitāte

Enerģētikas sektoram ir būtiska loma jebkuras valsts attīstībā. Ilgtspējīga un ekonomiski pamatota politika enerģijas nozarē var kalpot par svarīgu pamatu pārējo valsts sektoru attīstībai. Šajā darbā aplūkota inovatīva tehnoloģija, ar kuru no vietēja atjaunojama resursa – šķeldas – tiek iegūta singāze. Singāzi var izmantot siltuma un elektrības ražošanā. Tādā veidā ir iespējams samazināt nepieciešamo importēto energoresursu daudzumu, vienlaikus paaugstinot Latvijas enerģētisko drošību un neatkarību no citām valstīm. Importējamā fosilā kurināmā aizstāšana ar vietējiem atjaunojamajiem energoresursiem sekmē arī ekonomiskus ieguvumus.

Pateicoties singāzes iegūšanai no šķeldas, ir iespējams palielināt atjaunojamo energoresursu īpatsvaru kopējā patēriņā, tā sekmējot Eiropas Parlamenta un Padomes Direktīvas 2009/28/EC mērķa sasniegšanu – līdz 2020. gadam Latvijā palielināt atjaunojamo energoresursu īpatsvaru kopējā bruto patēriņā līdz 40 %.

Parīzes klimata konferencē tika panākta svarīga vienošana par katras valsts iesaisti vides aizsardzības jautājumu risināšanā. Fosilo kurināmo aizstāšana ar atjaunojamiem energoresursiem atstāj pozitīvu ietekmi uz apkārtējo vidi, panākot atmosfērā nonākošo siltumnīcefekta gāzu emisiju samazinājumu.

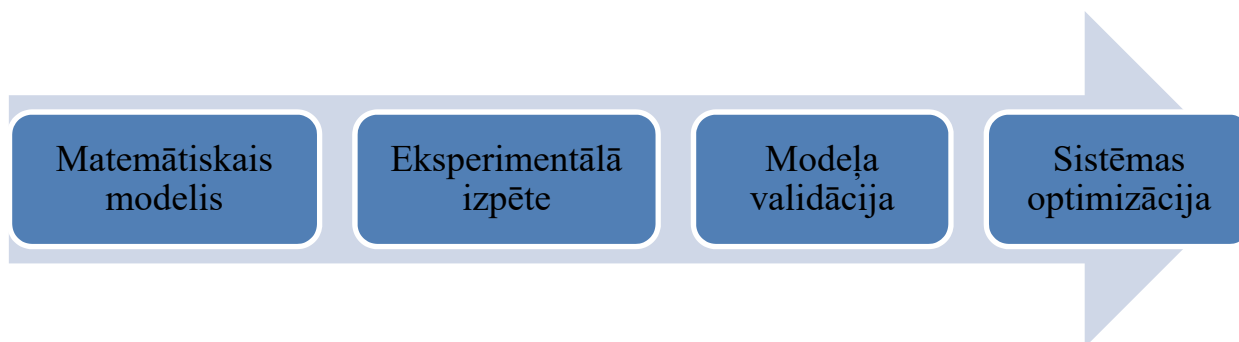
Darba mērķis un uzdevumi

Promocijas darba mērķis ir izpētīt singāzes iegūšanas iespējas gazifikācijas ceļā, par kurināmo izmantojot vietējo atjaunojamo energoresursu – šķeldu. Darba mērķa sasniegšanai tika izvirzīti šādi izpētes uzdevumi:

- gazifikācijas procesa termodinamiskā matemātiskā modeļa izveide;
- kurināmā mitruma ietekmes analīze un optimālā gaisa patēriņa koeficienta noteikšana, izmantojot izstrādāto matemātisko modeli;
- gazifikācijas procesa eksperimentāla izpēte rūpnieciskajā objektā, nosakot šķeldas žāvēšanas iespējas ar singāzes fizisko siltumu, kas iegūts dzesēšanas procesā;
- matemātiskā modeļa validācija, izmantojot eksperimentālās izpētes laikā iegūtos rezultātus;
- gazifikācijas sistēmas optimizācijas iespēju analīze, izmantojot gazifikatorā ievadītas gaisa plūsmas sadalīšanu primārajā un sekundārajā gaisā;
- citu biomasas resursu izmantošanas iespēju aplūkošana singāzes iegūšanai gazifikācijas rezultātā, izmantojot izstrādāto matemātisko modeli.

Pētījuma metodika

Promocijas darbā izmantotās pētīšanas metodikas vispārīgā struktūra ir parādīta 1. attēlā. Darba izstrādē ir izmantotas divas savstarpēji saistītas izpētes pieejas. Pirmās pieejas pamatā ir gazifikācijas procesa termodinamiskā matemātiskā modeļa izveide un izmantošana gazifikācijas procesa modelēšanai pie mainīga kurināmā mitruma un gaisa patēriņa koeficienta.



1. attēls. Promocijas darba īstenošanas metodika.

Otrā pieeja ir balstīta uz šķeldas gazifikācijas procesa eksperimentālo izpēti rūpnieciskajā objektā pie mainīgiem darbības parametriem. Mērījumu rezultāti tika izmantoti izstrādātā modeļa validācijai. Tika aplūkota gazifikācijas procesa optimizācijas iespēja, izmantojot gazifikatorā ievadītā gaisa sadalīšanu primārajā un sekundārajā gaisā, par optimizācijas kritērijiem izmantojot maksimālo singāzes sadegšanas siltumu un kopējo procesa efektivitāti. Eksperimentālās izpētes laikā iegūtie dati tika izmantoti empīrisko vienādojumu veidošanai. Validētais matemātiskais modelis tika izmantots, lai analizētu dažādu biomasu izmantošanas iespējas gazifikācijas procesā.

Darba zinātniskā novitāte

Gazifikācijas process ir biomasas termokīmiskā pārveidošanas metode, kas ir atkarīga no liela faktoru daudzuma: gazifikatora tipa un dizaina, izmantotā gazifikācijas aģenta, gaisa padošanas sistēmas, gaisa patēriņa koeficienta, kurināmā mitruma, kurināmā daļiņu izmēra un citiem parametriem. Promocijas darbā tika veikta kompleksa inovatīvas singāzes iegūšanas metodes (no šķeldas gazifikācijas ceļā) izpēte, kurināmā žāvēšanai izmantojot no singāzes noņemto fizisko siltumu.

Izstrādāts gazifikācijas procesa termodinamiskais modelis, kas tika validēts ar eksperimentālās sistēmas monitoringa datiem. Gazifikācijas stacijas darbības un iegūtās singāzes kvalitātes uzlabošanai izpētīta gazifikatorā ievadītā gaisa sadalīšanas primārā un sekundārā metode. Darbā iegūtos rezultātus un regresijas vienādojumus var izmantot citu līdzīgu gazifikācijas staciju projektēšanai, izveidei un darbības optimizācijai.

Darba praktiskā nozīme

Ar darbā aplūkoto tehnoloģiju singāzes iegūšanai no šķeldas gazifikācijas ceļā ir iespējams palielināt vietējo atjaunojamo energoresursu daudzuma izmantošanu un veicināt Latvijas energosektora attīstību kopumā. Darba rezultātiem ir praktiska nozīme nacionālajā, reģionālajā un pašvaldību līmenī. Darba rezultātiem ir dažādas mērķgrupas:

- pārveidošanas sektora uzņēmumi kā saražotās singāzes lietotāji siltumenerģijas un elektroenerģijas iegūšanai;
- ķīmiskās pārstrādes un enerģētikas sektora uzņēmumi, izmantojot singāzi kā izejvielu citu produktu ar augstu pievienoto vērtību ražošanai;
- gazifikācijas iekārtu ražotāji, izmantojot eksperimentālās izpētes rezultātus un ieteikumus jauno gazifikācijas sistēmu projektēšanai, izveidei un regulēšanai, lai palielinātu veiktspēju;
- biomasas pārstrādes uzņēmumi kā izejvielu piegādātāji.

Darba rezultātu aprobācija

Promocijas darbā pētījuma rezultāti ir prezentēti septiņās starptautiskās zinātniskās konferencēs.

1. Kirsanovs V., Žandeckis A., Blumberga D., Veidenbergs I. The Influence of Process Temperature, Equivalence Ratio and Fuel Moisture Content on Gasification Process: A Review. 27th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, ECOS 2014; Abo Akademi UniversityTurku; Finland; 15.–19.06.2014.

2. Kirsanovs V., Žandeckis A. Investigation of biomass gasification process with torrefaction using equilibrium model. International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies, CONECT 2014; Riga; Latvia; 14.–16.10.2014.

3. Kirsanovs V., Žandeckis A. Investigation of fuel effect on biomass gasification process using equilibrium model. 6th International Conference Biosystems Engineering, BSE 2015; Tartu; 07.–08.05.2015.

4. Kirsanovs V., Blumberga D., Dziķevičs M., Kovals A. Design of experiments for equivalence ratio, fuel moisture content and fuel consumption effect investigation on gasification process. International Scientific Conference Environmental and Climate Technologies, CONECT 2015; Riga Technical University; Riga; Latvia; 14.–16.10.2015.

5. Kirsanovs V., Žandeckis A., Rochas C. Biomass Gasification Thermodynamic Model Including Tar and Char. 7th International Conference on Biosystems Engineering, BSE 2016; Tartu; 12.–13.05.2016.

6. Kirsanovs V., Blumberga D., Kārķliņa K., Veidenbergs I., Rochas C., Vīgants E., Vīgants Ģ. Biomass Gasification for District Heating. International Scientific Conference Environmental and Climate Technologies, CONECT 2016; Riga; Latvia; 12.–14.10.2016.

7. Kirsanovs V., Blumberga D., Veidenbergs I., Rochas C., Vīgants E., Vīgants Ģ. Experimental investigation of downdraft gasifier at various conditions. International Scientific Conference on Environmental and Climate Technologies, CONECT 2017; Riga; Latvia; 10.–12.05.2017.

Promocijas darbā pētījuma rezultāti ir atspoguļoti septiņās starptautiskās zinātniskās publikācijās.

1. Kirsanovs V., Žandeckis A., Blumberga D., Veidenbergs I. The Influence of Process Temperature, Equivalence Ratio and Fuel Moisture Content on Gasification Process: A Review. 27th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS 2014): Proceedings, 2014, pp. 1046.–1060.

2. Kirsanovs V., Žandeckis A. Investigation of biomass gasification process with torrefaction using equilibrium model. Energy Procedia, 2015 Vol. 72, pp. 329–336.

3. Kirsanovs V., Žandeckis A. Investigation of fuel effect on biomass gasification process using equilibrium model. Agronomy Research, 2015, Vol. 13, No.2, pp. 511–519.

4. Kirsanovs V., Blumberga D., Dziķevičs M., Kovals A. Design of experiments for equivalence ratio, fuel moisture content and fuel consumption effect investigation on gasification process. Energy Procedia, 2016 Vol. 95, pp. 189–194.

5. Kirsanovs V., Žandeckis A., Rochas C. Biomass Gasification Thermodynamic Model Including Tar and Char. *Agronomy Research*, 2016, Vol. 14, No.4, pp. 1321–1331.
6. Kirsanovs V., Blumberga D., Kārliņa K., Veidenbergs I., Rochas C., Vīgants E., Vīgants Ģ. Biomass Gasification for District Heating. *Energy Procedia*, 2017, Vol. 113, pp. 217–223.
7. Kirsanovs V., Blumberga D., Veidenbergs I., Rochas C., Vīgants E., Vīgants, Ģ. Experimental investigation of downdraft gasifier at various conditions. *Energy Procedia*, 2018, Vol. 128, pp. 332–338.

1. INOVATĪVAS SINGĀZES IEGŪŠANAS TEHNOLOĢIJAS PAMATOJUMS

1.1. Biomasas gazifikācijas nepieciešamība

Viens no lielākajiem visas pasaules izaicinājumiem ir klimata pārmaiņu jautājums. Viens no galvenajiem faktoriem, kas sekmē globālo sasilšanu, ir siltumnīcefekta gāzes nonākšana atmosfērā. Ievērojama daļa no siltumnīcefekta gāzēm rodas ar enerģētikas nozari saistīto procesu dēļ un īpaši – fosilo kurināmo izmantošanas dēļ. Palielinot atjaunojamo energoresursu izmantošanu enerģijas iegūšanai Latvijā, ir iespējams panākt atmosfērā nonākošo siltumnīcefekta gāzes apjoma samazinājumu. Vienlaikus tas veicinās importējamo energoresursu daudzuma samazinājumu un paaugstinās valsts energoapgādes drošību.

Atjaunojamie energoresursi jau šobrīd ieņem nozīmīgu vietu Latvijas primāro energoresursu bilancē. Tomēr, balstoties uz Eiropas Parlamenta un Padomes Direktīvu 2009/28/EC, Latvijai ir jāpanāk, lai 2020. gadā no atjaunojamajiem energoresursiem saražotais enerģijas īpatsvars kopējā enerģijas patēriņā veidotu vismaz 40 % [1]. Kopumā atjaunojamo energoresursu apjoms un vienlaikus valsts pašnodrošinājums 2016. gadā bija 37,6 % [2].

Latvijai ir augsts potenciāls fosilo kurināmo aizstāšanai ar vietējiem atjaunojamiem energoresursiem, kas ir svarīgi gan Latvijas saimniecībai un ekonomikai kopumā, gan arī enerģētikas nozarei atsevišķi. Viens no galvenajiem Latvijas resursiem ir biomasas. Jau pašlaik biomasu plaši izmanto siltumenerģijas un elektroenerģijas ražošanai. Kaut arī biomasas ietver visai plašu izejvielu klāstu, tomēr, neapšaubāmi, koksne ir dominējošs resurss, kas mūsdienās tiek izmantots Latvijas enerģētikas nozarē. Svarīgi ir arī tas, ka, neskatoties uz aktīvo koksnes resursu izmantošanu dažādās tautsaimniecības nozarēs, kopējā mežu platība pieaug. Balstoties uz Centrālās statistikas pārvaldes datiem, 2014. gadā kopējā mežu platība veidoja 3260 tūkstošus hektāru jeb 50,5 % no kopējās valsts teritorijas. Pieaug arī kopējā koksnes krāja valstī, kas sasniedz jau 668 miljonus m³ [3].

Būtiska biomasas priekšrocība, salīdzinot ar fosilajiem kurināmā veidiem, ir izejvielu cena. Balstoties uz Centrālās statistikas pārvaldes datiem, vidējā dabasgāzes cena 2016. gadā bija 246 eiro par tūkstoš m³ jeb 25,9 eiro par MWh, pārrēķinot uz kurināmā enerģijas blīvumu. Salīdzinājumam – šķeldas vidējā cena 2016. gadā bija tikai 7,0 eiro par ber kubikmetru jeb 7,4 eiro par MWh, kas ir gandrīz 3,5 reizes mazāk kā dabasgāzei. Būtiski ir arī tas, ka šķeldas cenu kāpums pēdējo 10 gadu laikā ir 16,7 %, kas ir viens no zemākajiem Latvijā izmantoto energoresursu vidū. Tas sekmēja to, ka šķeldas izmantošanas apjoms pēdējos piecos gados ir piedzīvojis būtisku pieaugumu no 8,2 PJ līdz 20,6 PJ [4].

Atjaunojamo energoresursu izmantošana ir cieši saistīta ar inovācijām. Ir svarīgi izmantot mūsdienīgas tehnoloģijas atjaunojamo energoresursu pārveidošanai siltumenerģijā un elektroenerģijā, lai panāktu straujāku fosilo kurināmo izmantošanas apjoma samazinājumu un vietējo resursu izmantošanas apjoma pieaugumu. Biomasas gazifikācija ir viena no vispiemērotākajām tehnoloģijām, uz kuru ir jāliek uzsvars tuvākajos gados, lai palielinātu atjaunojamo energoresursu īpatsvaru kopējā primāro resursu patēriņā Latvijā. Gazifikācijas procesa norise ir aktīvi pētīta (galvenokārt – laboratorijas apstākļos) jau ievērojamu laiku, kā rezultātā ir iegūtas svarīgas zināšanas par procesa norises organizēšanu. Tomēr paliek ievērojams daudzums līdz galam neizpētītu jautājumu, it īpaši trūkst pētījumu par gazifikācijas procesa norisi rūpnieciskos objektos reālos apstākļos. Kaut arī siltuma un elektrības iegūšanas izmaksas, izmantojot gazifikācijas procesu, varētu

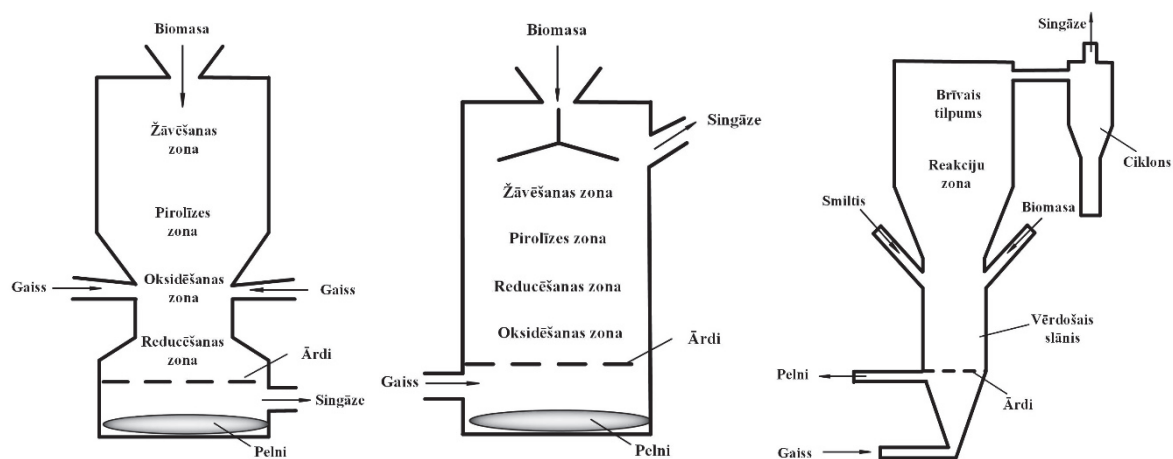
būt augstākas, salīdzinot ar biomasas pārveidošanas metodēm, kas balstītas uz degšanas procesu, tomēr, pateicoties straujai gazifikācijas tehnoloģiju attīstībai, var prognozēt būtisko singāzes iegūšanas izmaksu samazinājumu.

