

Oskars Švedovs

ILGTSPĒJĪGAS BIOMASAS POTENCIĀLS SILTUMENERĢIJAS RAŽOŠANAI

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Dabaszinātņu un tehnoloģiju fakultāte
Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts

Oskars Švedovs

Doktora studiju programmas “Vides inženierija” doktorants

ILGTSPĒJĪGAS BIOMASAS POTENCIĀLS SILTUMENERĢIJAS RAŽOŠANAI

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji

asociētais profesors *Dr. sc. ing.*

VLADIMIRS KIRSANOVS

asociētais profesors *Dr. sc. ing.*

EDGARS VĪGANTS

RTU Izdevniecība

Rīga 2026

Švedovs, O. Ilgtspējīgas biomasas potenciāls siltumenerģijas ražošanai. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2026. 38 lpp.

Publicēts saskaņā ar promocijas padomes "RTU P-19" 2026. gada 29. jūlija lēmumu Nr. 244.

Promocijas darba izstrādi finansiāli atbalstījuši:

- Eiropas Sociālā fonda darbības programmas "Izaugsme un nodarbinātība" 8.2.2. specifiskā atbalsta mērķa "Stiprināt augstākās izglītības institūciju akadēmisko personālu stratēģiskās specializācijas jomās" projekts Nr. 8.2.2.0/20/I/008 "Rīgas Tehniskās universitātes un Banku augstskolas doktorantu un akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās";
- Latvijas Zinātnes padomes projekts Nr. LZP-2022/1-0414 "Zināšanas par alternatīvo biomasu virzībā uz enerģētisko neatkarību un klimata mērķiem (*Bioenergy Observatory*)";
- Eiropas Savienības Atveseļošanas un noturības mehānisma projekta Nr. 5.2.1.1.i.0/2/24/I/CFLA/003 "Konsolidācijas un pārvaldības izmaiņu ieviešana Rīgas Tehniskajā universitātē, Liepājas Universitātē, Rēzeknes Tehnoloģiju akadēmijā un Latvijas Jūras akadēmijā un Liepājas Jūrniecības koledža virzībai uz izcilību augstākajā izglītībā, zinātnē un inovācijās" akadēmiskās karjeras doktorantūras grants (granta ID: 1126).

Vāka attēla autori Anete Zulmane un Oskars Švedovs.

<https://doi.org/10.7250/9789934373619>

ISBN 978-9934-37-361-9 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2026. gada 26. novembrī plkst. 14.00 Rīgas Tehniskās universitātes Dabaszinātņu un tehnoloģiju fakultātē, Āzenes ielā 12/1, 607. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesore *Dr. sc. ing.* Jeļena Pubule
Rīgas Tehniskā universitāte

Asociētais profesors *Ph. D.* Morten Risstad
Norvēģijas Zinātnes un tehnoloģiju universitāte, Norvēģija

Vadošais zinātnieks *Dr. sc. (Tech.)* Timo Laukkanen
Ålto Universitāte, Somija

APSTIPRINĀJUMS

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

Oskars Švedovs (paraksts)
Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 101 attēls, 31 tabula, kopā 154 lappuses, neieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 442 nosaukumi.

SATURS

Ievads.....	5
1. Literatūras analīzes apkopojums.....	9
2. Metodoloģijas apkopojums.....	11
2.1. BIBLIOMETRISKĀ ANALĪZE	13
2.2. MATERIĀLU PLŪSMAS ANALĪZE	14
2.3. BIOMASAS KVALITĀTES ANALĪZE.....	14
2.4. KURINĀMĀ SADEDZINĀŠANAS TESTI.....	15
2.5. PELNU ĶĪMISKĀ SASTĀVA UN STRUKTŪRAS ANALĪZE.....	19
2.6. REGRESIJAS ANALĪZE.....	20
2.7. DAUDZKRITĒRIJU LĒMUMU PIEŅEMŠANAS ANALĪZE.....	20
2.8. APRITES CIKLA ANALĪZE.....	22
2.9. ILGTSPĒJAS NOVĒRTĒJUMS	24
3. Rezultātu apkopojums	26
3.1. EKSPERIMENTĀLĀS IZPĒTES REZULTĀTI	26
3.1.1. Paraugu kurināmā kvalitātes analīzes rezultāti.....	26
3.1.2. Paraugu sadedzināšanas testu rezultāti	28
3.1.3. Pelnu analīzes rezultāti	30
3.1.4. Regresijas analīzes rezultāti.....	31
3.2. DAUDZKRITĒRIJU LĒMUMU PIEŅEMŠANAS ANALĪZES REZULTĀTI	32
3.3. APRITES CIKLA IETEKMES NOVĒRTĒJUMA REZULTĀTI.....	34
3.4. ILGTSPĒJAS NOVĒRTĒJUMA REZULTĀTI.....	35
Secinājumi.....	38