Viena no galvenajām gazifikācijas procesa priekšrocībām ir saistīta ar to, ka iegūtai singāzei ir plašs lietojuma spektrs. Gazifikāciju plaši izmanto Skandināvijas valstīs, it īpaši Zviedrijā, centralizētajā siltumapgādē [5]. Siltuma un elektroenerģijas ražošanai, izmantojot biomasas gazifikāciju, ir lielas perspektīvas arī decentralizētajā siltumapgādē atsevišķos valsts reģionos [6]. Elektroenerģijas iegūšanas integrācija biomasas gazifikācijas stacijās var būt ne tikai ekonomiski izdevīgāka par biomasas koģenerācijas stacijām ar katliem, bet ir arī ekoloģiski tīrāka metode [7].

Ar katru gadu pieaug singāzes izmantošana kā izejviela dažādu produktu ražošanai ar lielāku pievienoto vērtību [8]. Singāzes sastāvā ir trīs vērtīgi komponenti – ūdeņradis, ogļūdeņraži un metāns. Balstoties uz šīm vielām, arī iedala turpmākas singāzes izmantošanas iespējas. Singāzi aktīvi lieto ūdeņraža iegūšanai, veicot singāzes atdzesēšanu un saspiešanu [9]. Papildus singāzi bieži izmanto kā izejvielu degvielas iegūšanai, lietojot Fišera-Tropša procesu [10]. Lai ražotu šādus produktus Latvijā, vispirms ir nepieciešams izpētīt singāzes ražošanas iespējas no valsts pieejamās biomasas resursiem un rast optimālus tehnoloģiskus risinājumus.

1.2. Biomasas gazifikācijas tehnoloģiskā risinājuma izvēle

Gazifikācijas process notiek speciālā reaktorā jeb gazifikatorā. Gazifikatora tehnoloģiskajiem risinājumiem ir būtiska ietekme uz procesa norisi un iegūtās singāzes īpašībām. Mūsdienās eksistē daudz dažādu gazifikatoru, bet ne visi ir piemēroti biomasas izmantošanai. Kopumā biomasu visbiežāk gazificē, izmantojot nekustīgo ārdi gazifikatorus ar augšupvērstu vai lejupvērstu velkmi vai verdošā slāņa gazifikatoru tipus (skatīt 1.1. attēlu).



1.1. attēls. Lejupvērstas velkmes (pa kreisi) un augšupvērstas velkmes (pa centru) gazifikatori ar nekustīgiem ārdiem un verdoša slāņa (pa labi) gazifikators.

Gazifikatora tips būtiski ietekmē gazifikācijas procesa norisi (skatīt 1.1. tabulu). Darvas daudzums ir ievērojami zemāks no lejupvērsta gazifikatora, pateicoties tam, ka pirolīzes zonā izveidotā darva tālāk iziet caur karstām oksidācijas un reducēšanas zonām, kur tiek aktīvi sadalīta, pateicoties augstai temperatūrai. Augšupvērstas velkmes gazifikatoros ir pretēji, singāze pirms izejas šķērso pirolīzes un žāvēšanas zonu ar relatīvi zemu temperatūru. Rezultātā darvas daudzums var sasniegt līdz pat 50 g/Nm^3 . Singāzes temperatūra izejā no lejupvērstas velkmes un verdoša slāņa

gazifikatoriem var būt vairāk nekā divas reizes lielāka par augšupvērsta velkmes un sasniegt 700 °C un pat augstāk. Veicot singāzes dzesēšanu, var iegūt papildu lietderīgās enerģijas daudzumu.

1.1. tabula

Gazifikatora tipa ietekme uz gazifikācijas procesu

	Lejupvērsta velkmes	Augšupvērsta velkmes	Verdošā slāņa
Darvas daudzums, g/Nm ³	< 1	50	10
Singāzes temperatūra, °C	700	300	750
Singāzes sadegšanas siltums, MJ/Nm ³	4,5–5	5–6	6
Kopēja efektivitāte, %	85–90	90–95	75–90
Optimāla termiskā jauda, MW	Līdz 1	1–10	1–100

Augstāks sadegšanas siltums ir singāzei no verdošā slāņa gazifikatoriem. Galvenais iemesls ir lieliska kurināmā un gazifikācijas aģenta sajaukšanās. Augstāka temperatūra lejupvērsta velkmes gazifikatoros sekmē to, ka oksidēšanās reakcijas notiek ievērojami aktīvāk, un līdz ar to tiek sadedzināts lielāks daudzums ievadītās kurināmā enerģijas. Kopējā gazifikācijas procesa efektivitāte ir diezgan augsta visiem gazifikatora tiem – ap 90 %.

Lejupvērsta velkmes gazifikatori ir projektēti strādāt ar jaudu līdz 1 MW, augšupvērsta velkmes gazifikatori – ar jaudu no 1 MW līdz 10 MW. Izvēloties lielāku jaudu, bieži ir grūti panākt kvalitatīvu kurināmā un gazifikācijas aģenta sajaukšanos. Rūpniecisko verdoša slāņa gazifikatoru jauda parasti ir vēl lielāka un svārstās no 1 MW līdz 100 MW. Bieži optimālais gazifikatora jaudas diapazons ir noteicošs parametrs, izvēloties gazifikatora veidu, projektējot jaunu gazifikācijas staciju.

1.3. Gazifikācijas procesu ietekmējošie faktori

Gazifikācijas process ir atkarīgs no visai liela dažādu faktoru daudzuma. Tas ir viens no galvenajiem aspektiem, kas ierobežo plašu gazifikācijas izmantošanu pasaulē. Gazifikatora veids un dizains, temperatūra gazifikatorā, gazifikācijas aģents, gaisa patēriņa koeficients, kurināmā mitrums, izmērs, pelnu daudzums un blīvums ir tikai daži no faktoriem, kam ir būtiska ietekme uz gazifikācijas procesa norisi un iegūtās singāzes kvalitāti.

Temperatūra gazifikatorā būtiski svārstās starp zonām. Par gazifikācijas temperatūru ir pieņemts uzskatīt maksimālo temperatūru reaktorā, kas lejupvērsta un augšupvērsta tipa gazifikatoros veidojas oksidācijas zonā. Temperatūrai gazifikatorā ir noteicoša ietekme uz gazifikācijas procesu un praktiski uz visām reakcijām, kas norisinās gazifikatorā. Līdz ar to temperatūra gazifikatorā tieši vai netieši veidā ietekmē saražotas singāzes sastāvu, sadegšanas siltumu un daudzumu, oglekļa pārveidošanas koeficientu, gazifikācijas procesa efektivitāti un citus parametrus.

Kurināmā sastāvā esošais ogleklis reaģē ar pirolīzes zonā izdalīto CO₂ ievērojami aktīvāk pie augstām temperatūrām. Šo procesu atspoguļo Buduāra reakcija, bet rezultātā palielinās CO daudzums singāzes sastāvā. Gazifikācijas temperatūras pieaugums sekmē ūdens-gāzes un tvaika-oglekļa reakcijas aktivitātes pieaugumu, kura rezultātā pieaug H₂ daudzums singāzē. Temperatūras pieaugums palielina arī metanācijas reakcijas aktivitāti, kas sekmē saražotā CH₄ daudzuma

pieaugumu. Tomēr, sasniedzot noteikto kritisko temperatūru gazifikatorā, degšanas procesa reakcijas kļūst ievērojami aktīvākas, kā rezultātā CO, H₂ un CH₄ daudzums sāk strauji samazināties [11], [12].

Var secināt, ka, palielinoties temperatūrai gazifikatorā pie mazām temperatūrām, singāzes sadegšanas siltumam un gazifikācijas procesa efektivitātei vajag pieaugt, pateicoties CO, H₂ un CH₄ daudzuma pieaugumam. Tomēr, sasniedzot noteiktu temperatūras vērtību, singāzes sadegšanas siltums sāk samazināties būtiska oglekļa monoksīda daudzuma krituma dēļ, ka arī metāna daudzuma samazinājuma dēļ.

Kaut arī temperatūrai ir noteicoša loma gazifikācijas procesā, tomēr šis parametrs ir atkarīgs no daudziem citiem faktoriem un nevar tikt izmantots kā neatkarīgais mainīgais. Gaisa patēriņa koeficients un izmantotā kurināmā mitrums ir divi faktori, kuriem ir noteicoša ietekme uz temperatūru gazifikatorā.

Kopā ar kurināmo gazifikatorā tiek ievadīts noteikts daudzums gazifikācijas aģenta. Gazifikācijas aģenta uzdevums ir nodrošināt biomasas sadalīšanos un daļēju degšanu. Gazifikācijas aģents parasti tiek ievadīts oksidācijas zonā un piedalās degšanas reakcijās. Kopumā ir trīs biežāk izmantotie gazifikācijas aģenta veidi – gaiss, tvaiks un skābeklis. Skābekļa un tvaika izmantošanai ir noteiktas priekšrocības, kas izpaužas kā paaugstināts singāzes sadegšanas siltums 10 līdz 28 MJ/Nm³, izmantojot attiecīgi tvaiku vai gaisu. Skābeklis veido tikai ap 23 % no kopējās gaisa masas, bet galvenais elements gaisā ir slāpeklis, kura īpatsvars pārsniedz 75 %. Līdz ar to, izmantojot gaisu kā gazifikācijas aģentu, ir jāreķinās ar augstu slāpekļa daudzumu saražotajā singāzē. Singāzes sadegšanas siltums svārstās no 4 līdz 7 MJ MJ/Nm³, kā aģentu izmantojot gaisu. Neskatoties uz visu iepriekš minēto, kopumā gaiss kā gazifikācijas aģents tiek izmantots ievērojami biežāk. Tas saistīts ar papildu izmaksām, kas nepieciešamas tvaika un skābekļa iegūšanai un būtiski palielina arī saražotās singāzes izmaksas [13].

Kurināmā pilnīgai sadegšanai ir nepieciešams pievadīt noteiktu skābekļa daudzumu. Ņemot vērā to, ka arī gazifikācijas procesam ievērojami biežāk par aģentu izmanto gaisu, reķinot nepieciešamo skābekļa daudzumu, ērtības nolūkos uzreiz reķina gaisa daudzumu, ko ir nepieciešams ievadīt gazifikatorā. Šo gaisa daudzumu sauc par teorētiski nepieciešamo gaisa daudzumu, un tas ir atkarīgs no kurināmā ķīmiskā sastāva.

Reālo padoto gaisa daudzumu raksturo ar gaisa patēriņa koeficientu, kas ir attiecība starp reālo gazifikatorā ievadīto gaisa daudzumu un teorētiski nepieciešamo. Galvenā gazifikācijas procesa atšķirība no degšanas procesiem ir saistīta ar to, ka process notiek skābekļa trūkuma apstākļos, kā rezultātā notiek tikai daļēja kurināmā oksidēšana jeb degšana. Gaisa patēriņa koeficients var svārstīties atkarībā no gazifikatora tipa un izmantotiem operēšanas iestatījumiem, to bieži apzīmē ar *ER* (*equivalence ratio*).

Singāzes sastāvs, kā arī gazifikācijas procesa norise kopumā, lielā mērā ir atkarīga no gaisa patēriņa koeficienta. Palielinot ievadītā skābekļa daudzumu, pieaug oksidācijas reakcijas aktivitāte, kā rezultātā lielāks kurināmā daudzums tiek sadedzināts, izdalās vairāk siltuma un pieaug temperatūra gazifikatorā. Līdz ar to gaisa patēriņa koeficienta pieaugumam ir līdzīga ietekme uz gazifikācijas procesu kā temperatūras palielināšanas gadījumā. Būtiski, ka, palielinot gaisa patēriņa koeficientu, strauji pieaug N₂ daudzums singāzē, kas sekmē gan singāzes sadegšanas siltuma, gan kopējā gazifikācijas procesa efektivitātes samazinājumu [14], [15]. Veiktā literatūras analīze parāda, ka pie gaisa patēriņa koeficienta robežās no 0,25 līdz 0,30 visbiežāk tiek nodrošināta optimāla gazifikācijas procesa norise.

Izmantotā kurināmā īpašībām ir būtiska ietekme uz saražotās singāzes ķīmisko sastāvu, kā arī gazifikācijas procesu kopumā. Pirmkārt, tas attiecas uz kurināmā mitrumu. Ūdens daudzums kurināmajā var būtiski atšķirties – no 5 līdz 10 % granulām un briketēm līdz 40 % un vairāk šķeldai. Izmantojot mitro kurināmo, noteikts kurināmā enerģijas daudzums tiek izmantots ūdens iztvaikošanai, kā rezultātā samazinās gan saražotās singāzes sadegšanas siltums, gan kopējā gazifikācijas procesa efektivitāte. Tas saistīts ar to, ka CO daudzums singāzē ievērojami samazinās, palielinoties kurināma mitrumam. Palielinoties kurināmā mitrumam, pieaug kopējais gazifikatorā ievadītais ūdeņraža daudzums. Pie neliela kurināmā mitruma tvaika-oglekļa un ūdens-gāzes reakcijas notiek aktīvi, kā rezultātā H_2 sākotnēji pieaug. Tomēr, kurināmā mitrumam sasniedzot noteiktu kritisko robežu, H_2 daudzums singāzes sastāvā sāk samazināties būtiska temperatūras krituma dēļ gazifikatorā. CH_4 īpatsvars singāzē pieaug, pateicoties kurināmā mitruma palielināšanai. Tomēr CH_4 pieaugums nespēj kompensēt būtisko CO un H_2 daudzuma samazinājumu pie augsta kurināmā mitruma, kā rezultātā singāzes sadegšanas siltums un gazifikācijas procesa efektivitāte samazinās. Papildus būtiski pieaug H_2O tvaika daudzums singāzē, izmantojot slapjo biomasu, kas var izraisīt gazifikācijas procesa apturēšanu aktīvās H_2O tvaika kondensācijas dēļ [16], [17].

Atkarībā no izmantotā biomasas veida var ievērojami svārstīties kurināmā daļiņu izmērs. Pieaugot kurināmā daļiņu izmēram, palielinās to uzkarsēšanas un žāvēšanas laiks. Temperatūras nevienlīdzības pieaugšana starp kurināmā virsmu un daļiņas vidusdaļu sekmē to, ka rezultātā samazinās CO un CH_4 daudzums singāzes sastāvā. Līdz ar to šķeldas izmantošanas gadījumā ir jāseko, lai kurināmā izmērs būtu piemērots [18].

Neapšaubāmi, ka gazifikācijas procesa norise, ieskaitot saražotās singāzes sadegšanas siltumu un kopējo gazifikācijas procesa efektivitāti, ir atkarīga no kurināmā ķīmiskā sastāva [19]. Izmantojot kurināmo ar palielinātu pelnu daudzumu, ir nepieciešams izvērtēt pelnu novadīšanas sistēmas optimizācijas nepieciešamību. Kurināmā paaugstināta pelnainība traucē gaistošo vielu izdalīšanos no kurināmā, kā arī bioogļu pilnīgu sadalīšanos [20]. Kvalitatīvas šķeldas gadījumā pelnu daudzums tipiski ir ap 1 %, kas nerada problēmas gazifikācijas procesa veiksmīgai organizācijai.

1.4. Gazifikācijas procesa blakusprodukti

Lielākā daļa no gazifikatorā ievadītā kurināmā gazifikācijas rezultātā pārveidojas singāzē. Tomēr daļa no kurināmā nepāriet gāzveida stāvoklī, bet iziet no gazifikatora darvas veidā. Darva ir visai sarežģīts organisko savienojumu maisījums, jo satur gan vieglus savienojumus, kā fenols un benzols, gan arī smagus negaistošus polihromatiskus savienojumus. Bieži darvas ķīmisko sastāvu raksturo ar vispārīgu formulu, izmantojot trīs ķīmiskos elementus – oglekli, ūdeņradi un skābekli [21].

Darvas klātbūtne singāzē atstāj negatīvu ietekmi uz tālākām singāzes izmantošanas iespējām. Darvas akumulēšanās var radīt negatīvu ietekmi uz gazifikatora darbību, aizsprostojot caurules, un būt par iemeslu gazifikatora darbības apturēšanai. Līdz ar to ir svarīgi panākt darvas daudzuma samazināšanu singāzē. Uzsvars ir jāliek uz darvas veidošanās daudzuma samazināšanas metodēm, jo tām ir lielāks efekts un tās samazina nepieciešamību pēc singāzes attīrīšanas no darvas [8].

Noteikts kurināmā daudzums netiek pārveidots singāzē, bet paliek cietā formā. Šo cieto pārpalikumu sauc par biooglēm. Līdzīgi kā darvas gadījumā, bioogļu sastāvu raksturo trīs ķīmiskie elementi – ogleklis, ūdeņradis un skābeklis. Bioogļu galvenais komponents ir ogleklis, un to sadegšanas siltums ir visai augsts un var pārsniegt 30 MJ/kg. Rezultātā saražotās bioogles arī var izmantot enerģijas iegūšanai [22].

Darvas un bioogles daudzums, kas tiek saražots gazifikācijas procesa rezultātā, būtiski svārstās atkarībā no vairākiem faktoriem. Kā jau bija teikts, darvas daudzums atšķiras no izmantotā gazifikatora tipa. Vismazākais darvas daudzums parasti veidojas, izmantojot lejupvērstus gazifikatorus. Gazifikācijas temperatūrai ir dominējoša nozīme uz darvas veidošanās procesu un kopējo bioogles daudzumu. Temperatūras palielināšanās gazifikatorā sekmē ogļūdeņražu sadalīšanās reakciju aktivitātes pieaugumu, kā rezultātā būtiski samazinās darvas daudzums [23]. Pie paaugstinātas temperatūras pieaug arī bioogles sadalīšanās reakciju aktivitāte reducēšanas zonā [24].

Tomēr, kā jau iepriekš teikts, gazifikācijas temperatūra ir atkarīgais faktors, ko ietekmē daudzi citi parametri. Gaisa patēriņa koeficienta pieaugums sekmē darvas un bioogles daudzuma samazinājumu izejā no gazifikatora [25], [18]. Dažreiz gazifikatoros tiek organizēta divpakāpju gaisa padošanas sistēma, ievadot gaisu dažādos augstumos vai pat zonās, lai palielinātu gāzu izdalīšanos no biomasas un samazinātu darvas un bioogļu daudzumu [26].

Izmantojot kurināmo ar lielāku mitrumu, temperatūra gazifikatorā samazinās, kas sekmē darvas un bioogles daudzuma pieaugumu [25]. Pieaugot kurināmā daļiņu izmēram, pieaug temperatūras nevienlīdzība starp kurināmā virsmu un daļiņām. Tas savukārt sekmē darvas un bioogles daudzuma pieaugumu [18].

Darvas un bioogles iznākumu gazifikācijas procesā matemātiskā modelēšana ir visai ierobežota, jo šo produktu veidošanās process ir atkarīgs no liela faktoru daudzuma. Lielākajā daļā biomasas gazifikācijas modeļu darva un bioogles vispār netiek iekļauti. Dažreiz darvas un bioogļu daudzums tiek pieņemts kā konstanta vērtība, un to daudzums nemainās atkarībā no gazifikatora darbības parametriem [27].

1.2. tabulā atspoguļoti literatūrā pieejamie zinātniskie raksti, kur ir parādīti darvas un bioogļu daudzumi dažādos biomasas gazifikācijas apstākļos. Gazifikatora tipam un gazifikācijas aģentam ir būtiska ietekme uz darvas un bioogļu veidošanās apjomiem, tāpēc tiek analizēti tikai viena tipa gazifikatori ar lejupvērsta tipa reaktoru, kur par gazifikācijas aģentu izmanto gaisu. Tas tika darīts, lai samazinātu darvas un bioogļu koncentrāciju izkļiedī. Tabulā ir norādīti tikai tie raksti, kas atspoguļo reālus darvas un bioogļu daudzumus, veicot gazifikācijas eksperimentālo izpēti.

1.2. tabula

Zinātnisko rakstu apkopojums par darvas un bioogļu veidošanos

Gazifikācijas temperatūra, °C	Gaisa/kurināmā attiecība	Biomasas mitrums, %	Pelnu daudzums, %, (sausais)	Avots
930–1040	1,29–2,88	6,17	5,93	[15]
821–1206	1,37–1,64	12,5	0,77	[28]
553–755	1,04–1,63	6,00–11,0	0,50–1,4	[29]
705–920	0,87–1,85	4,37–15,2	3,90	[30]
830–1120	0,96–1,83	4,40–14,9	0,40–21,8	[31]
1009–1077	2,28–2,69	11,8	23,5	[32]
870–1108	1,11–1,28	8,00	0,55	[33]
773	1,88	18,0	1,3	[34]

Tika analizēti dati par saražotajiem darvas un bioogļu daudzumiem atkarībā no dažādiem parametriem, izmantojot 1.2. tabulā minētos zinātniskos rakstus. Datu analīze tika veikta, izmantojot programmu *STATGRAPHICS Centurion 16.1.17*. Rezultātā tika iegūti divi regresijas vienādojumi. Tika noteikts, ka saražotais darvas daudzums ir atkarīgs no gazifikācijas temperatūras, gaisa un kurināmā attiecības, kā arī mitruma daudzuma kurināmajā. Vienādojumā darvas daudzums tiek atspoguļots kā saražotās darvas masa izejā no gazifikatora attiecībā pret kopējo gazifikatorā ievadīto produktu daudzumu (kurināmais ar gaisu) jeb darvas īpatsvars kopējā produktu daudzumā, kas tiek saražots gazifikācijas rezultātā (1.1. vienādojums):

$$w_{tar} = (6,411 - 0,203\sqrt{T_g})^2 + 0,248AF - 0,024W_f \quad (1.1.)$$

Apzīmējumi: w_{tar} – darvas daudzums attiecībā pret kopējo gazifikatorā ievadīto produktu daudzumu, %; T_g – temperatūra gazifikatora reaktorā, °C; AF – gazifikatorā ievadītā gaisa daudzuma attiecība pret ievadīto kurināmā daudzumu, m³/kg.

Savukārt otrajā vienādojumā saražoto bioogļu daudzums ir atkarīgs no gazifikācijas temperatūras, ievadītā gaisa un kurināmā attiecības, mitruma un pelnu daudzuma kurināmajā. Vienādojumā bioogļu daudzums tiek atspoguļots kā saražoto bioogļu masa attiecībā pret gazifikatorā ievadīto kurināmā daudzumu (1.2. vienādojums).

$$w_{char_f} = (6,443 - 0,006T_g)^2 + 2,108AF + 0,193W_f + 0,487A_f \quad (1.2.)$$

Apzīmējumi: w_{char_f} – bioogļu daudzums attiecībā pret gazifikatorā ievadīto kurināmā daudzumu, %.

Iepriekš minēto vienādojumu ir iespējams izmantot, lai izteiktu bioogļu daudzumu attiecībā pret gazifikatorā ievadīto kurināmā un gaisa daudzumu jeb bioogļu īpatsvaru kopējā produktu daudzumā, kas tiek saražots gazifikācijas rezultātā (1.3. vienādojums).

$$w_{char} = \frac{m_f w_{char_f}}{m_{in}} \quad (1.3.)$$

Apzīmējumi: w_{char} – bioogļu īpatsvars pret kopējo gazifikatorā ievadīto produktu daudzumu, %; m_f – gazifikatorā ievadītais kurināmā daudzums, kg; m_{in} – kopējais gazifikatorā ievadītais produktu daudzums, kg.

Abu regresijas vienādojumu analīze ir atspoguļota 1.3. tabulā. Korelācijas koeficienti R^2 parāda, ka modeļi atspoguļo 77,60 % un 68,24 % darvas un bioogu vērtības, kas tika analizētas. Standartkļūdu vērtības ir samērā zemas, it īpaši pirmajam vienādojumam, kas liecina par to, ka regresijas vienādojumus var veiksmīgi izmantot darvas un bioogļu daudzumu noteikšanai dažādu parametru gadījumā. Kopumā abos vienādojumos temperatūrai ir vislielākā ietekme uz atkarīgo parametru.

Regresijas vienādojumu analīze				
Regresijas vienādojums	Atkarīgais parametrs	R^2 , %	Koriģētais R^2 , %	Standartklūda
I	Darva	77,60	75,81	0,51
II	Bioogles	68,24	63,67	2,13

Ar veikto datu analīzi, iegūtajiem regresijas vienādojumiem, kā arī ar šo vienādojumu izmantošanas iespējām un priekšrocībām gazifikācijas procesa matemātiskajos modeļos var iepazīties publikācijā zinātniskajā žurnālā “Agronomy Research 14(4)” [35].

2. GAZIFIKĀCIJAS PROCESA MATEMĀTISKĀ MODELĒŠANA

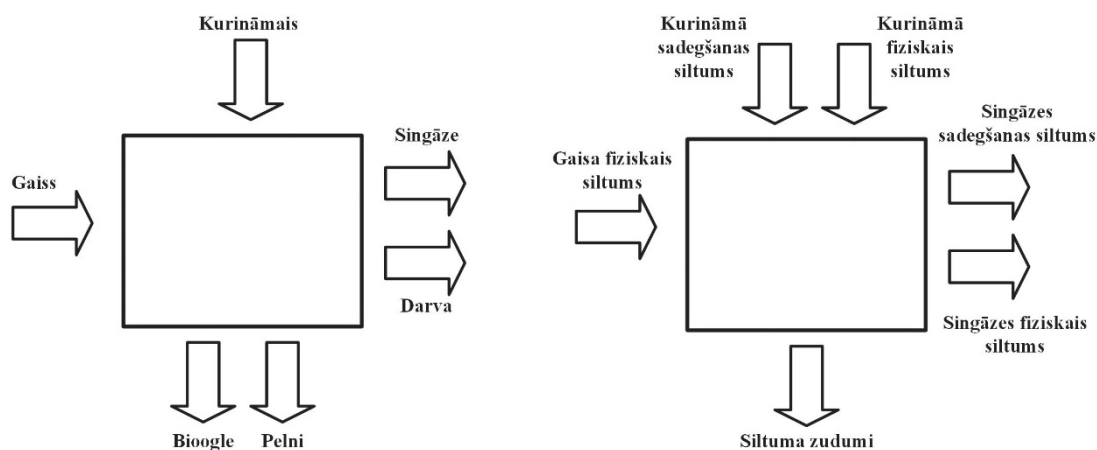
2.1. Gazifikācijas modeļa apraksts

Biomases gazifikācijas procesa norise ir atkarīga no ievērojama faktoru daudzuma. Tas nozīmē, ka ir nepieciešams veikt lielu eksperimentu daudzumu, lai noteiktu visu faktoru ietekmi. Tāpēc mūsdienās pieaug modelēšanas loma gazifikācijas procesa izpētē. Matemātiskie modeļi var tikt izmantoti, lai modelētu un pētītu gan fizikālus, gan ķīmiskus procesus, kas notiek gazifikatorā. Būtiski ir tas, ka ar modeļu palīdzību var iegūt rezultātus pie konkrētām operēšanas parametru vērtībām. Eksperimentālās izpētes gadījumā, it īpaši rūpnieciskos eksperimentos, dažreiz ir visai grūti sasniegt nepieciešamo parametru vērtības, un veidojas noteikta nobīde. Bieži matemātiskie modeļi tiek izmantoti, lai noteiktu optimālus gazifikatora ģeometriskos parametrus – gazifikatora garumu, zonu sadalījuma attiecības, padotā gaisa augstumu. Papildus, izmantojot matemātiskos modeļus, var simulēt gazifikatora darbību pie kritiskiem apstākļiem, nosakot maksimālos pieļaujamās darba diapazonus operēšanas faktoriem. Modelēšanas gadījumā lielāku laiku aizņem paša modeļa izveide, bet simulācijas veikšana un datu iegūšana neprasa būtiskus laika resursus, kā arī finansiālus resursus, salīdzinot ar eksperimentālo izpēti.

Darba gaitā tika izveidots biomasas gazifikācijas procesa modelis, kas balstīts uz termodinamiskās likumiem un reakcijām. Balstoties uz 1. nodaļā veikto literatūras analīzi un sniegto gazifikācijas tehnoloģiju salīdzinājumu, izstrādātais modelis apraksta gazifikācijas procesu lejupvērsta tipa gazifikatoram, kur kā gazifikācijas aģents tiek izmantots gaiss. Tika pieņemts, ka gazifikācijas rezultātā saražoto singāzi veido tikai sešas gāzes: CO, CO₂, H₂, CH₄, N₂ un H₂O tvaiks. Papildus singāzei gazifikācijas procesa rezultātā rodas vēl divi blakusprodukti – darva un bioogles –, kas arī ir iekļauti modelī atšķirībā no daudziem citiem literatūrā pieejamajiem modeļiem. Balstoties uz veikto literatūras apskatu, galvenie mainīgie parametri, kuriem ir dominējoša ietekme uz gazifikācijas procesa norisi, ir gaisa patēriņa koeficients un kurināmā mitrums. Modelis veidots galvenokārt tieši šo faktoru ietekmes izpētei un optimālās vērtības noteikšanai, lai sasniegtu maksimālo gazifikācijas procesa efektivitāti.

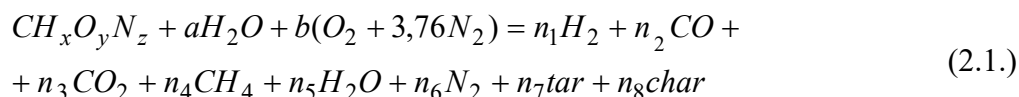
Masas un enerģijas bilance modelī atbilst reālā procesa plūsmām. Masas bilanci modelī veido divas ieejošās un četras izejošās plūsmas. Galvenā ieejošā plūsma ir kurināmais, ieskaitot tā sastāvā esošos pelnus un mitrumu. Otra ieejošā plūsma ir gaiss, kas tiek izmantots kā gazifikācijas aģents. Lielākā daļa no ievadītā materiāla tiek izvadīta no gazifikatora singāzes veidā. Kopā ar singāzi tiek izvadīta arī darva. Daļa no kurināmā gazifikācijas procesā nesadalās pilnīgi, bet pārveidojas biooglēs. Kopā ar biooglēm tiek izvadīti arī pelni.

Enerģijas bilanci modelī veido trīs ieejošās un trīs izejošās plūsmas (skatīt 2.1. attēlu). Dominējošs siltuma daudzums tiek ievadīts gazifikatorā ar kurināmā sadegšanas siltumu. Relatīvi neliels enerģijas daudzums tiek ievadīts ar gaisa fizisko siltumu. Šo siltuma daudzumu var palielināt, paaugstinot reaktorā ievadītā gaisa temperatūru. Enerģijas bilanci veido trīs izejošās plūsmas, lielākā no kurām ir enerģija, kas atrodas singāzes sastāvā esošo degošo gāzu veidā. Singāzes temperatūra izejā no gazifikatora ir visai augsta, un līdz ar to fiziskais siltums arī ir ievērojama enerģijas bilances sastāvdaļa. Papildus, kā jebkurā citā termodinamikas procesā, veidojas siltuma zudumi.



2.1. attēls. Gazifikācijas procesa masas (pa kreisi) un enerģijas (pa labi) bilances.

Izstrādāto matemātisko modeli ir iespējams aprakstīt ar vispārīgu vienādojumu, ko veido biomasas ķīmiskais sastāvs un mitrums, kā arī ievadītais gaiss, bet procesa rezultātā veidojas singāze, kas sastāv no sešām gāzēm, kā arī no darvas un bioogles (2.1. vienādojums).



Apzīmējumi: $CH_xO_yN_z$ – sausais kurināmais, kmol a – ūdens daudzums kurināmajā, kmol; b – gaisa daudzums, kmol; n_1H_2 – ūdeņraža daudzums, kmol; n_2CO – oglekļa monoksīda daudzums, kmol; n_3CO_2 – oglekļa dioksīda daudzums, kmol; n_4CH_4 – metāna daudzums, kmol; n_5H_2O – ūdens tvaika daudzums, kmol; n_6N_2 – slāpekļa daudzums, kmol; n_7tar – darvas daudzums, kmol; n_8char – bioogļu daudzums, kmol.

Matemātiskais modelis balstīts uz vairākiem vienādojumiem, kuriem ir obligāti jāpiepildās gazifikācijas procesā. Vispirms tie ir oglekļa, ūdeņraža un skābekļa masas bilances vienādojumi (2.2.–2.3. vienādojums):

$$n_2CO + n_3CO_2 + n_4CH_4 + n_7tar + n_8char - 1 = 0 \quad (2.2.)$$

$$n_1H_2 + 2n_5H_2O + 4n_4CH_4 + n_7tar \cdot x_{tar} + n_8char \cdot x_{char} - x - 2aH_2O = 0 \quad (2.3.)$$

$$n_2CO + 2n_3CO_2 + n_5H_2O + n_7tar \cdot y_{tar} + n_8char \cdot y_{char} - aH_2O - 2b(O_2 + 3,76N_2) - y = 0 \quad (2.4.)$$

Apzīmējumi: x_{tar} – ūdeņraža molekulārais īpatsvars darvā; x_{char} – ūdeņraža molekulārais īpatsvars biooglēs; y_{tar} – skābekļa molekulārais īpatsvars darvā; y_{char} – skābekļa molekulārais īpatsvars biooglēs.

Biomassas gazifikācijas gaitā notiek daudzas reakcijas. Divas no tām – ūdens tvaika konvekcijas reakcija un metāna reakcija – tiek izmantotas kā obligāti nosacījumi matemātiskajā modelī (2.5.–2.6. vienādojums):

$$n_3CO_2 \cdot n_1H_2 - n_2CO \cdot n_5H_2O \cdot e^{\left\{\left(\frac{4276}{T}\right) - 3.961\right\}} = 0 \quad (2.5.)$$

$$n_4CH_4 \cdot n_{kop} - n_1H_2^2 \cdot EXP\left(\frac{7082,842}{T} - 6,567 \ln T + \frac{(7,467 \cdot 10^{-3})T}{2} - \frac{2,167 \cdot 10^{-6}}{6}T^2 + \frac{0,702}{2T^2} + 32,541\right) = 0 \quad (2.6.)$$

Apzīmējumi: T – gazifikācijas temperatūra, °C.

Izstrādātais modelis aprēķina arī gazifikācijas procesā radīto darvas un bioogļu daudzumu. Šo daudzumu ir iespējams izteikt divos veidos. Pirmkārt, darvas un bioogļu daudzums ir šo produktu molārā daudzuma un molmasas attiecības reizinājums. Otrkārt, darvas un bioogļu daudzums ir atkarīgs no gazifikācijas temperatūras, gaisa un kurināmā attiecības, mitruma un pelnu daudzuma kurināmajā. 1.4. sadaļā ir detalizēti aprakstītas šīs sakarības, kā arī atspoguļoti regresijas vienādojumi. Līdz ar to var izveidot divus vienādojumus (2.7.–2.8.):

$$n_7tar \cdot M_{tar} = m_{in} w_{tar} \quad (2.7.)$$

$$n_8char \cdot M_{char} = m_{in} w_{char} \quad (2.8.)$$

Apzīmējumi: M_{tar} – darvas masas un molmasas attiecība, kg/kmol; M_{char} – bioogļu masas un molmasas attiecība, kg/kmol.

Gazifikācijas procesa enerģijas bilanci matemātiskajā modelī veido gazifikatorā ievadīto produktu enerģija un to fiziskais siltums, no vienas puses, un gazifikācijas procesa rezultātā radīto vielu enerģija un no gazifikācijas virsmas uz apkārtējo vidi izvadītais siltums, no otras puses (2.9. vienādojums).

$$H_{iev} + Q_{iev} = H_{prod} + Q_{izv} \quad (2.9.)$$

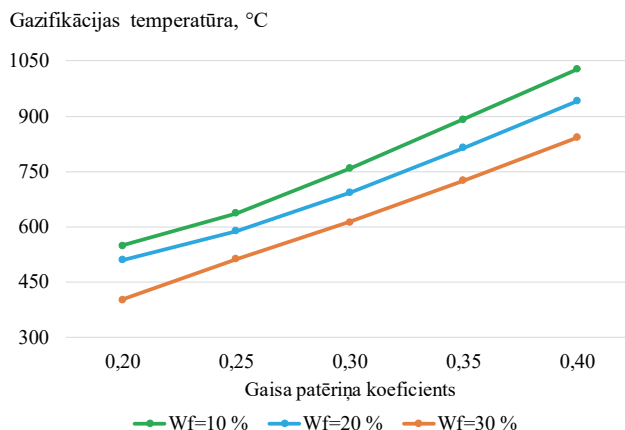
Apzīmējumi: H_{iev} – gazifikatorā ievadīto produktu enerģija, kJ/kmol; Q_{iev} – gazifikatorā ievadīto produktu fiziskais siltums, kJ/kmol; H_{prod} – gazifikācijas procesā radīto vielu enerģija, kJ/kmol; Q_{izv} – no gazifikatora virsmas uz apkārtējo vidi izvadītais siltums, kJ/kmol.