IEVADS

Pētījuma aktualitāte

Cietais biokurināmais saglabā nozīmīgu vietu siltumenerģijas ražošanā, vienlaikus pieaugot spiedienam samazināt fosilo kurināmo izmantošanu un paplašināt vietējo energoresursu bāzi. Pasaules bioenerģijas patēriņa dati rāda, ka 2014.–2023. gadā biomasas izmantošana enerģētikā palielinājās no 13 000 TWh/gadā līdz 15 000 TWh/gadā, un šajā struktūrā pārliecinoši dominē cietā biomasā. Tajā pašā laikā pasaulē tiek identificēts vēl 15 000 TWh/gadā neizmantots biomasas potenciāls. Tādēļ bioenerģijas attīstības jautājums nav tikai par patēriņa palielināšanu, bet arī par to, kuras biomasas plūsmas iespējams pamatoti iekļaut enerģētikā, saglabājot resursu efektīvas izmantošanas un ilgtspējas principus. Neizmantotā biomasas potenciāla struktūrā koksne veido 74 %, nekoksnes biomasā – 26 %. Šis sadalījums parāda, ka koksne arī turpmāk būs būtisks bioenerģijas resurss, tomēr arī nekoksnes biomasā veido nozīmīgu resursu plūsmu. Tā ir skaitliski būtiska resursu daļa, kuras novērtēšana cietā biokurināmā tirgū līdz šim ir mazāk sistematizēta, salīdzinot ar koksnes kurināmo. Īpaši nozīmīgi tas ir granulu un šķeldas sektorā, kur kvalitātes, loģistikas un sadedzināšanas priekšnosacījumi lielā mērā veidoti, balstoties koksnes kurināmā īpašībās. Granulu tirgus mērogs šo problēmu pastiprina. 2024. gadā globālā granulu ražošana sasniedza 48,3 milj. t, bet patēriņš pirmo reizi pārsniedza 45 milj. t. Šāds tirgus apjoms norāda, ka granulas ir kļuvušas par starptautiski tirgotu un standartizētu cieto biokurināmo. Vienlaikus granulu ražošanas izejvielu bāze pārsvarā balstās mežrūpniecības un koksnes apstrādes atlikumos, kuru pieejamību ietekmē kokrūpniecības apjomi, eksporta plūsmas, kaskādveida izmantošanas princips un konkurence ar citiem produktiem. Tādēļ granulu nozares attīstībā būtiska kļūst ne tikai ražošanas jauda, bet arī izejvielu bāzes dažādošana. Latvijā šis jautājums ir aktuāls, jo biomasā jau ir nozīmīga siltumapgādes resursu struktūrā, bet vienlaikus lauksaimniecībā, pārtikas un dzērienu ražošanā, teritoriju apsaimniekošanā un citās nozarēs rodas biomasas plūsmas, kas netiek pilnvērtīgi izmantotas. Tās var papildināt vietējo cietā biokurināmā bāzi, ja to izmantošanai ir pierādāma kvalitātes, sadedzināšanas un ilgtspējas atbilstība. Šo vajadzību pastiprina arī tirgus prasības pēc izsekojamības: 2025. gadā 22,8 milj. t biomasas, tostarp granulas, tika pārdotas ar Ilgtspējīgas biomasas programmas sertifikātu. Līdz ar Atjaunojamo energoresursu direktīvas (*RED II*) prasībām tas nozīmē, ka alternatīvās biomasas izmantošanu nevar pamatot tikai ar apjomu vai pieejamību. Nepieciešama pieeja, kas vienā sistēmā sasaista resursa izcelsmi, kurināmā kvalitāti, sadedzināšanas rezultātus, aprites cikla ietekmi, SEG emisiju ietaupījumu un praktiskās ieviešanas nosacījumus.

Pētījuma mērķis un uzdevumi

Darba galvenais mērķis ir izstrādāt metodoloģiju alternatīvās biomasas ilgtspējas noteikšanai un novērtēt tās potenciālu siltumenerģijas ražošanai, nodrošinot vienotu un atkārtojamu pieeju pētāmo kurināmā paraugu salīdzināšanai pēc resursu pieejamības, kurināmā kvalitātes, sadedzināšanas procesa, emisijām, pelnu īpašībām, aprites cikla ietekmes un ilgtspējas kritērijiem.

Mērķa sasniegšanai definēti šādi uzdevumi:

- izvēlēties izpētei alternatīvās biomasas veidus un novērtēt to pieejamību, ņemot vērā resursu praktisko ieviešamību, izmantošanas ierobežojumus un potenciālu kurināmā ražošanā;
- izveidot pētāmos kurināmā paraugus un noteikt to kvalitāti raksturojošos parametrus, lai iegūtu savstarpēji salīdzināmus datus par alternatīvās biomasas granulu un šķeldas maisījumu piemērotību siltumenerģijas ražošanai;
- veikt kurināmā paraugu sadedzināšanas testus, nosakot degšanas procesu raksturojošos parametrus, emisiju veidošanās īpatnības un iegūto pelnu ķīmisko un strukturālo sastāvu;
- veikt pētāmo kurināmā paraugu komplekso novērtējumu, ietverot tehniskos, sociālos, vides un ilgtspējas kritērijus, lai pamatotu alternatīvās biomasas izmantošanas potenciālu siltumenerģijas ražošanai.

Pētījuma zinātniskā novitāte

Darba novitāte ir izstrādātā metodoloģija, kas vienotā ietvarā apvieno alternatīvās biomasas eksperimentālo izpēti, aprites cikla ietekmes analīzi, daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metodes un ilgtspējas novērtējumu, aptverot alternatīvās biomasas potenciāla novērtējumu pilnā piegādes un izmantošanas ķēdē no savākšanas līdz sadedzināšanai. Metodoloģijas atkarotamība un integrācija ir īpaši būtiska situācijā, kad gan kurināmā tirgus, gan normatīvās prasības virzās uz pierādāmu izsekojamību, emisiju kontroli un salīdzināmu ilgtspējas argumentāciju.

Pētījuma hipotēze

Alternatīvās biomasas kurināmā kvalitāti un degšanu raksturojošie rādītāji var neatbilst esošajām prasībām attiecībā uz cietā biokurināmā izmantošanu, tomēr tāds kurināmais var būt ilgtspējas ziņā līdzvērtīgs, salīdzinot ar koksni.

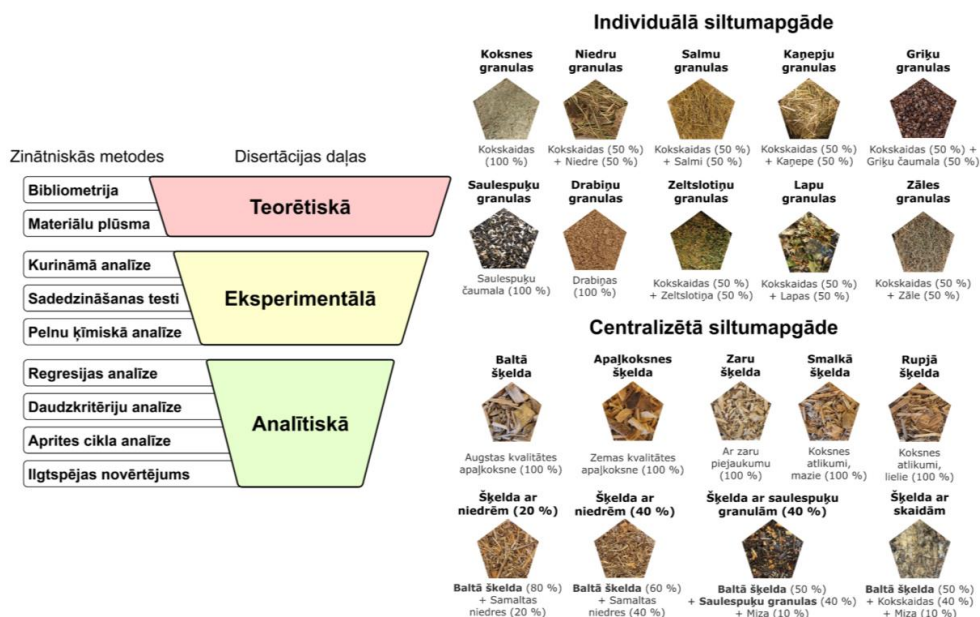
Pētījuma praktiskā nozīme

Izstrādātā metodoloģija ir izmantojama enerģētikas sektorā alternatīvās biomasas kurināmā ilgtspējas novērtēšanai, nodrošinot strukturētu un salīdzināmu pieeju dažādu biomasas resursu izvērtēšanai. Tā var kalpot kā atbalsta instruments lēmumu pieņemšanai siltumenerģijas ražošanas uzņēmumiem, kurināmā ražotājiem un politikas veidotājiem, izvēloties tehniski, vides un ekonomiski pamatotus kurināmā risinājumus. Metodoloģija ir izmantojama arī alternatīvās biomasas kurināmā ilgtspējas sertificēšanas procesa pilnveidei, jo tā apvieno kurināmā kvalitātes, degšanas procesa, emisiju un aprites cikla ietekmes novērtējumu vienotā sistēmā. Tādējādi tā veicina objektīvu alternatīvo granulu salīdzināšanu ar tradicionālo koksnes kurināmo un sekmē ilgtspējīgu vietējo biomasas resursu izmantošanu siltumenerģijas ražošanā.

Pētījuma struktūra

Darbam ir lineāra struktūra, tas ietver trīs daļas – teorētisko, eksperimentālo un analītisko. Teorētiskajā daļā izvēlēts pētījuma virziens, pamatojoties uz bibliometrisku analīzi un darbā

izvēlētās pētītās biomasas pieejamību. Eksperimentālajā daļā veikti izvēlēto biomasas paraugu kurināmā testi kvalitātes noteikšanai un degšanas testi sadegšanu raksturojošo parametru un emisiju noteikšanai, kā arī degšanas testu laikā savākto pelnu ķīmiskā analīze. Analītiskajā daļā veikta eksperimentāli iegūto datu statistikas analīze ar regresijas pieeju mainīgo sakarību identificēšanai, daudzkritēriju analīze, balstoties eksperimentāli un aptaujā iegūtajos datos, aprites cikla analīze biomasas granulu ražošanas un izmantošanas ietekmes uz vidi novērtēšanai, kā arī biomasas granulu ilgtspējas novērtējums, lai pārbaudītu atbilstību esošām tiesiski apstiprinātām prasībām. Struktūra un izvēlētās biomasas veids (granulas paraugi individuālās siltumapgādes kontekstā un šķeldas maisījumi centralizētās siltumapgādes kontekstā) redzams 1. attēlā.



1. att. Darba struktūra (kreisajā pusē) un izveidotie biomasas paraugi (labajā pusē).

Pētījuma rezultātu aprobācija

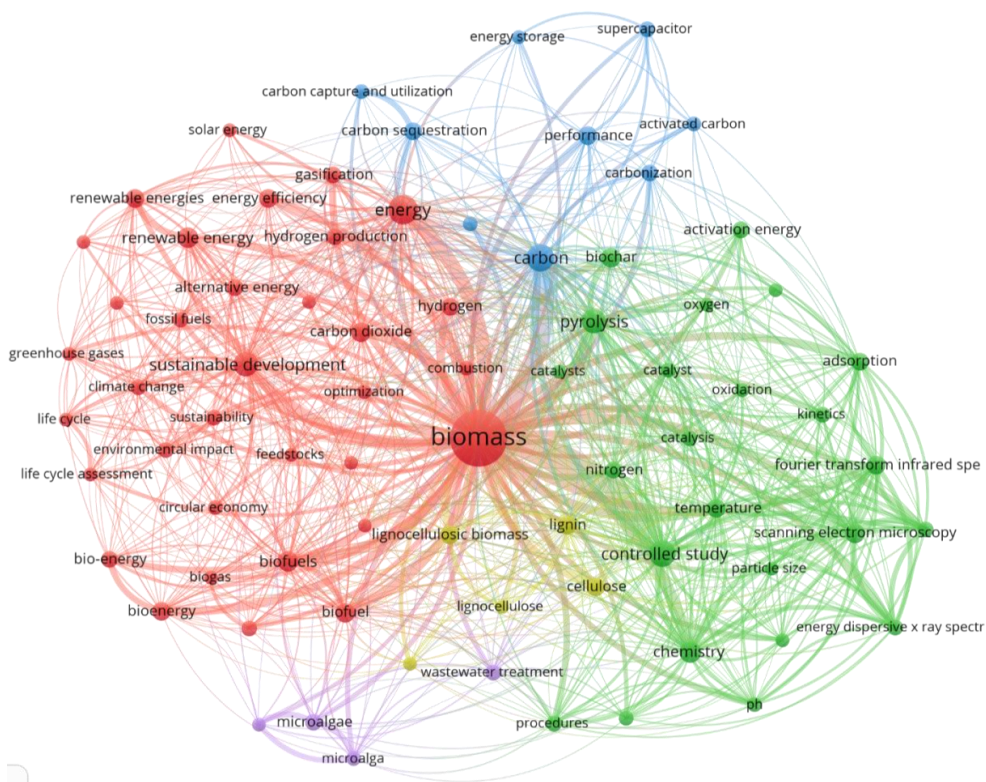
- Promocijas darba pētījuma rezultāti ir prezentēti četrās starptautiskās zinātniskās konferencēs.
- Švedovs, O., Dzīkēvičs, M. un Kirsanovs, V. Bibliometric Analysis of the Alternative Biomass Types and Biomass Combustion Technologies, International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies (CONNECT 2023), Latvija, Rīga.
- Kirsanovs, V., Kokorevičs, K., Švedovs, O., Siktārs, H., Stūrmane, A., Priedniece, V., Dzīkēvičs, M. un Vīgants, E. Biomass diversification for heat production: from theory to practice, International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies (CONNECT 2024), Latvija, Rīga.