2.2. Gazifikācijas procesa modelēšanas rezultāti

Gazifikācijas modelis tika izstrādāts, lai noteiktu galvenos gazifikācijas procesu raksturojošos parametrus dažādam kurināmajam, pastāvot mainīgam gaisa patēriņa koeficientam un kurināmā mitrumam. Lai pārbaudītu, vai izstrādāto modeli var veiksmīgi izmantot gazifikācijas procesa modelēšanai, tika veikta gazifikācijas procesa simulēšana ar kurināmo, kas izmantots eksperimentālajā izpētē un ko var raksturot ar ķīmisko formulu $CH_{1.47}O_{0.66}$.

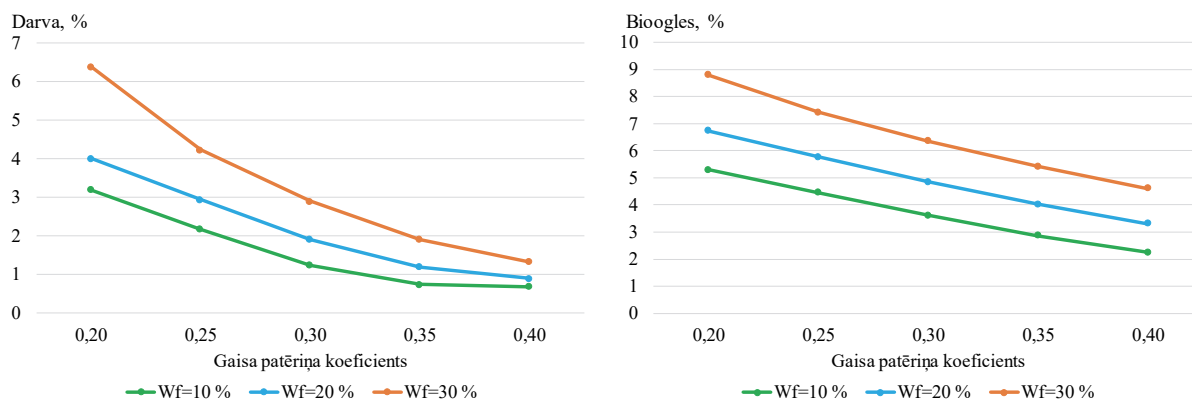
Gazifikācijas procesa modelēšana notika ar vairākiem kurināmā mitruma variantiem – 10 %, 20 % un 30 % –, lai noteiktu, ar kādu pieļaujamo mitrumu var izmantot šķeldu kā kurināmo. Simulācijas rezultāti liecina par to, ka, palielinoties gaisa patēriņa koeficientam, gazifikācijas temperatūra pieaug līdz 840–1030 °C atkarībā no kurināma mitruma (skatīt 2.2. attēlu). To var skaidrot ar to, ka, pieaugot gazifikatorā ievadītam gaisa daudzumam, pieaug gazifikatorā notiekošo

oksidāciju reakciju aktivitāte. Savukārt kurināmā mitruma pieaugums sekmē to, ka pieaug enerģijas daudzums, ko ir nepieciešams patērēt, lai iztvaikotu viss ūdens, kas atrodas kurināmā sastāvā. Tā rezultātā temperatūra gazifikatorā samazinās par 150–190 °C.



2.2. attēls. Kurināmā mitruma un gaisa patēriņa koeficienta ietekme uz gazifikācijas temperatūru.

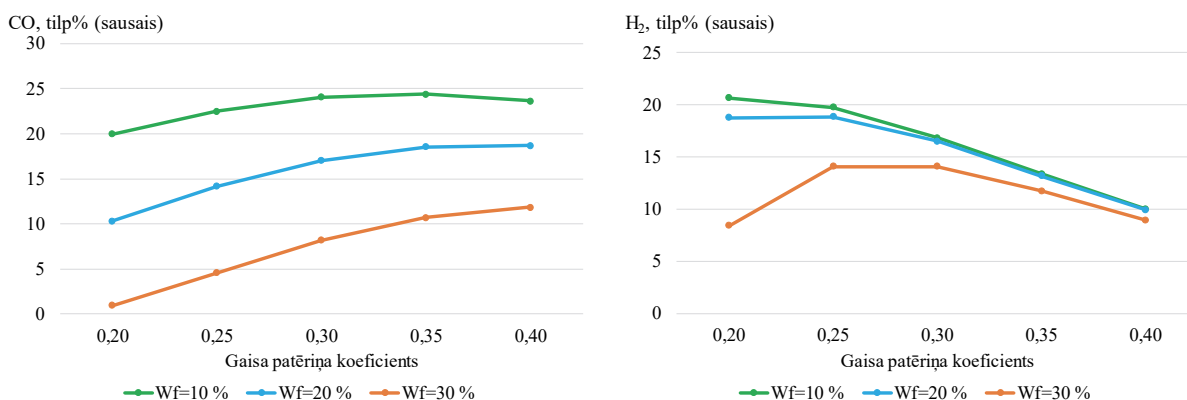
Matemātiskās modelēšanas rezultāti liecina par to, ka, pieaugot gaisa patēriņa koeficientam, darvas un bioogļu īpatsvars attiecībā pret kopējo izvadīto produktu daudzumu samazinās (skatīt 2.3. attēlu). Gaisa patēriņa koeficienta pieaugums sekmē to, ka pieaug temperatūra reaktorā. Savukārt temperatūras pieaugums sekmē ogļūdeņražu sadalīšanās reakciju aktivitātes pieaugumu, un tā rezultātā darva lielākoties tiek pārveidota savienojumos ar zemāku molekulāro masu un piedalās reakcijās reducēšanas zonā. Arī bioogles sadalīšana notiek ievērojami aktīvāk pie augstākām temperatūrām. Kurināmā mitruma pieaugums, pretēji, veicina gazifikācijas temperatūras pazemināšanos, un tā rezultātā atkarībā no gaisa patēriņa koeficienta attiecīgi pieaug gan darvas, gan bioogles daudzums par 0,6–3,2 % un 2,4–3,5 %.



2.3. attēls. Kurināmā mitruma un gaisa patēriņa koeficienta ietekme uz darvas (pa kreisi) un bioogles (pa labi) īpatsvaram attiecībā uz kopējo izvadīto produktu daudzumu.

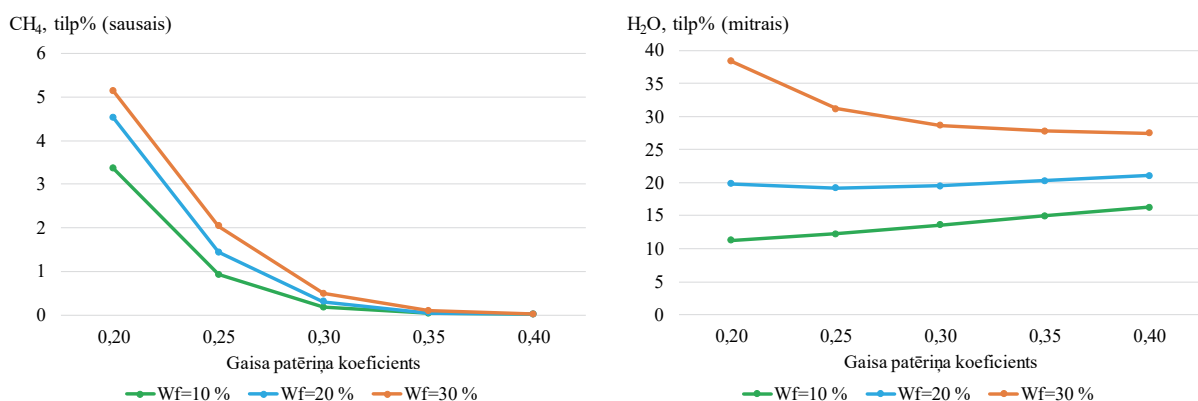
Gaisa patēriņa koeficienta un kurināmā mitruma izmaiņas netiešā veidā atstāj visai būtisku ietekmi uz saražotās singāzes sastāvu. Praktiski visas reakcijas, kas notiek gazifikatorā, ir atkarīgas no temperatūras. Pieaugot temperatūrai, palielinās Buduāra reakcijas aktivitāte – kurināmā sastāvā esošais ogleklis reaģē ievērojami aktīvāk ar pirolīzes zonā izdalīto CO₂. Rezultātā, palielinoties gaisa patēriņa koeficientam, pieaug CO koncentrācija singāzē, bet, palielinoties kurināmā mitrumam, CO koncentrācija samazinās par 11,8–19,0 %. (skatīt 2.4. attēlu). Būtiski, ka, gazifikācijas temperatūrai

sasniedzot noteiktu robežu, CO daudzums sāk pretēji samazināties. Gazifikācijas temperatūras pieauguma rezultātā palielinās arī ūdens-gāzes un tvaika-oglekļa reakciju aktivitāte. Tas savukārt sekmē H_2 daudzuma pieaugumu singāzē. Taču gazifikācijas temperatūras pieaugums sekmē to, ka pieaug oksidāciju reakciju aktivitāte, kā rezultātā H_2 tiek sadedzināts. Līdz ar to var novērot tendenci, ka zemā temperatūrā sākotnēji H_2 daudzums palielinās, tomēr, temperatūrai sasniedzot noteiktu punktu, tendence mainās, un H_2 daudzums sāk samazināties.



2.4. attēls. Kurināmā mitruma un gaisa patēriņa koeficienta ietekme uz CO un H_2 īpatsvaru singāzes sastāvā.

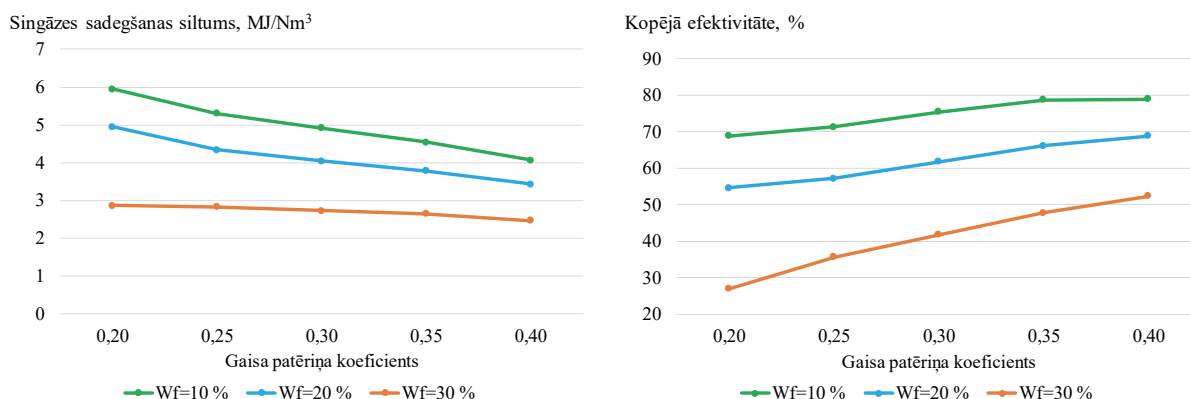
Metanācijas reakcijas aktivitāte pieaug, palielinoties temperatūrai reaktorā, tomēr ievērojami aktīvākas kļūst oksidācijas reakcijas, kuru rezultātā CH_4 tiek sadalīts CO un H_2O tvaikā. Līdz ar to CH_4 koncentrācija singāzē samazinās, palielinoties gaisa patēriņa koeficientam līdz minimumam (skatīt 2.5. attēlu). Palielinoties kurināmā mitrumam, pretēji, CH_4 daudzums pieaug.



2.5. attēls. Kurināmā mitruma un gaisa patēriņa koeficienta ietekme uz CH_4 un H_2O īpatsvaru singāzes sastāvā.

Gazifikācijas procesa rezultātā saražotajā gāzē atrodas arī noteikts H_2O tvaika daudzums, kas pēc singāzes dzesēšanas tiek kondensēts un izvadīts no singāzes. Neapšaubāmi, ka H_2O tvaikam ir negatīva ietekme uz singāzes kvalitāti un gazifikācijas norisi kopumā. Ar H_2O tvaiku netiek lietderīgi izmantots kurināmā sastāvā esošais ūdeņradis. Protams, ka kurināmā mitruma pieaugums sekmē H_2O daudzuma pieaugumu singāzē no 11,2 % augsta gaisa patēriņa koeficienta gadījumā līdz 27,1 % zema gaisa patēriņa koeficienta gadījumā. Arī palielinot ievadīto gaisa daudzumu, H_2O , galvenokārt pieaug. Galvenais iemesls ir metanācijas reakcijas, kuru rezultātā no CO un H_2 veidojas CH_4 un H_2O tvaiks.

Singāzes sadegšanas siltumu ietekmē tās sastāvā esošo CO, H₂ un CH₄ daudzums. Kaut arī gaisa patēriņa koeficienta pieaugums sekmē CO koncentrācijas pieaugumu, tomēr H₂ un CH₄ īpatsvars singāzes sastāvā samazinās. Līdz ar to var novērot, ka singāzes sadegšanas siltums samazinās par 0,4 MJ/Nm³ augsta kurināmā mitruma gadījumā un līdz 1,9 MJ/Nm³ zema kurināmā mitruma gadījumā (skatīt 2.6. attēlu). Kurināmā mitruma pieaugums atstāj negatīvu ietekmi uz saražotās gāzes sadegšanas siltumu, jo gan CO, gan H₂ koncentrācijas singāzes sastāvā samazinās un CH₄ daudzuma pieaugums nevar kompensēt singāzes sadegšanas siltuma samazinājumu. Kurināmā mitrumam pieaugot no 10 % līdz 30 %, singāzes, sadegšanas siltums samazinās par 1,6–3,1 % atkarībā no gaisa patēriņa koeficienta.



2.6. attēls. Kurināmā mitruma un gaisa patēriņa koeficienta ietekme uz singāzes sadegšanas siltumu un kopējo efektivitāti.

Pieaugot kurināmā mitrumam, gazifikācijas procesa kopēja efektivitāte samazinās par 26–40 % atkarībā no gaisa patēriņa koeficienta, ko sekmē gan singāzes sadegšanas siltuma samazinājums, gan darvas un bioogles daudzuma pieaugums. Savukārt gaisa patēriņa koeficienta izmaiņas var sekmēt gan efektivitātes pieaugumu, gan samazinājumu. Kaut arī singāzes sadegšanas siltums galvenokārt samazinās, tomēr kopējais saražotais singāzes daudzums būtiski pieaug, palielinoties gaisa patēriņa koeficientam. Jāņem vērā, ka gaisa patēriņa koeficienta pieaugums sekmē gazifikācijas temperatūras pieaugumu, kas savukārt sekmē darvas un bioogļu aktīvāku sadalīšanos.

Gazifikācijas procesa kopējā efektivitāte ir atkarīga ne tikai no kopējā saražotā singāzes daudzuma un sadegšanas siltuma, bet arī dzesēšanas rezultātā no singāzes noņemtā fiziskā siltuma. Pieaugot gaisa patēriņa koeficientam, gazifikācijas temperatūra nemitīgi aug, kas sekmē to, ka singāzes temperatūra izejā no gazifikatora arī pieaug. Līdz ar to ir iespējams no singāzes noņemt lielāku fiziska siltuma daudzumu, saražoto gāzi dzesējot. Rezultātā, pieaugot gaisa patēriņa koeficientam, gazifikācijas procesa kopēja efektivitāte nepārtraukti aug. Īpaši nozīmīgs efektivitātes pieaugums notiek, palielinot gaisa patēriņa koeficientu no 0,20 līdz 0,30, kad gazifikācijas procesa efektivitāte pieaug par 6–15 % atkarībā no kurināmā mitruma. Savukārt, palielinot gaisa patēriņa koeficientu virs 0,30, efektivitātes pieaugums kļūst ievērojami mazāks, kas saistīts ar to, ka notiek straujš saražotās singāzes sadegšanas siltuma kritums.

Rezultāti, kas tika iegūti no izstrādātā gazifikācijas procesa matemātiskā modeļa, ļauj izteikt vairākus būtiskus secinājumus. Kurināmā mitruma ietekme uz gazifikācijas procesu ir viennozīmīgi negatīva. Pieaugot mitrumam, palielinās darvas un bioogles īpatsvars kopējā saražotā produktu daudzumā, samazinās CO un H₂ gāzu koncentrācijas singāzē, kā arī samazinās singāzes sadegšanas siltums un gazifikācijas procesa efektivitātes. Savukārt gaisa patēriņa koeficienta palielināšana sekmē

darvas un bioogles sadalīšanos, un tā rezultātā pieaug singāzes kopējais daudzums, kā arī palielinās CO koncentrācija singāzē. Rezultātā kopējā gazifikācijas procesa efektivitāte pieaug. Tomēr, gaisa patēriņa koeficientam sasniedzot noteikto kritisko punktu, sāk samazināties H_2 un CH_4 gāzu koncentrācija singāzē. Kaut arī kopējā gazifikācijas procesa efektivitāte turpina nedaudz augt arī pie gaisa patēriņa koeficienta virs 0,30, tomēr svarīgi saprast, ka ievērojama daļa no biomasas enerģijas netiek pārveidota singāzē. Rezultātā tiek iegūta sliktākas kvalitātes singāze – ar mazāku H_2 un CH_4 daudzumu un sadegšanas siltumu.

3. BIOMASAS GAZIFIKĀCIJAS EKSPERIMENTĀLĀ SISTĒMA

Veiktā literatūras analīze parādīja, ka koksnes šķelda ir viens no pieejamākajiem vietējiem resursiem, ar kuru palīdzību ir iespējams palielināt no atjaunojamajiem energoresursiem saražoto enerģijas īpatsvaru kopējā enerģijas patēriņā. Tomēr šķeldas plašo izmantošanu gazifikācijas procesā ierobežo tās lielais mitruma daudzums, kas atstāj negatīvu ietekmi uz saražotās singāzes kvalitāti. Viens no risinājumiem ir kurināmā daļēja žāvēšana pirms ievadīšanas gazifikatorā. Mūsdienas eksistē daudz tehnoloģisko risinājumu, ar kuru palīdzību ir iespējams izžāvēt biomasu. Visas tehnoloģijas izmanto noteiktu siltuma daudzumu, ko var iegūt no elektrības, sadedzinot noteiktu kurināmā daudzumu, vai no cita enerģijas avota, un neapšaubāmi saistītas ar noteiktām izmaksām.

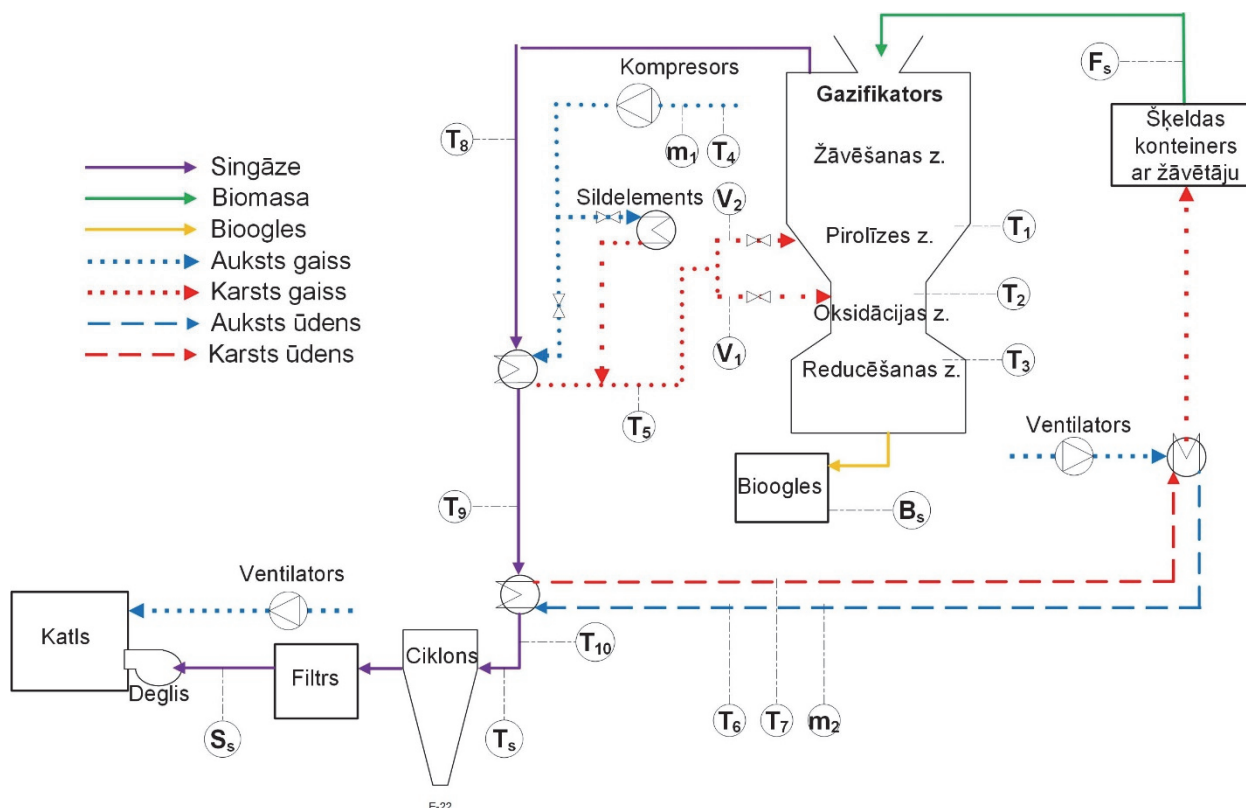
Veiktās gazifikācijas procesa modelēšanas rezultāti liecina par to, ka, veicot singāzes dzesēšanu, ir iespējams iegūt noteiktu fizisko siltuma daudzumu. Šis siltuma daudzums ir atkarīgs no daudziem faktoriem, no kuriem būtiskākie ir pievadītā gaisa daudzums, kā arī kurināmā mitrums. Singāzes fizisko siltumu var lietderīgi izmantot šķeldas daļējai žāvēšanai pirms kurināmā ievadīšanas gazifikatorā. Šādā veidā tehnoloģisko risinājumu singāzes iegūšanai no mitras šķeldas var uzskatīt par inovatīvu gazifikācijas tehnoloģiju.

Šajā darbā notika inovatīvas gazifikācijas tehnoloģijas izpēte rūpnieciskā objektā. Rūpniecisko eksperimentu priekšrocības ir saistītas ar to, ka notiek pētāmās sistēmas izpēte reālos darba apstākļos, ņemot vērā pastāvošus, gazifikācijas procesa ietekmējošus faktorus. Gazifikācijas process ir komplicēts termodinamisks process, kur viens faktors ietekmē uzreiz vairāku citu parametru vērtības. Līdz ar to ir svarīgi, ka veiktā eksperimentālā izpēte, gazifikācijas procesa norise tika pētīta uzreiz atkarībā no vairāku faktoru kopas nevis tikai no viena parametra. Veiktajā eksperimentālā izpētē, balstoties uz nomērītajiem datiem, tika rēķinātas un sastādītas gazifikācijas procesa masas un enerģijas bilances dažādiem gazifikācijas stacijas darbināšanas režīmiem. Izpētes rezultātā ir iespējams iegūt regresijas vienādojumus, kas raksturo sistēmas darbību atkarībā no vairākiem mainīgiem parametriem.

Gazifikācijas stacijās ietilpstošie elementi parasti tiek izvēlēti atkarībā no saražotās singāzes tālākiem izmantošanas mērķiem. Tas savukārt ietekmē gazifikatora tipa un termiskās jaudas izvēli. Balstoties uz šiem kritērijiem, notiek pārējo elementu izvēle. Pētāmajā sistēmā ir uzstādīts lejupvērsta tipa gazifikators, jo singāzes temperatūra izejā no gazifikatora ir augsta un var iegūt nepieciešamo siltumu no singāzes dzesēšanas, lai veiktu šķeldas žāvēšanu.

Pētāmajā eksperimentālajā sistēmā gazifikatora nominālā termiskā jauda ir 400 kW. Kā jau minēts literatūras apskatā, gazifikācijas stacijās ar mazu termisku jaudu (līdz 1 MW) parasti iesaka izmantot lejupvērsta tipa reaktorus. Papildu darvas koncentrācija singāzē no lejupvērsta tipa gazifikatoriem ir ievērojami mazāka, un līdz ar to izmantotās singāzes attīrīšanas tehnoloģijas var būt ievērojami vienkāršākas un lētākas gan uzstādīšanā, gan ekspluatācijā. Gazifikatora reaktoram ir izteikts sašaurinājums vidusdaļā. Viena no galvenajām gazifikatora īpatnībām un atšķirībām no citiem pieejamiem gazifikatoriem ir saistīta ar to, ka reaktora vidū atrodas vertikāls elements ar lāpstiņām, kas lēni, bet nepārtraukti rotē un nodrošina kurināmā maisīšanu. Kurināmā maisīšanas rezultātā notiek vienmērīga kurināmā uzkarsēšana, žāvēšana, kā arī gaistošo vielu izdalīšana.

Darbā pētāmās gazifikācijas sistēmas kopējo shēmu var aplūkot 3.1. attēlā. Gazifikācijas sistēmu var iedalīt vairākas daļās: kurināmā sagatavošanas un padošanas sistēma; gaisa padošanas sistēma; gazifikācijas iekārta jeb gazifikators; singāzes dzesēšanas sistēma; singāzes attīrīšanas sistēma; singāzes utilizācijas sistēma. Papildus par atsevišķu elementu var uzskatīt gazifikācijas procesa monitoringa un vadības sistēmu.



3.1. attēls. Gazifikācijas sistēmas mērījumu shēma.

Apzīmējumi: T_1 – gazifikatora temperatūra pirolīzes zonā, °C; T_2 – gazifikatora temperatūra oksidācijas zonā, °C; T_3 – gazifikatora temperatūra reducēšanas zonā, °C; T_4 – ieņemtā gaisa temperatūra pirms singāzes un gaisa siltummaiņa, °C; T_5 – gaisa temperatūra pēc singāzes un gaisa siltummaiņa, °C; m_1 – gaisa plūsma kg/h; V_1 – primārā gaisa plūsma, m³/h; V_2 – sekundārā gaisa plūsma, m³/h; T_6 – ūdens temperatūra pirms singāzes un ūdens siltummaiņa (atgaita), °C; T_7 – ūdens temperatūra pēc singāzes un ūdens siltummaiņa (turpgaita), °C; m_2 – ūdens caurplūde caur singāzes un ūdens siltummaiņi, m³/h; T_8 – singāzes temperatūra izejā no gazifikatora, °C; T_9 – singāzes temperatūra pēc singāzes un gaisa siltummaiņa, °C; T_{10} – singāzes temperatūra pēc singāzes un ūdens siltummaiņa, °C; S_s – singāzes sastāvs, tilp% (sausais); F_s – kurināmā paraugs; B_s – bioogļu paraugs; T_s – darvas koncentrācijas mērījumi.

Gazifikācijas sistēma ir uzstādīta četros konteinertipa moduļos, kas padara sistēmu mobilu un viegli transportējamu. Pirmajā konteinerā ir uzstādīts pats gazifikators, kā arī bioogļu izvadīšanas sistēma. Augšējā konteinerā atrodas daļa no kurināmā padošanas sistēmas, kā arī singāzes dzesēšanas un attīrīšanas sistēmas. Blakuskonteinerā atrodas gazifikatora monitoringa un vadības sistēma, kā arī daļa no gaisa padošanas sistēmas. Pēdējā konteinerā atrodas gāzes katls singāzes sadedzināšanai, kā arī katla apsāte un vadības sistēma. Papildus blakus konteineriem tiek izvietots šķeldas uzglabāšanas modulis ar šķeldas padeves transportiera sistēmu.

Pētāmajā gazifikācijas sistēmā ir organizēta divpakāpju singāzes dzesēšanas sistēma. Lielākais noņemtā siltuma daudzums tiek izmantots šķeldas žāvēšanai, izmantojot kaloriferu. Šķelda tiek uzglabāta speciālā modulī, kur tā tiek žāvēta. Kurināmā mitrums izejā no uzglabāšanas konteinerā ir atkarīgs no kurināmā sākotnējā mitruma, kurināmā atrašanās laika konteinerā jeb žāvēšanas laika, žāvēšanai pievadītā siltuma daudzuma un citiem faktoriem.

Gazifikators tiek darbināts ar gaisu. Gaiss tiek ņemts no apkārtējās vides, bet pirms ievadīšanas reaktorā to ir iespējams uzsildīt. Gaiss sākotnēji tiek ievadīts siltummainī, kur tiek uzkaršēts, nonākot netiešā kontaktā ar karsto singāzi. Šādā veidā gazifikatorā neveidojas zonas ar pazeminātu temperatūru vietās, kur notiks gaisa ievadīšana. Cita pētāmās gazifikācijas sistēmas īpatnība ir saistīta ar to, ka gazifikatorā ievadīto gaisu ir iespējams sadalīt primārajā un sekundārajā plūsmā. Primārais gaiss tiek ievadīts gazifikatora vidusdaļā pirms sašaurinājuma jeb oksidācijas zonā, kur notiek daļējs kurināmā degšanas process. Sekundārais gaiss tiek ievadīts pirolīzes zonā, kas ir izvietota augstāk, virs oksidācijas zonas. Attiecību starp primāro un sekundāro gaisu ir iespējams mainīt. Sekundārā gaisa īpatsvaru var mainīt no 0 % līdz 15 % attiecībā pret kopējo reaktorā ievadītā gaisa daudzumu.

Atdzesētā singāze tiek attīrīta no tajā sastāvā esošām cietām daļiņām ar ciklona un speciāla auduma filtra palīdzību. Singāzes utilizācija eksperimentālajā sistēmā notiek gāzes katlā. Bioogle tiek aizvadīta no gazifikatora apakšas un akumulējas speciālā tvertnē. Gazifikatora vadība tiek organizēta, balstoties uz monitoringa sistēmas mērījumu datiem.

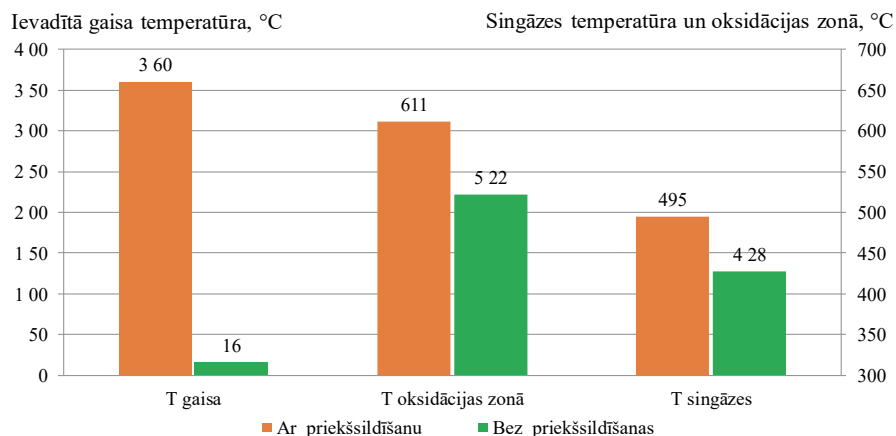
4. IEGŪTIE REZULTĀTI UN TO ANALĪZE

4.1. Eksperimentālās sistēmas izpēte

Iegūtie rezultāti raksturo gazifikācijas stacijas darbību reālos darba apstākļos. Lai noteiktu gazifikācijas stacijas optimālos operēšanas uzstādījumus, tika veikti mērījumi stacijā, mainot vairāku parametru vērtības. Lielākā uzmanība tika pievērsta gazifikatorā ievadītā gaisa priekšsildīšanas un kurināmā mitruma ietekmes noteikšanai. Izmaiņas operēšanas uzstādījumos notika pakāpeniski, bez straujām svārstībām. Līdz ar to starp veiktajiem mērījumiem bieži nav izteikta iedalījuma pa testiem. Tā ir viena no galvenajām atšķirībām no laboratorijas pētījumiem, kur ir stingrs iedalījums pa testiem, un katrs tests raksturo gazifikatora darbību pie noteiktiem parametriem.

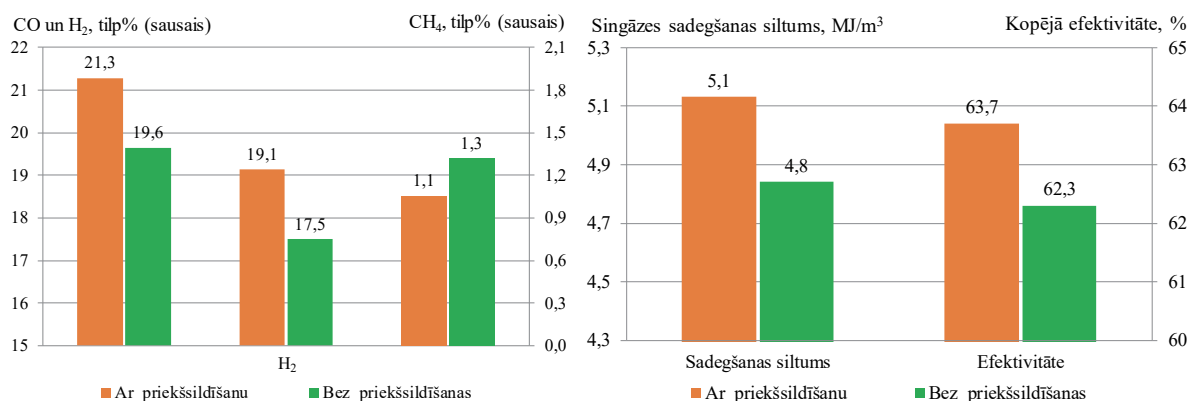
4.1.1. Ievadītā gaisa priekšsildīšana

Viena no inovatīvā tehnoloģiskā risinājuma īpatnībām ir iespēja uzsildīt gazifikatorā padoto gaisu. Singāzei plūstot caur singāzes/gaisa siltummaini, tā tiek dzesēta ar gaisu. Temperatūra, līdz kurai ir iespējams sasildīt gaisu, ir atkarīga no singāzes caurplūdes, singāzes temperatūras izejā no gazifikatora, kā arī gaisa caurplūdes un sākotnējās temperatūras. Lai noteiktu gaisa priekšsildīšanas pasākuma lietderību, tika veikti mērījumi, gazifikatoram strādājot bez gaisa priekšsildīšanas un ar gaisa priekšsildīšanu. Bez gaisa priekšsildīšanas mērījumu laikā gazifikatorā ievadītā gaisa vidējā temperatūra bija 16,0 °C, bet, veicot gaisa priekšsildīšanu, – 360 °C. Pārējie gazifikācijas procesu ietekmējošie faktori abos mērījumos tika ieregulēti iespējami vienādi. Iegūtie rezultāti liecina, ka, veicot gaisa priekšsildīšanu, temperatūra oksidācijas zonā pieaug no 542 °C bez gaisa priekšsildīšanas līdz 611 °C ar gaisa priekšsildīšanu (skatīt 4.1. attēlu). Rezultātā arī singāzes temperatūra pieaug no 428 °C līdz 495 °C. Tas savukārt nozīmē, ka ir iespējams iegūt vairāk fiziskā siltuma, veicot singāzes dzesēšanu.



4.1. attēls. Gaisa priekšsildīšanas ietekme uz gaisa temperatūru, temperatūru oksidācijas zonā un singāzes temperatūru izeja no gazifikatora.

Temperatūras pieaugums gazifikatorā sekmē to, ka pieaug vairāku reakciju aktivitāte. Kurināmā sastāvā esošais ogleklis aktīvāk reaģē ar pirolīzes zonā izdalīto CO₂, un tā rezultātā pieaug CO daudzums singāzē no 19,6 % līdz 21,3 % (skatīt 4.2. attēlu). Arī ūdens-gāzes un tvaika-oglekļa reakciju aktivitāte palielinās, kas sekmē H₂ daudzuma pieaugumu no 17,5 % līdz 19,1 %. Tomēr augstākā temperatūrā aktīvāk notiek CH₄ sadalīšanās procesi, kuru rezultātā šī gāze tiek sadalīta CO₂ un H₂O, bet CH₄ daudzums samazinās no 1,3 % līdz 1,1 %.