- Kirsanovs, V., Kašs, K., Siktārs, H., **Švedovs, O.**, Černeja, J., Miķelsone, E., Priedniece, V., Mika, T., Vīgants, Ģ. un Vīgants, E. Biomass for district heating: the tango between sustainable biomass criteria and heat production vitality, International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies (CONNECT 2025), Latvija, Rīga.
 - Kirsanovs, V., Dilshad, M., Siktārs, H., **Švedovs, O.** un Mika, T. Alternative biomass for pellet production: be or not to be?, International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies (CONNECT 2026), Latvija, Rīga.
2. Promocijas darba pētījuma rezultāti atspoguļoti sešās starptautiskās zinātniskās publikācijās.
- **Švedovs, O.**, Vīgants, E., Siktārs, H., Kirsanovs, V. un Blumberga, D. (2025). A Bibliometric and Literature-Based Overview of Biomass Pre-treatment and Conversion Technologies Modelling with Aspen Software. *Environmental and Climate Technologies*, 29(1), 880-898. Pieejams: <https://doi.org/10.2478/rtuect-2025-0059>.
 - Dzikēvičs, M., Stūrmane, A., **Švedovs, O.**, Kirsanovs, V., Kalnbaļķīte, A., Ibile, D. un Blumberga, D. (2025). Sankey-Based Material Flow Analysis of Residual Biomass for Combustion: A Case Study of Latvia. *Environmental and Climate Technologies*, 29 (1), 483–499. Pieejams: <https://doi.org/10.2478/rtuect-2025-0033>.
 - **Švedovs, O.**, Stūrmane, A., Feofilovs, M., Kirsanovs, V. un Romagnoli, F. (2025). Comparative Cradle-to-Grave Life Cycle Assessment of Wood and Alternative Biomass Pellet Feedstocks for Decentralized Heating Using Experimental Data. *Biomass and Bioenergy*, 208, Zinātniskais raksts 108880. Pieejams: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108880>.
 - **Švedovs, O.**, Siktārs, H., Černeja, J., Kašs, K., Mika, T., Priedniece, V., Vīgants, E. un Kirsanovs, V. (2026). Empirical Model for Predicting the Combustion Performance of Low-Quality Biomass Pellets Based on Experimental Data. *Environmental and Climate Technologies*, 30 (1), 232–250. Pieejams: <https://doi.org/10.2478/rtuect-2026-0016>.
 - Kirsanovs, V., Siktārs, H., Kašs, K., **Švedovs, O.**, Černeja, J., Priedniece, V., Vīgants, Ģ. un Vīgants, E. (2026). Biomass Diversification for District Heating: Trade-Off Between Biomass Sustainability and Heat Production Efficiency. *Environmental and Climate Technologies*, 30 (1), 307–325. Pieejams: <https://doi.org/10.2478/rtuect-2026-0020>.
 - **Švedovs, O.**, Kārkliņa, A., Bass, D., Kirsanovs, V., Vīgants, E., Kušnere, Z., Kalnbaļķīte, A. un Kubule, A. (2026). Prioritization of Alternative Biomass Pellets for Heat Production Using Multi-Criteria Ranking and Greenhouse Gas Savings Assessment. *Biomass and Bioenergy*, 217, Zinātniskais raksts 110018. Pieejams: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2026.110018>.

1. LITERATŪRAS ANALĪZES APKOPOJUMS

Biomasa izmantošana vispirms aplūkota oglekļa aprites cikla, siltumnīcefekta gāzu (SEG) un antropogēno emisiju kontekstā. Šāds skatījums ļauj parādīt, ka kurināmā izvēle nav saistīta tikai ar enerģijas ieguvu, bet arī ar ietekmi uz SEG emisijām. Atšķirībā no fosilajiem kurināmajiem biomasas piedalās īsākā oglekļa aprites ciklā, tomēr tas pats par sevi nenozīmē, ka jebkura biomasas izmantošana ir ilgtspējīga. Biomasas ilgtspēju nosaka izejvielas izcelsme, konkurence ar citiem izmantošanas virzieniem, apstrādes nepieciešamība, transportēšana, sadedzināšanas efektivitāte un emisijas visā aprites ciklā.

Literatūras analīze parāda, ka biomasas nozīme siltumapgādē pieaug gan ES, gan Latvijā, īpaši centralizētās siltumapgādes sistēmās un mājokļu apkures sektorā. Latvijas gadījumā šo tendenci veicina vietējo biomasas resursu pieejamība, fosilo kurināmo cenu svārstības un nepieciešamība mazināt atkarību no importētiem energoresursiem. Vienlaikus bioekonomikas un kaskādveida izmantošanas principi nosaka, ka enerģētikā vispirms būtu izmantojamas zemākas pievienotās vērtības biomasas plūsmas, atlikumi un blakusprodukti, ja tiem nav pamatota augstvērtīgāka lietojuma. Tādēļ alternatīvās biomasas aktualitāte nav saistāma tikai ar papildu kurināmā apjomu, bet arī ar resursu efektīvāku iekļaušanu vietējā bioekonomikā. Biomasas praktisko piemērotību kurināmā ražošanai un izmantošanai nosaka vairāku īpašību kopums. Zemākais sadegšanas siltums raksturo enerģētisko vērtību, tomēr praksē tikpat būtiski ir mitruma saturs, pelnu saturs, materiāla viendabīgums, pelnu kušanas uzvedība, emisiju profils un sadedzināšanas iekārtas darba režīms. Tādēļ alternatīvo granulu un šķeldas maisījumu izvērtēšanā nepieciešams vienlaikus analizēt kurināmā kvalitāti, sadedzināšanas testos iegūto efektivitāti un emisijas, kā arī pelnu īpašības un to iespējamo apsaimniekošanu. Bibliometriskās analīzes (sk. metodoloģiju 2.1. apakšnodaļā) rezultāti atslēgvārdu līdzlietošanas tīklā parāda galvenos biomasas enerģētikas pētījumu virzienus un to savstarpējo sasaisti (1.1. att.). Ap atslēgvārdu "*biomass*" grupējas vairākas tematiskās kopas – ilgtspēja, atjaunojamā enerģija, aprites cikla novērtējums un vides ietekme; termiskās konversijas tehnoloģijas, tostarp pirolīze, gazifikācija, karbonizācija un torrefikācija; kā arī lignocelulozes biomasas, celulozes un lignīna izpēte. Šāda struktūra parāda, ka biomasas pētniecība vairs nav saistīta tikai ar kurināmā tehnoloģisko izmantošanu vai konversijas efektivitāti, bet arvien vairāk ietver arī resursa izcelsmes, vides ietekmes un ilgtspējas jautājumus. Līdzīga tendence konstatēta arī citos bioenerģijas bibliometriskajos pētījumos, kuros pēc 2000. gada pieaug publikāciju skaits un pastiprinās vides un sistēmiskās analīzes nozīme. Tas pamato promocijas darbā izvēlēto pieeju – alternatīvo biomasu vērtēt ne tikai pēc kvalitātes un sadedzināšanas rezultātiem, bet arī pēc aprites cikla ietekmes, praktiskās izmantojamības un ilgtspējas potenciāla. Normatīvā ietvara analīze apliecina, ka alternatīvās biomasas ieviešanu nosaka ne tikai resursu pieejamība un cena. Būtiska nozīme ir arī kurināmā kvalitātes prasībām, emisiju robežvērtībām, ekodizaina nosacījumiem un ilgtspējas kritērijiem. *RED II* biomasas izmantošanu sasaista ar pārbaudāmu izejvielu izcelsmi un SEG emisiju ietaupījumu, savukārt mazas jaudas katlu ekodizaina prasības ierobežo tādu alternatīvo granulu izmantošanu, kurām nav pierādāma atbilstība emisiju robežvērtībām. Līdz ar to alternatīvās biomasas kurināmo ieviešana ir vienlaikus tehnoloģisks, vides un normatīvs jautājums.



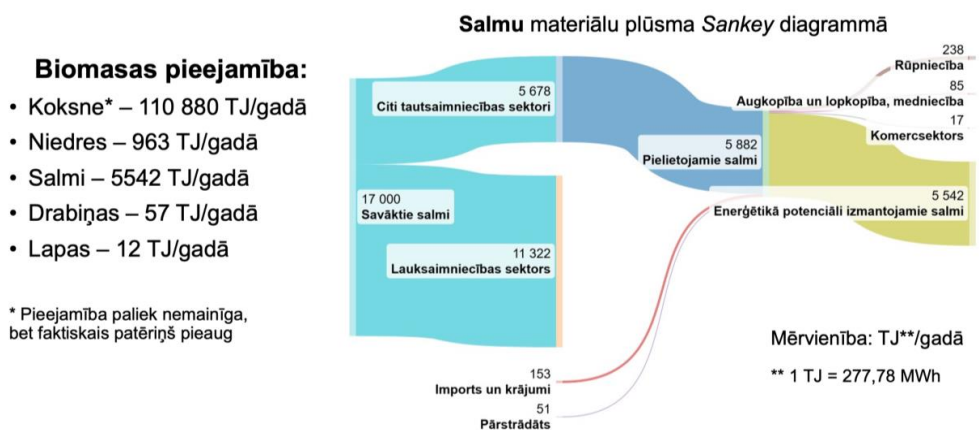
1.1. attēls. Ar biomasu enerģētikas kontekstā saistītie atslēgvārdi no zinātniskiem izdevumiem.

Esošie pētījumi sniedz nozīmīgu pamatu alternatīvo biomasas kurināmo izvērtēšanai, tomēr bieži aptver tikai daļu no nepieciešamā novērtējuma. Vienā pētījumu grupā galvenā uzmanība pievērsta granulu kvalitātei un tās uzlabošanai, analizējot izejvielas ietekmi uz mitruma saturu, pelnu saturu, mehānisko izturību, tilpumbūvumu un citiem rādītājiem. Citā pētījumu grupā vērtēta granulu sadedzināšana, katla efektivitāte un emisijas mazas jaudas iekārtās, tomēr šajos darbos parasti netiek vienlaikus analizēta aprites cikla ietekme, ilgtspējas kritēriji un lēmumu pieņemšanai nepieciešamie praktiskie faktori. Savukārt aprites cikla novērtējuma pētījumi nodrošina plašāku skatījumu uz vides ietekmi, taču to rezultāti būtiski atkarīgi no sistēmas robežām, funkcionālās vienības, biogēnā oglekļa uzskaites, transportēšanas pieņēmumiem un izmantotajām datubāzēm. Tas pamato nepieciešamību pēc vienotas pieejas, kurā alternatīvā biomasas tiek vērtēta vienlaikus pēc kvalitātes, sadedzināšanas rezultātiem, vides ietekmes un ilgtspējas.

2. METODOLOĢIJAS APKOPOJUMS

Šajā nodaļā aprakstīta pētījumā izstrādātā un izmantotā metodoloģija. Izejvielu izvēle balstīta priekšizpētē, kuras mērķis bija noteikt Latvijas apstākļos faktiski pieejamas un pētījumam piemērotas biomasas plūsmas. Priekšizpēte nav interpretējama kā atsevišķa promocijas darba rezultātu daļa, bet gan kā atlases posms pirms metodoloģijas pilna lietojuma. Par sākotnējo atlases kritēriju tika noteikta izejvielu faktiskā pieejamība, jo literatūrā sastopami arī tādi granulū izejvielu piemēri, kas tehniski var būt izmantojami cietā biokurināmā ražošanai, bet neatbilst Latvijas reģionālajam resursu kontekstam.

Lai biomasas pieejamību vērtētu ne tikai kā teorētisku resursu, bet arī kā konkrētu tautsaimniecības plūsmu, daļai izejvielu tika veikta materiālu plūsmas analīze (MPA) (sk. metodoloģiju 2.2. apakšnodaļā). Tā ļāva noteikt, kā attiecīgā biomasas sadalās starp esošajiem izmantošanas virzieniem un kāda daļa potenciāli varētu tikt novirzīta kurināmā ražošanai. Šāda pieeja izmantota koksnei, niedrēm, salmiem, drabiņām un lapām. Aprēķini parādīja, ka enerģētikā potenciāli izmantojamais apjoms ir 110 880 TJ/gadā koksnei, 963 TJ/gadā niedrēm, 5542 TJ/gadā salmiem, 57 TJ/gadā drabiņām un 12 TJ/gadā lapām. Salmu plūsmas piemērs (sk. 2.1. att.) parāda šīs pieejas nozīmi – no 17 000 TJ/gadā savāktu salmu plūsmas 5882 TJ/gadā novērtēti kā izmantojami salmi, no kuriem 5542 TJ/gadā potenciāli varētu izmantot enerģētikā.



2.1. attēls. Materiālu plūsmas analīzes rezultāti un vizualizācijas piemērs.

Pēc pieejamības izvērtēšanas tika ņemti vērā papildu atlases kritēriji: izejvielas sākotnējā kvalitāte, frakcijas izmērs, praktiskā sagatavojamība un granulū gadījumā – iegūtā produkta mehāniskā noturība. Sākotnējā kvalitāte tika vērtēta kvalitatīvi, ņemot vērā vizuāli konstatējamu piesārņojumu, materiāla nevienmērīgumu, nepatīkamu smaku un bioloģiskās degradācijas pazīmes. Šādi kritēriji ļāva agrīnā posmā izslēgt izejvielas, kuru izmantošana laboratorijas mērogā nebūtu tehniski pamatota vai reproducējama.