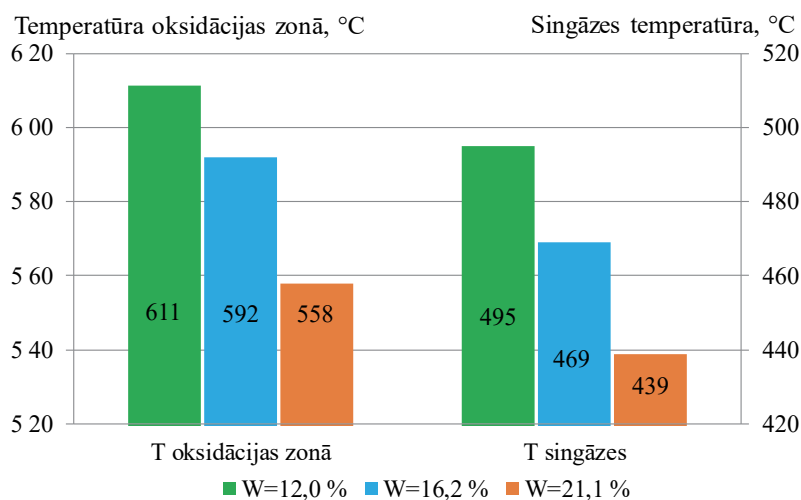


4.2. attēls. Gaisa priekšsildīšanas ietekme uz CO, H₂ un CH₄ daudzumiem singāzes sastāvā (pa kreisi) un singāzes sadegšanas siltums un gazifikācijas procesa kopējo efektivitāti (pa labi).

Singāzes sastāva izmaiņa sekmē to, ka, veicot gaisa priekšsildīšanu, mainās arī saražotās gāzes sadegšanas siltums. Kaut arī CH₄ koncentrācija singāzē samazinās, tomēr CO un H₂ gāzu koncentrācijas pieaugums ir būtiskāks un sekmē to, ka singāzes sadegšanas siltums kopumā pieaug no 4,8 MJ/m³ līdz 5,1 MJ/m³. Neapšaubāmi, ka gazifikatorā ievadītā gaisa temperatūras pieaugums atstāj būtisku ietekmi arī uz kopējo gazifikācijas procesa efektivitāti. Kopumā efektivitāte pieauga par 1,4 % – no 62,3 % bez gaisa piesildīšanas līdz 63,7 % ar gaisa piesildīšanu.

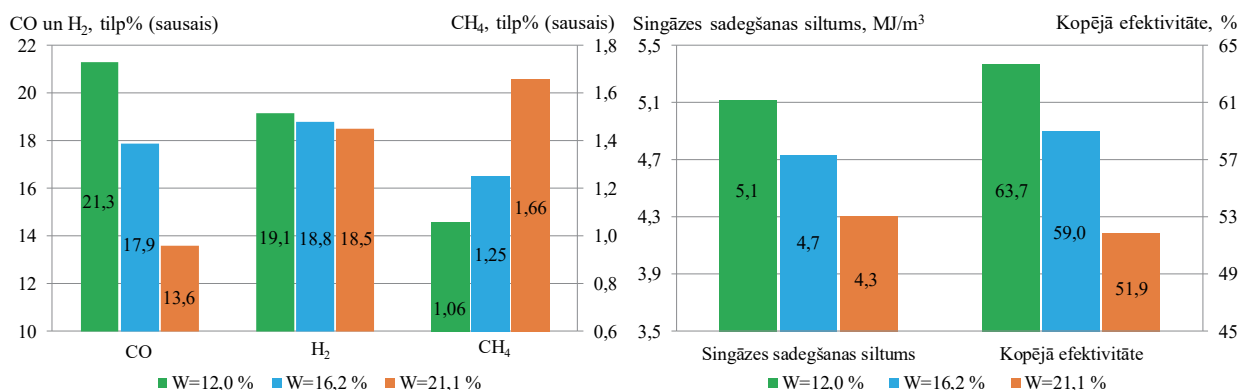
4.1.2. Kurināmā mitrums

Singāze tiek dzesēta ne tikai ar gaisu, bet arī ar ūdeni. Ar ūdeni noņemtais siltums tiek izmantots kurināmā žāvēšanai. Līdz ar to visu laiku, kamēr notiek gazifikācijas process, šķelda tiek žāvēta. Tas savukārt sekmē to, ka kurināmā mitrums pakāpeniski samazinās un gazifikatorā tiek padots sausāks kurināmais. Eksperimentālās izpētes laikā tika veikti mērījumi pie dažāda kurināmā mitruma. Tā, aplūkojot gazifikācijas procesa norisi, kad kurināmā mitruma saturs ir 12,0 %, 16,2 % un 21,1 %, tika konstatēts, ka temperatūra oksidācijas zonā jeb gazifikācijas temperatūra samazinās no 611 °C līdz 592 °C un tālāk līdz 558 °C. Rezultātā tas sekmē singāzes temperatūra samazinājumu no 495 °C līdz 469 °C un tālāk līdz 439 °C (skatīt 4.3. attēlu).



4.3. attēls. Kurināmā mitruma ietekme uz gazifikācijas temperatūru un singāzes temperatūra.

Gazifikācijas temperatūras samazinājuma rezultātā no 611 °C līdz 558 °C CO koncentrācija samazinās no 21,3 % līdz 13,6 % (skatīt 4.4. attēlu). Singāzes sastāvā esošā H₂ koncentrācijas izmaiņas ir ievērojami mazākas. No vienas puses, temperatūras samazinājuma rezultātā samazinās ūdens un gāzes un tvaika un oglekļa reakciju aktivitātes, bet, no otras puses, pieaugot kurināmā mitrumam, ar ūdeni gazifikatorā tiek ievadīts arī papildu H₂ daudzums. Savukārt CH₄ koncentrācija palielinās no 1,06 % līdz 1,66 %, kas galvenokārt ir saistīts ar to, ka, samazinoties temperatūrai reducēšanas zonā, samazinās CH₄ sadalīšanās reakciju aktivitāte.



4.4. attēls. Kurināmā mitruma ietekme uz CO, H₂ un CH₄ daudzumu singāzes sastāvā (pa kreisi), singāzes sadegšanas siltumu un kopējo gāzes efektivitāti (pa labi).

Neapšaubāmi, ka, pieaugot kurināmā mitrumam, būtiski pieaug H₂O tvaika daudzums. Singāzes temperatūrai samazinoties zem 100 °C, notiek H₂O tvaika kondensēšanās. Ja H₂O tvaika daudzums singāzē ir augsts, ir jāvelta īpaša uzmanība kondensāta izvadīšanai no singāzes, kas izpaužas kā papildu investīcijas. CO un H₂ koncentrāciju samazinājums ir ievērojami lielāks par CH₄ daudzuma pieaugumu singāzes sastāvā kurināmā mitruma samazinājuma dēļ. Rezultātā saražotās gāzes sadegšanas siltums samazinās. Kurināmā mitrumam pieaugot no 12,0 % līdz 21,1 %, singāzes sadegšanas siltums samazinājās no 5,1 MJ/m³ līdz 4,3 MJ/m³. Neapšaubāmi, ka kurināmā mitruma pieaugums atstāj negatīvu ietekmi arī uz gazifikācijas efektivitāti. Tā kopējā gazifikācijas efektivitāte samazinājās no 63,7 % līdz 51,9 %.

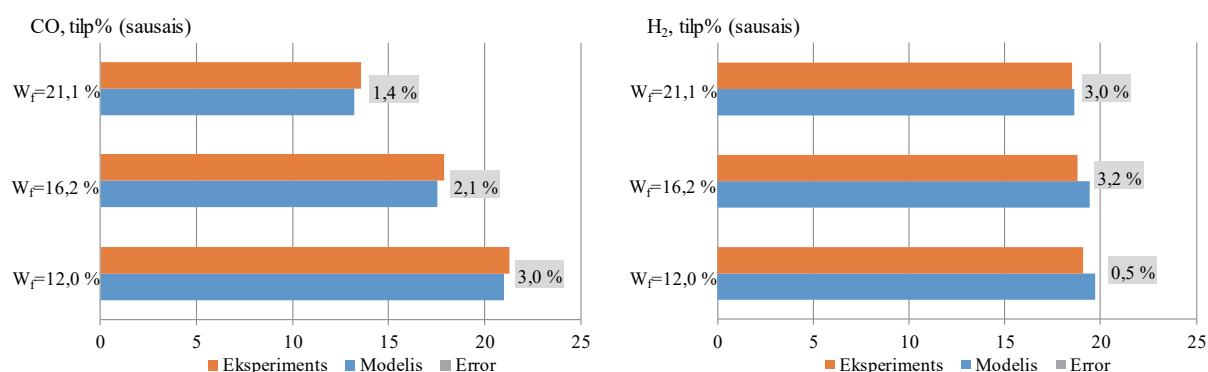
4.2. Matemātiskā modeļa validācija

Eksperimentālās izpētes laikā iegūtie dati tika izmantoti izstrādātā matemātiskā modeļa validācijai, lai iegūtu informāciju par modeļa kvalitāti un turpmākās lietošanas iespējām. Salīdzinājumam tika izmantoti dati, kas atspoguļo gazifikācijas procesa norisi ar ievadītā gaisa priekšsildīšanu, gazifikatoram darbojoties ar nominālo termisko jaudu, kad ir mainīgs kurināmā mitruma sastāvs un sekundārā gaisa īpatsvars. Starpība jeb kļūda starp eksperimentāli nomērīto parametra vērtību un modelēšanas rezultātā iegūto parametra vērtību tika rēķināta šādi (4.1. vienādojums):

$$Error = \frac{|eksp - mod|}{eksp} \cdot 100\% \quad (4.1.)$$

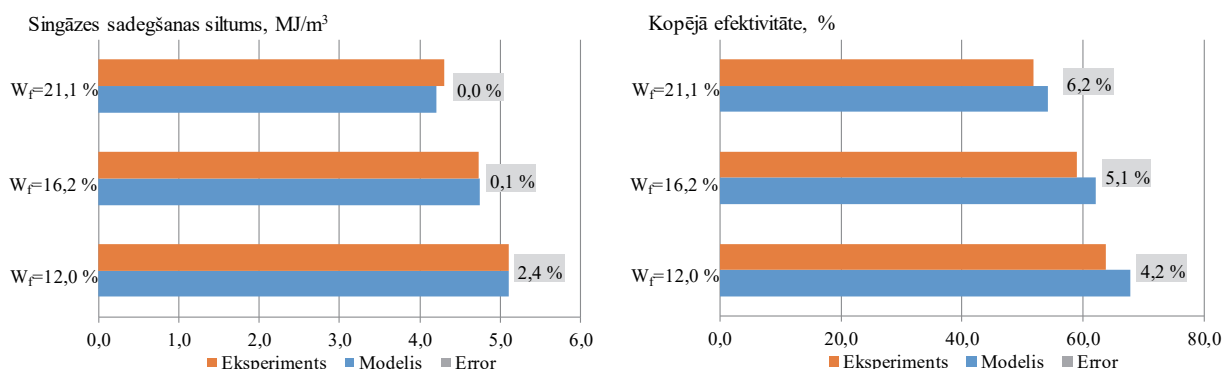
Apzīmējumi: *Error* – atšķirība starp eksperimentāli nomērīto parametra vērtību un modelēšanas rezultātā iegūto parametra vērtību, %; *eksp* – eksperimentāli nomērīto parametru vērtība; *mod* – modelēšanas rezultātā iegūto parametra vērtība.

Eksperimentālās izpētes gaitā un modelēšanas rezultātā iegūtās CO koncentrācijas singāzē, esot dažādam kurināmā mitruma saturam, ir atspoguļotas 4.5. attēlā. Rezultāti liecina, ka visos scenārijos eksperimentālās izpētes laikā nomērītā CO koncentrācija ir lielāka par to, kas iegūta ar matemātisko modeli. Kopumā starpība starp eksperimentāli nomērīto CO vērtību un modelēšanas rezultātā iegūto vērtību svārstās no 1,4 % līdz 3,0 %. Arī H₂ koncentrācijas atšķirības starp eksperimentāli un ar matemātisko modeli iegūto vērtību ir relatīvi nelielas un svārstās no 0,5 % līdz 3,2 %. H₂ koncentrācija visos trijos gadījumos ir lielāka, kad tā iegūta ar modeli. Singāzes sastāvā esošā CH₄ koncentrācija ir ievērojami mazāka par CO un H₂ daudzumu. Tas varētu būt viens no iemesliem relatīvi lielai starpībai starp eksperimentālās izpētes un modelēšanas rezultātā iegūtajām CH₄ koncentrācijām singāzē. Kopumā atšķirības starp nomērītajām un aprēķinātajām CH₄ koncentrācijām svārstās no 3,3 % līdz 6,9 %.



4.5. attēls. Eksperimentālās izpētes un modelēšanas rezultātā iegūto CO (pa kreisi) un H₂ (pa labi) koncentrāciju singāzē salīdzinājums.

Singāzes sastāva atšķirības starp eksperimentālajiem datiem un ar matemātisko modeli iegūtajiem rezultātiem lielā mērā ir atkarīgas no tā, cik ļoti sakrīt gazifikācijas temperatūras dati, kā arī singāzes sastāvs. Atšķirības starp eksperimentāli iegūto singāzes sadegšanas siltumu un ar matemātisko modeli iegūto ir visai zemas un nepārsniedz 2,4 % (skatīt 4.6. attēlu). Savukārt atšķirības starp nomērīto un aprēķināto kopējo gazifikācijas efektivitāti ir nedaudz lielākas un svārstās no 4,2 % līdz 6,2 %. Tas ir tāpēc, ka efektivitāte ir atkarīga no daudziem faktoriem: singāzes sastāva, sadegšanas siltuma, saražotā daudzuma un citiem parametriem.



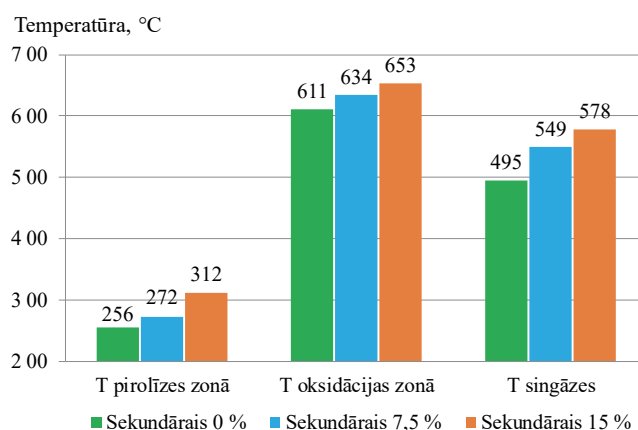
4.6. attēls. Eksperimentālās izpētes un modelēšanas rezultātā iegūtās singāzes sadegšanas siltuma (pa kreisi) un kopējas efektivitātes (pa labi) salīdzinājums.

Kopumā veiktā matemātiskā modeļa validācija ar eksperimentālās izpētes laikā iegūtajiem datiem liecina, ka modelis ir izstrādāts kvalitatīvi. Ar modeli iegūtie rezultāti cieši sakrīt ar reālajiem datiem, un maksimālā atšķirība starp rezultātiem ir 6,9 % CH₄ daudzumam. Tas liecina, ka izstrādāto matemātisko modeli ir iespējams veiksmīgi izmantot gazifikācijas procesa simulācijai dažādos mainīgos apstākļos.

4.3. Eksperimentālas sistēmas optimizācija

Gazifikācijas procesa optimizācijai eksperimentālajā izpētē tika aplūkota gazifikatorā ievadītā gaisa sadalīšana primārajā un sekundārajā plūsmā. Primārais gaiss tika ievadīts oksidācijas zonā, kā tas tiek parasti darīts lejupvērsta tipa gazifikatoriem. Sekundārais gaiss savukārt tika ievadīts augstāk, pirolīzes zonā. Kopumā eksperimentālās izpētes laikā tika izmēģināti trīs varianti saistībā ar padotā gaisa sadalīšanu. Pirmajā gadījumā viss gaiss tika padots oksidācijas zonā, un līdz ar to sekundārā gaisa īpatsvars veido 0 %. Otrajā gadījumā 92,5 % un trešajā gadījumā 85 % no kopējā padotā gaisa tika ievadīti ar primāro gaisu, līdz ar to sekundārā gaisa plūsma otrajā un trešajā gadījumā veidoja attiecīgi 7,5 % un 15 % no kopējās plūsmas. Mērījumi ar dažādu sekundārā gaisa īpatsvaru notika, kad kurināmā mitrums bija ap 12 %, kā arī veicot gaisa priekšsildīšanu visos atspoguļotajos mērījumos.

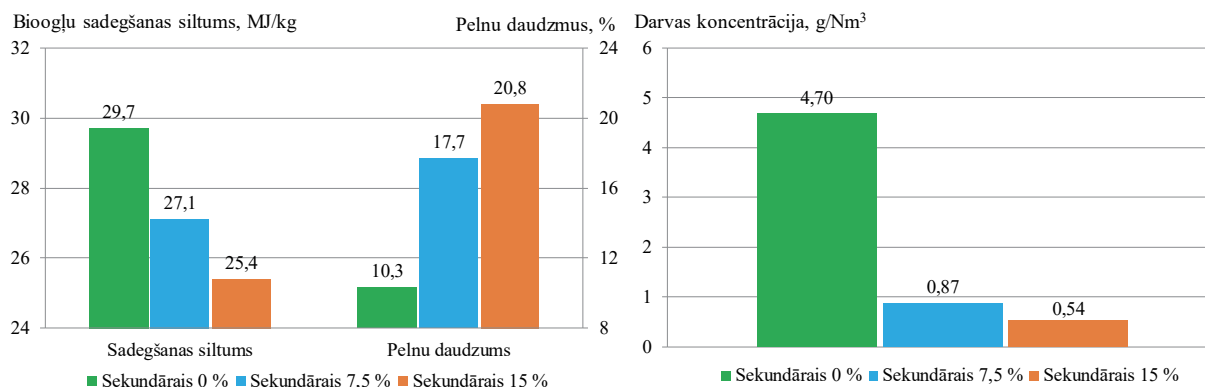
Mērījumu rezultāti liecina, ka, palielinot sekundārā gaisa īpatsvaru, temperatūra gan pirolīzes, gan oksidācijas zonā pieaug (skatīt 4.7. attēlu). Temperatūras pieaugumu pirolīzes zonā no 256 °C līdz 312 °C sekmē tas, ka tiek ievadīts ap 360 °C uzkarsētais gaiss. Tas savukārt sekmē faktu, ka kurināmais nonāk oksidācijas zonā augstākā temperatūrā un gaistošo vielu izdalīšana, kā arī oksidācijas reakcijas notiek aktīvāk. Rezultātā temperatūra oksidācijas zonā pieauga no 611 °C līdz 653 °C. Temperatūras pieaugums gazifikatorā sekmē to, ka arī singāzes temperatūra palielinās no 495 °C līdz 578 °C un singāzes dzesēšanas procesā ir iespējams iegūt vairāk siltuma šķeldas žāvēšanai.