Granulū paraugu atlase veikta individuālās siltumapgādes (ISA) kontekstā, kur būtiska ir kurināmā viendabība, mehāniskā izturība, stabila padeve un piemērotība mazas jaudas granulū katlam. Pētījumā iekļauti paraugi, kas pārstāv vairākas biomasas grupas: koksnes kurināmo;

lauksaimniecības atlikumus; pārtikas rūpniecības blakusproduktus; kā arī mazvērtīgi izmantotu vai apsaimniekošanas ziņā problemātisku biomasu. Granulu veidošanai tika atlasīta koksne, niedres, salmi, kaņepes, griķu sēklu čaumalas, saulespuķu sēklu čaumalas, drabiņas, Kanādas zeltslotiņa, koku lapas un zāle. Sākotnējie granulēšanas mēģinājumi tika veikti laboratorijas mērogā. Praktiskais atlases kritērijs bija granulu spēja pēc presēšanas un atdzišanas saglabāt formu un mehānisko noturību bez izteiktas fragmentācijas. No turpmākas izpētes tika izslēgtas izejvielas, kurām veidojās drupanas un nestabilas granulas. Atsevišķiem alternatīvās biomasas veidiem tika izmantota kopgranulēšana ar 50 % koksnes zāģskaidu masas daļu, lai uzlabotu granulu mehānisko izturību un nodrošinātu stabilāku sadedzināšanas testu norisi. Granulu mehāniskās izturības mērķvērtība tika noteikta vismaz 90 %. Biomasas sagatavošana pirms granulēšanas ietvēra žāvēšanu vai mitrināšanu, frakcijas izmēra samazināšanu un materiāla homogenizēšanu. Mitrākām izejvielām bija nepieciešama papildu žāvēšana, savukārt sausākām izejvielām – mitruma stabilizēšana pirms presēšanas. Praktiskie granulēšanas mēģinājumi parādīja, ka līdzās izejvielas veidam būtiska nozīme ir mitrumam, daļiņu izmēram, matricas izvēlei un presēšanas atkārtojamībai. Promocijas darba vajadzībām granulas tika ražotas laboratorijas mērogā tādā apjomā, lai nodrošinātu kvalitātes analīzi un sadedzināšanas testus stabilos ekspluatācijas apstākļos.

Šķeldas paraugu un maisījumu atlase veikta centralizētas siltumapgādes (CSA) kontekstā. Šajā pētījuma daļā mērķis nebija pārbaudīt granulēšanas piemērotību, bet novērtēt situāciju, kurā katla operators daļu tradicionālās šķeldas aizstāj vai papildina ar citām biomasas plūsmām. Tādēļ tika salīdzinātas dažādas izcelsmes un frakcijas šķeldas plūsmas un sagatavoti šķeldas maisījumi. Faktiskā šķeldas izcelsme netiek atklāta komerciālās konfidencialitātes apsvērumu dēļ, tomēr paraugi izvēlēti tā, lai tie reprezentētu centralizētās siltumapgādes katlumājās praksē sastopamus kurināmā kvalitātes scenārijus.

Pētījumā izmantoto granulu paraugu un šķeldas maisījumu sastāvs apkopots 2.1. tabulā, tajā vienoti norādīti gan ISA daļā izmantotie granulu paraugi, gan CSA daļā izmantotie šķeldas paraugi un maisījumi, tādējādi nodrošinot turpmākajos aprēķinos un rezultātu interpretācijā lietoto apzīmējumu konsekveni.

2.1. tabula

Pētāmo granulu paraugu un šķeldas maisījumu sastāvs (% no masas daļas)

Apzīmējums	Kurināmā sastāvs
<i>W</i>	Zāģskaidas no mežrūpniecības (100 %)
<i>R</i>	Zāģskaidas no mežrūpniecības (50 %) un niedru stiebru biomasas (50 %)
<i>S</i>	Zāģskaidas no mežrūpniecības (50 %) un kviešu salmu stiebru biomasas (50 %)
<i>H</i>	Zāģskaidas no mežrūpniecības (50 %) un kaņepju stiebru biomasas (50 %)
<i>BH</i>	Zāģskaidas no mežrūpniecības (50 %) un griķu čaumalu biomasas (50 %)
<i>SH</i>	Saulespuķu sēklu čaumalu biomasas (100 %)
<i>BSG</i>	Iesala drabiņu biomasas (100 %)
<i>CG</i>	Zāģskaidas no mežrūpniecības (50 %) un Kanādas zeltslotiņas stiebru biomasas (50 %)
<i>L</i>	Zāģskaidas no mežrūpniecības (50 %) un lapu koku nokritušās lapas (50 %)
<i>G</i>	Zāģskaidas no mežrūpniecības (50 %) un nopļauta zāle (50 %)
<i>WC1</i>	Šķelda no augstas kvalitātes apaļkoksnes (100 %)
<i>WC2</i>	Šķelda no zemas kvalitātes apaļkoksnes (100 %)

Apzīmējums	Kurināmā sastāvs
WC3	Šķelda no mežizstrādes ar zaru piejaukumu (100 %)
WR1	Šķelda no mežrūpniecības (mazā frakcija) (100 %)
WR2	Šķelda no mežrūpniecības (lielā frakcija) (100 %)
WM1	Šķelda no augstas kvalitātes apaļkoksnes (80 %) un samaltas niedres (20 %)
WM2	Šķelda no augstas kvalitātes apaļkoksnes (60 %) un samaltas niedres (40 %)
WM3	Šķelda no augstas kvalitātes apaļkoksnes (50 %), mizas piejaukums (10 %) un SH granulas (40 %)
WM4	Šķelda no augstas kvalitātes apaļkoksnes (50 %), mizas piejaukums (10 %) un zāģskaidas no mežrūpniecības (40 %)

2.1. Bibliometriskā analīze

Bibliometriskā analīze tika izmantota, lai identificētu galvenos zinātniskos virzienus biomasas enerģētikas pētījumos un pamatotu promocijas darba vietu šajā pētniecības laukā. Tā ļauj sistemātiski analizēt publikāciju kopumu pēc bibliogrāfiskajiem datiem, t. sk. publicēšanas gada, autoriem, institūcijām, citējamības, žurnāliem, atslēgvārdiem un kopsavilkumiem. Promocijas darbā bibliometriskā analīze izmantota nevis kā pašmērķīgs literatūras apraksts, bet gan kā instruments pētījuma virziena zinātniskās aktualitātes pārbaudei. Analīze tika veikta secīgi. Vispirms tika definēta pētāmā tēma un izveidoti meklēšanas vaicājumi, izmantojot atslēgvārdus, kas raksturo biomasu, tās pārveides tehnoloģijas, sadedzināšanu, granulas, ilgtspēju un aprites cikla novērtējumu. Atslēgvārdu izvēlē tika ņemts vērā tas, ka vienai un tai pašai pētniecības tēmai literatūrā var būt lietoti atšķirīgi termini, tāpēc vaicājumi tika veidoti tā, lai aptvertu galvenos virzienus un vienlaikus mazinātu neatbilstošu ierakstu iekļaušanas risku. Datu iegūšanai tika izmantota *Scopus* datubāze, jo tā nodrošina plašu zinātnisko publikāciju pārklājumu un ļauj eksportēt bibliometriskajai analīzei nepieciešamos datus. Meklēšana tika veikta publikāciju nosaukumos, kopsavilkumos un atslēgvārdos. Analīzē iekļautas publikācijas no 2000. līdz 2025. gadam, aptverot enerģētikas, inženierzinātņu un vides zinātnes jomas. Dati tika eksportēti *CSV* formātā, iekļaujot informāciju par autoriem, publikācijas gadu, citēšanas skaitu, avotu, kopsavilkumu un atslēgvārdiem. Publikāciju skaita, citējamības, autoru, valstu, institūciju un žurnālu analīzei tika izmantoti *Scopus Analyzer* un *Citation overview* rīki, savukārt datu tālākai apstrādei un rezultātu apkopošanai – *Microsoft Office Excel 365*. Tematisko saikņu noteikšanai tika izmantota programma *VOSviewer*, kurā veikta līdzautorības un atslēgvārdu līdzlietošanas analīze. Līdzautorības analīze ļāva raksturot sadarbības struktūru starp pētniekiem un institūcijām, atslēgvārdu līdzlietošanas analīze – noteikt galvenos tematiskos klasterus un to savstarpējo sasaisti. Rezultātu interpretācijā izmantotas tīkla un pārklājuma vizualizācijas. Tīkla vizualizācija parāda, kuras tēmas un atslēgvārdi veido ciešākas savstarpējās saiknes, savukārt pārklājuma vizualizācija ļauj novērtēt, kā pētījumu virzieni mainījušies laika gaitā. Šāda pieeja nodrošināja strukturētu pamatu literatūras analīzei un ļāva parādīt, ka promocijas darbā izvēlētais virziens atbilst aktuālajām biomasas enerģētikas pētniecības tendencēm.

2.2. Materiālu plūsmas analīze

MPA promocijas darbā izmantota, lai novērtētu alternatīvās biomasas pieejamību un pamatotu atsevišķu biomasas plūsmu iekļaušanu turpmākajā eksperimentālajā izpētē. Analīze balstījās pieejamo statistikas datu un literatūras avotu apkopošanā par attiecīgo biomasas plūsmu veidošanos un izmantošanu tautsaimniecībā. Par galveno datu avotu Latvijas kontekstā izmantota Centrālās statistikas pārvaldes (CSP) Oficiālās statistikas portāla (OSP) datubāze, kurā tika meklēta informācija par biomasas ražošanas, savākšanas, patēriņa, pārstrādes, importa, eksporta un izmantošanas virzieniem. Atkarībā no konkrētā biomasas veida tika izmantoti dati par lauksaimniecības kultūraugu platībām un ražu, koksnes un mežrūpniecības plūsmām, pārtikas un dzērienu ražošanas blakusproduktiem, kā arī atkritumu vai atlikumu apsaimniekošanas plūsmām.

MPA mērķis bija noteikt, kāda daļa no kopējās biomasas plūsmas jau tiek izmantota pārtikā, lopbarībā, rūpniecībā, enerģētikā vai citos virzienos un kāda daļa paliek neizmantota vai mazvērtīgi izmantota un potenciāli varētu tikt novirzīta kurināmā ražošanai. Promocijas darba izstrādes gaitā MPA netika izmantota kā pilnas masas bilances slēgšanas metode, jo vairākiem biomasas veidiem pieejamie dati nav pietiekami detalizēti, lai precīzi aprakstītu visas plūsmas un krājumus. Tādēļ šajā darbā MPA izmantota kā biomasas pieejamības novērtēšanas un pamatošanas instruments. Gadījumos, kad CSP OSP nebija pieejami pietiekami detalizēti dati par konkrētu biomasas plūsmu, tika izmantoti pamatoti pieņēmumi, balstoties literatūras avotos, līdzīgu biomasas plūsmu aprakstos vai kaimiņvalstu datos. Šāda pieeja bija nepieciešama, piemēram, gadījumos, kad statistika uzrāda kopējo ražošanas vai patēriņa apjomu, bet neatdala izmantojamās atlikumus, blakusproduktus vai potenciāli enerģētikā izmantojamo daļu. Pieņēmumi tika izmantoti tikai tajos posmos, kuros tie bija nepieciešami plūsmas struktūras izveidei, un rezultāti interpretēti kā potenciāla novērtējums, nevis kā pilna nacionālā masas bilance. Lai dažādus biomasas veidus būtu iespējams savstarpēji salīdzināt, plūsmu apjomi tika pārrēķināti enerģijas ekvivalentā. Tas ļāva vērtēt ne tikai materiāla masu, bet arī tā potenciālo ieguldījumu siltumenerģijas ražošanā. Šāda pieeja izmantota koksnei, niedrēm, salmiem, drabiņām un lapām, kur pieejamie dati ļāva noteikt enerģētikā potenciāli izmantojamo plūsmas daļu.

MPA rezultāti tika vizualizēti *Sankey* tipa diagrammās, izmantojot *SankeyMATIC* rīku. Šāds attēlojums ir piemērots biomasas pieejamības analīzei, jo plūsmu bultu platums ir proporcionāls attiecīgās plūsmas apjomam un ļauj parādīt, kuros sistēmas posmos biomasas tiek izmantota, uzkrājas vai paliek potenciāli pieejama kurināmā ražošanai. Tādējādi MPA promocijas darbā nodrošināja pamatu alternatīvās biomasas resursu atlasei un salīdzināšanai pirms kvalitātes, sadedzināšanas un ilgtspējas novērtējuma.

2.3. Biomasas kvalitātes analīze

Kurināmā kvalitātes analīze veikta, lai iegūtu salīdzināamus datus par pētāmo granulu un šķeldas paraugu piemērotību siltumenerģijas ražošanai. Izvēlētie rādītāji raksturo gan kurināmā enerģētisko vērtību, gan tā uzvedību uzglabāšanas, padeves, granulēšanas un sadedzināšanas laikā. Mitruma saturs (*MC*) ietekmē kurināmā siltumspēju un degšanas stabilitāti, pelnu saturs (*AC*) raksturo neorganisko atlikumu daudzumu, gaistošo organisko vielu (*VM*) un fiksētā

oglekļa saturs (FC) – degšanas procesa norisi, savukārt elementārais sastāvs ($CHNSO$) ļauj sasaistīt kurināmā ķīmisko struktūru ar emisiju veidošanās risku. Papildus noteikts augstākais (Q_a^d) un zemākais (Q_z^d) sadegšanas siltums, pelnu kušanas temperatūra (AMP), tilpumblīvums (BD) un mehāniskā izturība (DU), jo šie rādītāji raksturo kurināmā praktisko izmantojamību, padeves stabilitāti un ekspluatācijas riskus. Analīzes veiktas Vides monitoringa laboratorijā ISA granulu paraugiem un CSA šķeldas paraugiem, izmantojot attiecīgos LVS EN ISO standartus; izmantoto metožu un aprīkojuma kopsavilkums sniegts 2.2. tabulā.