4.7. attēls. Ievadītā gaisa sadalīšanas primārajā un sekundārajā plūsmā ietekme uz temperatūru pirolīzes un oksidācijas zonā un singāzes temperatūra izejā no gazifikatora.

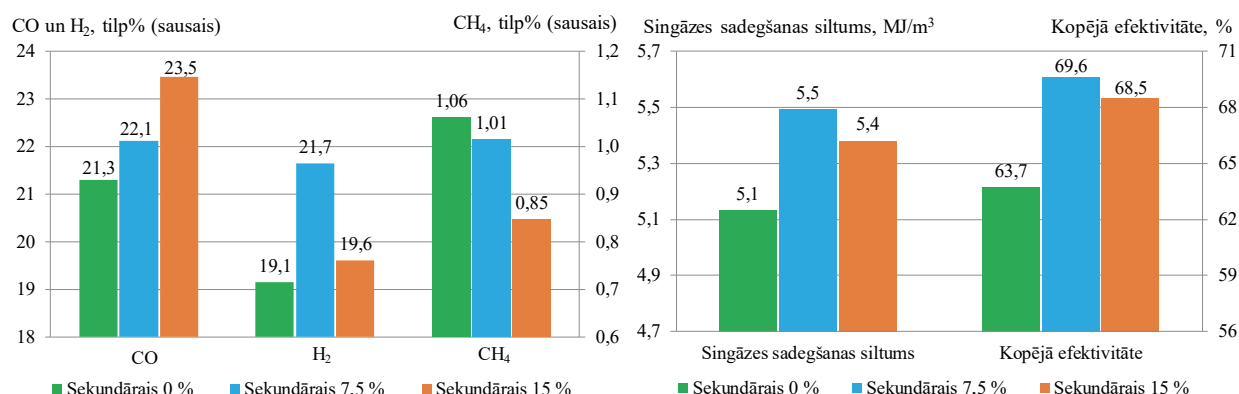
Eksperimentālās izpētes laikā vairākos mērījumos tika ņemti bioogļu paraugi, kuriem tika noteikts sadegšanas siltums un pelnu daudzums. Iegūtie rezultāti liecina, ka, organizējot gaisa sadalīšanu primārajā un sekundārajā gaisā, samazinās bioogļu sadegšanas siltums no 29,7 MJ/kg uz 25,4 MJ/kg, bet pelnu daudzums pieaug no 10,3 % līdz 20,8 % (skatīt 4.8. attēlu). Tas nozīmē, ka gazifikācijas temperatūras pieauguma rezultātā bioogļu sadalīšanās notiek aktīvāk, mazāks C un H₂

daudzums paliek nepārveidots no biomasas singāzē. Savukārt veiktie darvas mērījumi liecina, ka, pateicoties temperatūras pieaugumam gan pirolīzes zonā, gan visā reaktorā, tiek panākta aktīvāka darvas sadalīšanās. Pieaugot sekundārā gaisa īpatsvaram, darvas koncentrācijas samazinās no 4,70 g/Nm³ līdz 0,54 g/Nm³. Darvas daudzuma samazināšanās ir būtiska ne tikai gazifikācijas procesa efektivitātes paaugstināšanai, bet arī uzlabo singāzes kvalitāti un paplašina singāzes tālākas izmantošanas iespējas.



4.8. attēls. Ievadītā gaisa sadalīšanas uz primāro un sekundāro plūsmu ietekme uz bioogles sadegšanas siltumu (pa kreisi) un darvas koncentrāciju (pa labi).

Gaisa plūsmas sadalīšana primārajā un sekundārajā pozitīvi ietekmē arī iegūtās singāzes ķīmisko sastāvu. Gazifikācijas temperatūras pieaugums sekmē Buduāra reakcijas aktivitātes palielinājumu, kā rezultātā pieaug CO koncentrācija singāzē no 21,3 % līdz 23,5 %, kad sekundārā gaisa īpatsvars ir 15,0 % (skatīt 4.9. attēlu). Savukārt H₂ koncentrācija sākotnēji pieaug no 19,1 % līdz 21,7 %, bet pēc tam notiek straujš H₂ īpatsvara samazinājums līdz 19,6 %. Šādas H₂ izmaiņas var saistīt ar to, ka sākotnēji, gazifikācijas temperatūrai augot, ūdens-gāzes un tvaika-oglekļa reakciju aktivitāte arī pieaug un rezultātā iegūtais H₂ daudzums palielinās. Tomēr, temperatūrai turpinot augt, tiek sasniegta noteikta kritiskā robeža, kad oksidācijas reakcijas kļūst pārāk aktīvākas un tiek sadedzināts lielāks H₂ apjoms. Temperatūras pieaugums negatīvi ietekmē arī CH₄ koncentrāciju, kas samazinās no 1,06 % līdz 0,85 %.



4.9. attēls. Ievadītā gaisa sadalīšanas uz primāro un sekundāro plūsmu ietekme uz CO, H₂ un CH₄ daudzumu singāzē (pa kreisi) un uz singāzes sadegšanas siltumu un kopējo efektivitāti (pa labi).

Organizējot gazifikatorā ievadītā gaisa sadalīšanu primārajā un sekundārajā gaisā un nodrošinot sekundārā gaisa īpatsvaru 7,5 %, ir iespējams iegūt gan singāzi ar augstāku sadegšanas siltumu 5,5 MJ/m³, gan palielināt gazifikācijas procesa efektivitāti līdz 69,6 %. Palielinot sekundārā

gaisa īpatsvaru līdz 15,0 %, temperatūra reaktorā palielinās un sasniedz to robežu, kad notiek gan singāzes sadegšanas siltuma, gan kopējās gazifikācijas procesa efektivitātes samazinājums.

4.4. Eksperimentālo datu analīze

Eksperimentālās izpētes rezultātā iegūtie dati tika apkopoti un analizēti, izmantojot programmu *STATGRAPHICS Centurion 16.1.17*. Viens no galvenajiem definētajiem datu analīzes uzdevumiem bija noteikt gazifikatora darbības parametru ietekmi uz galvenajiem gazifikācijas procesa rādītājiem – gazifikatora termisko jaudu, saražotās singāzes sadegšanas siltumu, kā arī kopējo procesa efektivitāti. Datu analīzes rezultāti liecina, ka veiktajā eksperimentālajā izpētē kurināmā mitrumam, kurināmā patēriņam, kā arī primārā un sekundārā gaisa plūsmas īpatsvaram bija noteicoša ietekme uz gazifikatora veikspēju. Rezultātā tika iegūti trīs vienādojumi, kas atspoguļo galvenos gazifikācijas procesa rādītājus atkarībā no gazifikatora darbības parametru vērtībām. Vienādojumos padotā gaisa plūsmas sadalīšanu raksturo primārā gaisa plūsmas īpatsvars. Primārā gaisa plūsmas īpatsvara ietekme nav lineāra, līdz ar to katrā modelī papildus tika pievienots šis pats parametrs otrajā pakāpē (4.2.–4.4. vienādojums):

$$Q_{ter} = -3860,39 + 88,79w_{prim} - 0,486039w_{prim}^2 + 2,89992m_f - 16,9648W_f \quad (4.2.)$$

$$LHV_{sin} = -35,3626 - 0,0919856W_f + 0,911552w_{prim} - 0,00495398w_{prim}^2 \quad (4.3.)$$

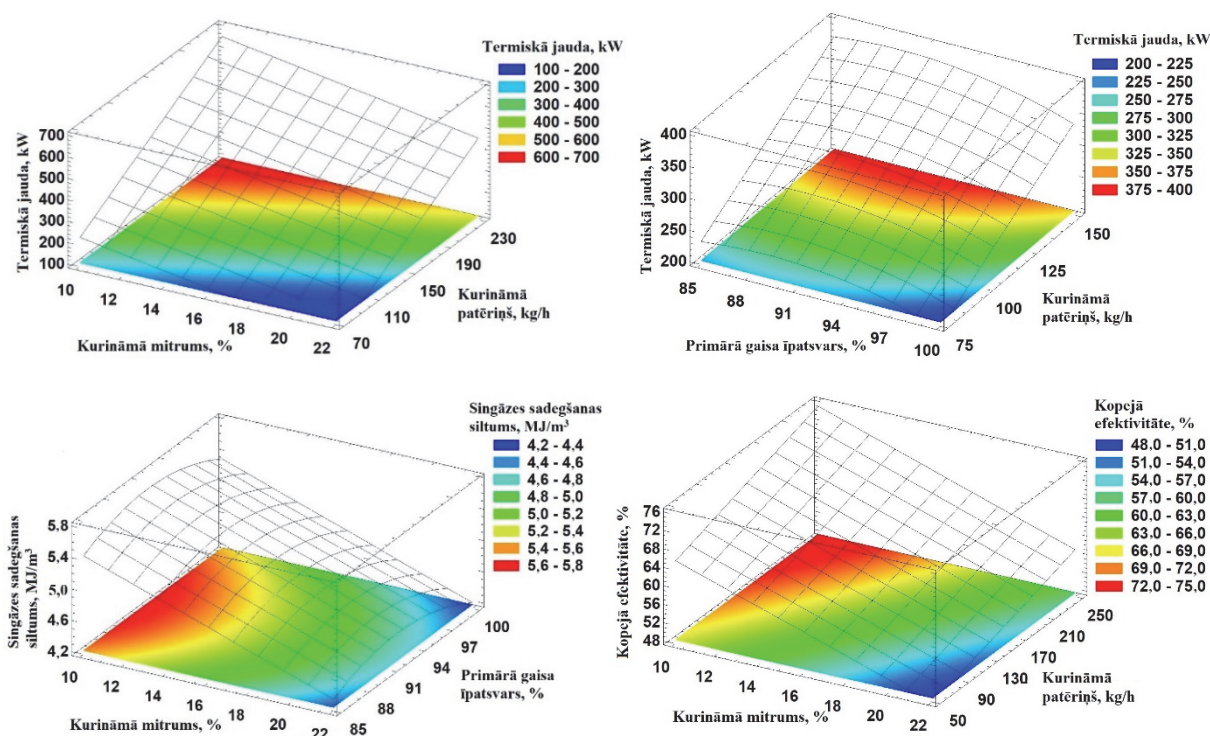
$$\eta_{tot} = -584,985 + 14,5856w_{prim} - 0,0802632w_{prim}^2 - 1,5113W_f + 0,0714425m_f \quad (4.4.)$$

Apzīmējumi: w_{prim} – primārā gaisa īpatsvars, %; W_f – kurināmā mitrums, %; m_f – kurināmā patēriņš, kg/h; Q_{ter} – gazifikatora termiskā jauda, kW; LHV_{sin} – singāzes sadegšanas siltums, MJ/m³; η_{tot} – gazifikācijas procesa karstās gāzes efektivitāte, %.

Gazifikatora termiskā jauda, kā arī kopējā procesa efektivitāte ir atkarīga no trim parametriem – kurināmā mitruma, kurināmā patēriņa, kā arī primārā gaisa plūsmas īpatsvara. Lai palielinātu termisko jaudu, ir nepieciešams palielināt kurināmā patēriņu (skat. 4.10. attēlu). Savukārt gazifikatorā ievadītā kurināmā mitruma samazinājums sekmē termiskās jaudas pieaugumu. Eksperimentālās izpētes laikā gazifikatora nominālā termiskā jauda ap 400 kW tika sasniegta, kad kurināmā patēriņš bija 144–153 kg/h un kurināmā mitruma saturs – 10,9–12,8 %.

Gazifikācijas procesa kopējā efektivitāte ir atkarīga no kurināmā mitruma un primārā gaisa īpatsvara, kā arī no kurināmā mitruma un kurināmā patēriņa. Datu analīzes rezultāti liecina, ka maksimālo gazifikācijas procesa efektivitāti ir iespējams panākt, nodrošinot primārā gaisa īpatsvaru starp 91 % un 94 %, samazinot gazifikatorā ievadītā kurināmā mitruma daudzumu, kā arī palielinot kurināmā patēriņu, lai nodrošinātu nominālo gazifikatora termisko jaudu.

Veiktā datu analīze rāda, ka singāzes sadegšanas siltums ir atkarīgs no kurināmā mitruma un padotā gaisa plūsmas sadalīšanas primārajā un sekundārajā. Netika konstatēta statistiski nozīmīga sakarība starp singāzes sadegšanas siltumu un kurināmā patēriņa. Samazinot kurināmā mitrumu, ir iespējams palielināt saražotās singāzes sadegšanas siltumu. Primārā gaisa īpatsvars ir jāsaglabā starp 91 % un 94 %, lai iegūtu singāzi ar vislielāko sadegšanas siltumu. Eksperimentālās izpētes laikā maksimālais singāzes sadegšanas siltums 5,5 MJ/m³ tika sasniegts ar kurināmā mitrumu 12,8 % un primārā gaisa īpatsvaru 92,5 %.



4.10. attēls. Gazifikatora termiskā jauda, saražotās singāzes sadegšanas siltums un kopējā procesa efektivitāte atkarībā no kurināmā mitruma, kurināmā patēriņa un primāra gaisa īpatsvara.

Visu vienādojumu koriģētie korelācijas koeficienti ir augsti un svārstās no 89,90 % līdz 97,92 %, bet vidējās absolūtās kļūdas ir relatīvi zemas (skatīt 4.1. tabulu). Līdz ar to izveidotajos regresijas modeļus var veiksmīgi izmantot gazifikācijas veiktspējas raksturošanai un darbības uzstādījumu regulēšanai. Papildus iegūtās sakarības var izmantoti jaunu gazifikācijas staciju projektēšanai.

4.1. tabula

Iegūto regresijas vienādojumu analīze

Regresijas vienādojums	Atkarīgais mainīgais	R^2	Koriģētais R^2	Vidējā absolūtā kļūda
I	Termiskā jauda	98,04	97,92	8,27
II	Singāzes sadegšanas siltums	95,44	95,24	0,06
III	Kopēja efektivitāte	90,49	89,90	1,18

4.5. Nekoksnes materiālu gazifikācijas iespējas

Latvijā ir pietiekams arī nekoksnes biomasas resursu daudzums, ko var izmantot enerģētikas nozarē. Latvijā ir attīstīta graudaugu audzēšana, kur kā blakusprodukts ir salmi. Kopējā graudu raža 2016. gadā bija 2622 tūkstoši tonnas, bet salmu daudzums – 2192 tūkstoši tonnas. Pakaišiem izmanto ap 30 % no pieejamā salmu daudzuma, līdz ar to apmēram 1600 tūkstoši tonnas salmu ir iespējams izmantot enerģijas iegūšanai.

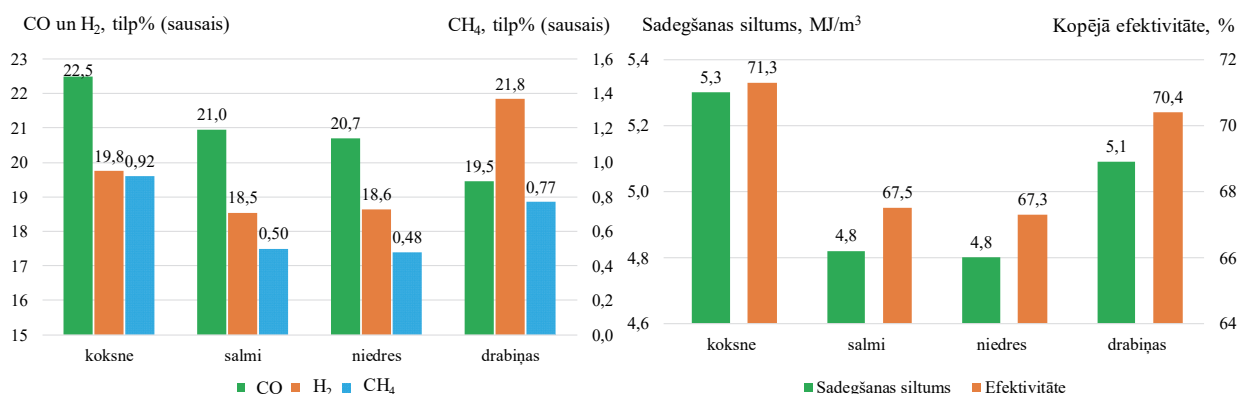
Cits lauksaimnieciski audzējamais resurss ir rapši. Laika posmā no 2006. līdz 2016. gadam izaudzētā rapša apjoms palielinājās no 120,6 tūkstošiem tonnu līdz 281,3 tūkstošiem tonnu [36]. Rapsi galvenokārt izmanto kā izejvielu eļļas ražošanai, un tam ir salīdzinoši augsts sadegšanas siltums. Eļļas ražošanai nederoša rapša vai ražošanā iegūtos blakusproduktus var izmantot enerģijas iegūšanai. Vēl viens līdz šim vāji izmantots un novērtēts bioresurss Latvijā ir niedres, kas aug plašās teritorijās, bet to sadegšanas siltums ir ap 16 MJ/kg. Latvijā aktīvi darbojas ievērojams daudzums alus darītavu, kur kā blakusprodukts veidojas drabiņas ar sadegšanas siltumu līdz pat 20 MJ/kg. Tikai divās lielākajās Latvijas darītavās SIA “Aldaris” un SIA “Cēsu Alus” gada laikā rodas ap 20 tūkstošiem tonnas drabiņu [37], [38].

Viena no gazifikācijas procesa priekšrocībām ir saistīta ar to, ka par kurināmo var tikt izmantots plašs izejvielu daudzums. Līdz ar to salmi, niedres un drabiņas, kas ir plaši pieejamas izejvielas Latvijā, var tikt izmantotas kā izejviela singāzes iegūšanai. Izmantojot izstrādāto matemātisko modeli, tika veikta gazifikācijas procesa modelēšana ar dažāda tipa nekoksnes materiālu, izmantojot zināmus biomasas parametrus [39]:

- salmi $\text{CH}_{1.53}\text{O}_{0.81}\text{N}_{0.01}$;
- niedres $\text{CH}_{1.56}\text{O}_{0.83}\text{N}_{0.01}$;
- drabiņas $\text{CH}_{1.87}\text{O}_{0.69}\text{N}_{0.08}$.

Salīdzinājumam papildus tika izmantota tā pati šķelda, kas tika izmantota eksperimentālajā izpētē un kuras ķīmisko sastāvu var raksturot ar ķīmisko formulu $\text{CH}_{1.47}\text{O}_{0.66}$. Lai novērtētu kurināmā ietekmi uz gazifikācijas procesu, pārējo faktoru vērtības visos četros scenārijos bija vienādi apstākļi – gaisa patēriņa koeficients 0,25 un kurināmā mitrums 10 %.

Koksnes ķīmiskajam sastāvam ir ievērojami lielāks oglekļa daudzums, salīdzinot ar aplūkojamajiem nekoksnes materiāliem. Tas savukārt sekmē to, ka no koksnes saražotajā singāzē ir ievērojami augstāks CO daudzums – 22,5 %, kas ir par 1,5 % līdz 3,0 % vairāk nekā singāzei no nekoksnes materiāliem (skatīt 4.11. attēlu). Singāzei no drabiņām ir ievērojami augstāks H_2 daudzums – 21,8 %. Tas arī ir saistīts ar to, ka H_2 daudzums drabiņās sasniedz 7,26 %. Salīdzinājumam – koksnes sastāvā H_2 īpatsvars ir tikai 6,15 %. Paaugstināts oglekļa un ūdeņraža daudzums koksne un drabiņās sekmē to, ka arī CH_4 daudzums saražotajā gāzē ir nedaudz lielāks – 0,92 % un 0,77 %.



4.11. attēls. CO, H₂ un CH₄ koncentrācija singāzē (pa kreisi), singāzes sadegšanas siltums un gazifikācijas procesa kopēja efektivitāte (pa labi), gazificējot dažāda veida biomasu.

Paaugstināts CO daudzums singāzē no koksnes ir noteicošais iemesls augstākam sadegšanas siltumam – $5,3 \text{ MJ/m}^3$. Nedaudz zemāks sadegšanas siltums – $5,1 \text{ MJ/m}^3$ – ir singāzei no drabiņām. Savukārt singāzes sadegšanas siltums no salmiem un niedrēm sasniedz tikai $4,8 \text{ MJ/m}^3$. Līdzīgi arī ievērojami augstākā kopējā gazifikācijas procesa efektivitāte ir, gazificējot koksni un drabiņas – 71,3 % un 70,4 %.

Gazifikācijas modelēšanas ar dažāda tipa kurināmo rezultāti liecina, ka visus trīs nekoksnes materiālus var veiksmīgi izmantot gazifikācijas procesā. Kaut arī kopējā gazifikācijas procesa efektivitāte ir mazāka, salīdzinot ar koksnes gazifikāciju, tomēr iegūtie lietderības koeficienti ir visai augsti. Arī singāzes sadegšanas siltums visos gadījumos ir tuvu 5 MJ/m^3 . Šāda tipa singāzi var izmantot siltumenerģijas un elektroenerģijas ražošanā. Jāatzīmē, ka H_2 koncentrācija singāzē, kas ražota no drabiņām, ir vēl augstāka nekā singāzē no koksnes un sasniedz 21,8 %. Līdz ar to šādu singāzi var veiksmīgi izmantot arī dažādu ūdeņradi saturošo produktu ražošanā.

SECINĀJUMI

1. Darbā tika izpētītas inovatīvas tehnoloģijas singāzes iegūšanai no šķeldas gazifikācijas rezultātā, izmantojot divas pieejas – procesa matemātisko modelēšanu un eksperimentālo izpēti.
2. Ar izstrādāto gazifikācijas procesa termodinamisko modeli tika aplūkota gaisa patēriņa koeficienta un kurināmā mitruma ietekme uz gazifikācijas procesu. Rezultāti liecina, ka šķeldas mitruma pieaugums no 10 % līdz 30 % veicina singāzes sadegšanas siltuma samazinājumu par $2,2 \text{ MJ/Nm}^3$, bet gazifikācijas procesa kopēja efektivitāte samazinās vidēji par 33,8 %. Par optimālu gaisa patēriņa koeficientu var uzskatīt koeficientu robežās no 0,25 līdz 0,30, kas var nodrošināt saražotās singāzes augstu sadegšanas siltumu (līdz $5,30 \text{ MJ/Nm}^3$), ja kopējā procesa efektivitāte ir 62,6 % un darvas daudzums ir relatīvi zems (līdz 2,2 %) attiecībā pret kopējo saražoto produktu daudzumu.
3. Augstas kvalitātes singāzes iegūšanai eksperimentālajā sistēmā šķelda tika žāvēta, izmantojot dzesēšanas rezultātā noņemto singāzes fizisko siltumu. Lai nodrošinātu pietiekamu siltuma daudzumu kurināmā žāvēšanai, tika izmantots lejupvērsta tipa gazifikators, kas nodrošina augstu singāzes temperatūru gazifikatora izejā. Kopumā gazifikācijas procesa norise un augstas kvalitātes singāzes iegūšana ir atkarīga no visiem sistēmas elementiem – gazifikācijas iekārtas, kurināmā uzglabāšanas, žāvēšanas un padošanas moduļa, singāzes dzesēšanas moduļa ar singāzes/gaisa un singāzes/ūdens siltummaiņiem, singāzes attīrīšanas sistēmas, singāzes utilizācijas sistēmas, kā arī gazifikācijas stacijas monitoringa un vadības sistēmas.
4. Balstoties uz veikto eksperimentālo izpēti, tika noteikta gaisa priekšsildīšanas un kurināmā mitruma ietekme uz gazifikācijas staciju. Rezultāti liecina, ka, uzsildot gazifikatorā padoto gaisu no 16°C līdz 360°C , ir iespējams palielināt temperatūras pieaugumu oksidācijas zonā no 522°C līdz 611°C . Tas sekmē saražotās gāzes sadegšanas siltuma pieaugumu no $4,8 \text{ MJ/Nm}^3$ līdz $5,1 \text{ MJ/Nm}^3$ un gazifikācijas procesa kopējās efektivitātes palielināšanu no 62,3 % līdz 63,7 %.
5. Dzesēšanas rezultātā no singāzes noņemto fizisko siltumu ir iespējams veiksmīgi izmantot šķeldas žāvēšanā. Panākot kurināmā mitruma samazinājumu no 21,1 % līdz 12,0 %, CO koncentrācija singāzes sastāvā pieaug no 13,6 % līdz 21,3 %, savukārt H_2 daudzums palielinās no 18,5 % līdz 19,1 %. Tas sekmē singāzes sadegšanas siltuma pieaugumu par $0,8 \text{ MJ/Nm}^3$ – no $4,3 \text{ MJ/Nm}^3$ līdz $5,1 \text{ MJ/Nm}^3$ un kopējās efektivitātes pieaugumu par 11,8 % – no 51,8 % līdz 63,7 %.
6. Tika veikta izstrādātā matemātiskā modeļa validācija ar eksperimentālās izpētes rezultātā iegūtajiem datiem. Datu salīdzinājums liecina, ka vidējā starpība starp CO vērtībām ir 2,2 %, 2,3 % – H_2 vērtībām, 5,1 % – CH_4 vērtībām, 3,1 % – gazifikācijas temperatūras vērtībām, 0,8 % – singāzes sadegšanas siltuma vērtībām un 5,2 % kopējās efektivitātes vērtībām. Validācijas rezultāti iekļaujas $\pm 7\%$ diapazonā, un tas liecina, ka izveidoto gazifikācijas procesa matemātisko modeli ir iespējams izmantot citu līdzīgu gazifikācijas sistēmu modelēšanai un optimizācijai.
7. Darbā tika veikta pētāmās eksperimentālās gazifikācijas sistēmas darbības optimizācija, izmantojot gazifikatorā ievadītās gaisa plūsmas sadalīšanu primārajā un sekundārajā gaisā. Dominējošs gaisa daudzums tika ievadīts ar primāro gaisu oksidācijas zonā, bet pārējais daudzums – ar sekundāro gaisu pirolīzes zonā. Tika aplūkoti trīs scenāriji, kad gazifikācijas

process notika bez sekundārā gaisa, ar sekundārā gaisa īpatsvaru 7,5 % un ar sekundāra gaisa īpatsvaru 15,0 %. Mērījumu rezultāti liecina par to, ka augstākus gazifikācijas procesa rādītājus ir iespējams sasniegt, ja sekundārā gaisa īpatsvars ir 7,5 %, panākot singāzes sadegšanas siltumu 5,5 MJ/Nm³ un kopējo efektivitāti 69,6 %. Galvenais iemesls ir temperatūras pieaugums pirolīzes un oksidācijas zonā, kā rezultātā notiek aktīvāka darvas un bioogļu pārveidošanās un sadalīšanās.

8. Analizējot mērījumos iegūtos datus, tika iegūti vairāki regresijas vienādojumi, kas apraksta gazifikatora termisko jaudu, saražotās singāzes sadegšanas siltumu, kopējo gazifikācijas procesa efektivitāti atkarībā no gazifikatora mainīgo parametru vērtībām. Šos vienādojumus ir iespējams izmantot esošo gazifikāciju staciju darbības uzlabošanai, vadības sistēmu veidošanai, kā arī jaunu gazifikācijas staciju projektēšanā un ieregulēšanā.
9. Tehnoloģija, kad singāzi iegūst no šķeldas gazifikācijas rezultātā, ir inovatīva, ilgtspējīga, ekonomiski un ekoloģiski pamatota. Pateicoties šai tehnoloģijai, ir iespējams palielināt Latvijas enerģētiskās drošību un neatkarību, samazinot nepieciešamību pēc fosilā kurināmā importa un palielinot vietējo atjaunojamo energoresursu izmantošanu.
10. Izstrādāto gazifikācijas procesa matemātisko modeli ir iespējams izmantot, lai analizētu singāzes, kas iegūta no citiem biomasas resursiem, potenciālu, balstoties uz biomasas ķīmisko sastāvu, kā arī mitruma un pelnu daudzumu. Gazifikācijas procesa modelēšanas rezultāti par salmiem, niedrēm un drabiņām liecina, ka visus trīs nekoksnes materiālus var veiksmīgi izmantot singāzes iegūšanai. Īpaši kvalitatīvu singāzi ar sadegšanas siltumu 5,1 MJ/Nm³ un augstu H₂ koncentrāciju (21,8 %) saražotajā gāzē ir iespējams iegūt drabiņu gazifikācijas rezultātā.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA

1. Eiropas Parlamenta un Padomes Direktīva 2009/28/EK par atjaunojamo energoresursu izmantošanas veicināšanu un ar ko groza un sekojoši atceļ Direktīvas 2001/77/EK un 2003/30/EK. Eiropas Savienības Oficiālais Vēstnesis, 2009, 1–47.
2. Latvijas energobilance 2016. gadā. Centrālā statistikas pārvalde, 2017, 1–8.
3. Latvijas meža zeme un koksnes krāja. Centrālās statistikas pārvaldes datubāze.
4. Energoresursu vidējās cenas gala patērētājiem. Centrālās statistikas pārvaldes datubāze.
5. Börjesson M., Ahlgren E. Biomass gasification in cost-optimized district heating systems – A regional modelling analysis. *Energy Policy* 2010;38:168–180.
6. Buragohain B., Mahanta P., Moholkar V. Biomass gasification for decentralized power generation: The Indian perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010;14:73–92.
7. Difs K., Wetterlund E., Trygg L., Söderström M. Biomass gasification opportunities in a district heating system. *Biomass and Bioenergy* 2010;34:637–651.
8. Blumberga D., Veidenbergs I., Romagnoli F., Rochas C., Žandeckis A. Bioenerģijas tehnoloģijas, RTU Vides aizsardzības un siltuma sistēmu instituts, Rīga, 2011.
9. Dornburg V., Faaij A. Efficiency and economy of wood-fired biomass energy systems in relation to scale regarding heat and power generation using combustion and gasification technologies. *Biomass and Bioenergy* 2001;21:91–108.
10. Rafati M., Wang L., Dayton D., Schimmel K., Kabadi V., Shahbazi A. Techno-economic analysis of production of Fischer-Tropsch liquids via biomass gasification: The effects of Fischer-Tropsch catalysts and natural gas co-feeding. *Energy Conversion and Management* 2017;133:153–166.
11. Ghassemi H., Shahsavan-Markadeh R. Effects of various operational parameters on biomass gasification process; a modified equilibrium model. *Energy Conversion and Management* 2014;79:18–24.
12. Karamarkovic R., Karamarkovic V. Energy and exergy analysis of biomass gasification at different temperatures. *Energy* 2010;35:537–549.
13. Basu P. Biomass gasification and pyrolysis. Practical design. Burlington, USA, 2010.
14. Guo F., Dong Y., Dong L., Guo C. Effect of design and operating parameters on the gasification process of biomass in a downdraft fixed bed: An experimental study. *International Journal of Hydrogen Energy* 2014;39:5625–5633.
15. Gai C., Dong Y. Experimental study on non-woody biomass gasification in a downdraft gasifier. *International Journal of Hydrogen Energy* 2012;37:4935–4944.
16. Itai Y., Santos R., Branquinho M., Malico I., Ghesti G., Brasil A. Numerical and experimental assessment of a downdraft gasifier for electric power in Amazon using açai seed (*Euterpe oleracea* Mart.) as a fuel. *Renewable Energy* 2014;66:662–669.

17. Zainal Z., Ali R., Lean C., Seetharamu K. Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials. *Energy Conversion and Management* 2001;42:1499–1515.
18. Mohammed M.A.A., Salmiaton A., Wan Azlina W.A.K.G, Mohammad Amran MS, Fakhru'l-Razi A. Air gasification of empty fruit bunch for hydrogen-rich gas production in a fluidized-bed reactor. *Energy Conversion and Management* 2011;52:1555–1561.
19. Ptasiński K.J., Prins M.J., Pierik A. Exergetic evaluation of biomass gasification. *Energy* 2007;32:568–574.
20. Ryu C., Yang Y., Khor A., Yates N., Sharifi V., Swithenbank J. Effect of fuel properties on biomass combustion: Part I. Experiments-fuel type, equivalence ratio and particle size. *Fuel* 2006;85:1039–1046.
21. Li X.T., Grace J.R., Lim C.J., Watkinson A.P., Chen H.P., Kim J.R. *Biomass and Bioenergy* 2004;26:171–193.
22. Corella J., Sanz A. Modeling circulating fluidized bed biomass gasifiers. A pseudo-rigorous model for stationary state. *Fuel Processing Technology* 2005;86:1021–1053.
23. Erkiaga A., Lopez G., Amutio M., Bilbao J., Olazar M.. Syngas from steam gasification of polyethylene in a conical spouted bed reactor. *Fuel* 2013;109:461–469.
24. Luo S., Zhou Y., Yi C.. Hydrogen-rich gas production from biomass catalytic gasification using hot blast furnace slag as heat carrier and catalyst in moving-bed reactor. *International Journal of Hydrogen Energy* 2012;27:15081–15085.
25. Guo F., Dong Y., Dong L., Jing Y. An innovative example of herb residues recycling by gasification in a fluidized bed. *Waste Management* 2013;33:825–832.
26. Corella J., Toledo J., Molina G. Calculation of the conditions to get less than 2 g tar/Nm³ in a fluidized bed biomass gasifier. *Fuel Processing Technology* 2006;87:841–846.
27. Barman N., Ghosh S., De S. Gasification of biomass in a fixed bed downdraft gasifier – A realistic model including tar. *Bioresource Technology* 2012;107:505–511.
28. Dogru M., Howarth C., Akay G., Keskinler B., Malik A. Gasification of hazelnut shells in a downdraft gasifier. *Energy* 2002;27:415–427.
29. Sarket S., Nielsen H. Assessing the gasification potential of five woodchips species by employing a lab-scale fixed-bed downdraft reactor. *Energy Conversion and Management* 2015;103:801–813.
30. Sheth P., Babu B. Production of hydrogen energy through biomass (waste wood) gasification. *International Journal of Hydrogen Energy* 2010;35:10803–10810.
31. Striūgas N., Zakarauskas K., Džiugys A., Navakas R., Paulauskas R. An evaluation of performance of automatically operated multi-fuel downdraft gasifier for energy production. *Applied Thermal Engineering* 2014;73:1151–1159.
32. Dogru M., Midilli A., Howarth C. Gasification of sewage sludge using a throated downdraft gasifier and uncertainty analysis. *Fuel Processing Technology* 2002;75:55–82.

33. Lv P., Yuan Z., Ma L., Wu C., Chen Y., Zhu J. Hydrogen-rich gas production from biomass air and oxygen/steam gasification in a downdraft gasifier. *Renewable Energy* 2007;32:2173–2185.
34. Atnaw S., Kueh S., Sulaiman S. Study on Tar Generated from Downdraft Gasification of Oil Palm Fronds. *The Scientific World Journal* 2014;2014:1–8.
35. Kirsanovs V., Žandeckis A., Rochas C. Biomass Gasification Thermodynamic Model Including Tar and Char. *Agronomy Research* 2016;14(4):1321–1331.
36. Lauksaimniecības kultūru sējumu platība, kopraža un vidējā ražība. Centrālās statistikas pārvaldes datubāze.
37. B kategorijas piesārņojošās darbības atļauja Nr. VA14IB0008, Valsts Vides dienests, 2014.
38. B kategorijas piesārņojošās darbības atļauja Nr.RI11IB0019, Valsts Vides dienests 2011.
39. Žandeckis A., Romagnoli F., Beloborodko A., Kirsanovs V., Blumberga D., Mehind A., Hovi M. Briquettes from mixtures of herbaceous biomass and wood: biofuel investigation and combustion tests. *Chemical engineering transactions* 2014; 42:67–72.