2.2. tabula

Kurināmā eksperimentālās izpētes parametri, metodes un aprīkojums

Aktivāte/parametrs	Metodoloģiskā bāze	Aprīkojums
Paraugu sagatavošana	LVS EN ISO 14780:2017	Griezējdzirnavas <i>Vibrotechnik PM120</i>
MC	LVS EN ISO 18134-2:2017	Svari <i>Precisa XB 120A</i>
	LVS EN ISO 18134-3:2015	Žāvkapis <i>Ecocell 55</i>
AC	LVS EN ISO 18122:2016	Svari <i>Precisa XB 120A</i>
		Muflēkrāsns <i>Nabertherm L3/11/P320</i>
		Eksikators
		Muflēkrāsns <i>SNOL 7.2/1300</i>
VM	LVS EN ISO 18123:2023	Svari <i>Precisa XB 120A</i>
		Muflēkrāsns <i>SNOL 7.2/1300</i>
		Temperatūras kontroles komplekts (datu uztvērējs <i>FLUKE 1528 CHUBE-4</i> , zonde <i>FLUKE PT-100</i> , termopāris K tipa)
		Eksikators
FC	Pēc vienādojuma $FC = 100 - VM - AC$	-
$CHNSO$	LVS EN ISO 16948:2015	<i>Costech ESC 4010</i>
	LVS EN ISO 16994:2016	Svari <i>RADWAG AS120.R2 PLUS</i>
	LVS EN ISO 16993:2016	
Q_a^d, Q_z^d	LVS EN ISO 18125:2017	Kalorimetrs <i>IKA-Werke C 2000</i>
		Granulu prese <i>IKA-Werke C 21</i>
		Skābekļa padošanas elements <i>IKA C 248</i>
AMP	LVS EN ISO 21404:2020	Kalorimetriskā bumba <i>IKA C 5010</i>
		Pelnu kušanas analīzes iekārta <i>Carbolite CAF DIGITAL</i>
BD	LVS EN ISO 17828:2016	Metāla trauks ar rokturiem, apjoms – 5 l
DU	LVS EN ISO 17831-1:2016	Motors <i>Motovario HA 42</i>
		Sijātājs <i>Retsch AS 400</i>
		Svari <i>KERN 572-57</i>

2.4. Kurināmā sadedzināšanas testi

Kurināmā sadedzināšanas testi veikti divos mērogos – ISA apstākļos ar granulu katlu un CSA apstākļos ar šķeldas katlu (kustīgie ārdi). Šāds sadalījums izvēlēts, lai vienā metodoloģiskā ietvarā salīdzinātu alternatīvās biomasas izmantošanu mazas jaudas apkures katlā un praktiski ekspluatējamā vidējas jaudas katlumājā. Testos noteikta kurināmā ietekme uz dūmgāzu emisijām, katla efektivitāti un pēc sadedzināšanas iegūto pelnu īpašības.

Abos stendos mērita dūmgāzu temperatūra (FT), skābekļa saturs dūmgāzēs (O_2), oglekļa monoksīda koncentrācija (CO), slāpekļa oksīdu koncentrācija (NO_x) un cieto daļiņu koncentrācija (PM), kā arī aprēķināts gaisa pārpalikuma koeficients (α). Gāzveida emisijas noteiktas ar *Testo 350* dūmgāzu analizatoru, savukārt PM – ar *Testo 380* analizatoru. CO un NO_x vērtības pārrēķinātas uz normālapstākļiem un attiecinātas pret 10 % O_2 , lai testu rezultāti būtu salīdzināmi. PM gadījumā pārrēķins tika veikts *Testo 380* pēc operatora ievadītajiem parametriem. ISA testos papildus noteikts kurināmā patēriņš testa periodā (B), retinājums dūmvadā (P), ūdens tilpuma plūsma (WVF), vidējā atgaitas ūdens temperatūra ($\bar{T}_{in}$) un vidējā turpgaitas ūdens temperatūra ($\bar{T}_{out}$). Šie parametri izmantoti ar kurināmo ievadītās enerģijas (Q_{IN}), lietderīgi iegūtās siltumenerģijas (Q_{OUT}) un ISA katla efektivitātes (E_{ISA}) aprēķinā. CSA testos katla efektivitāte (E_{CSA}) noteikta pēc siltuma zudumu aprēķina. Mērāmo un aprēķināto parametru, metodoloģiskās bāzes un aprīkojuma kopsavilkums sniegts 2.3. tabulā.

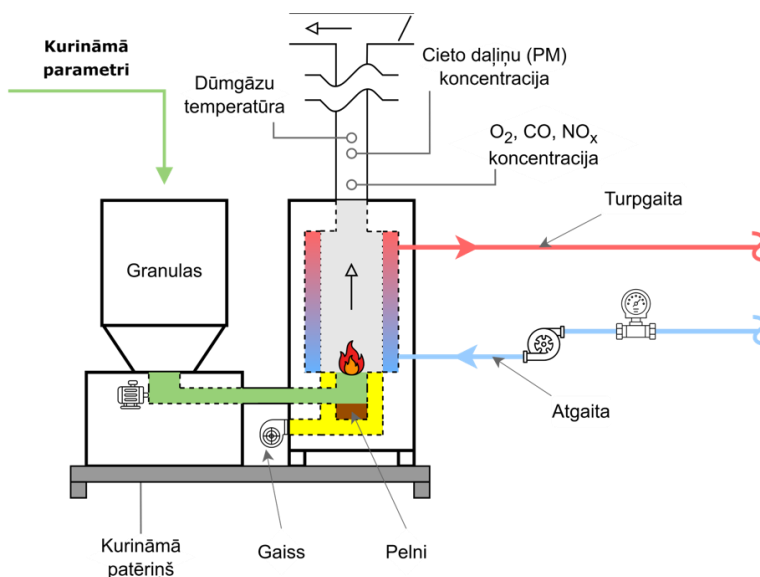
2.3. tabula

ISA un CSA sadedzināšanas testu ietvaros pētāmo parametru kopsavilkums

Apzīmējums	Parametrs	Pielietojums	Metodoloģiskā bāze	Aprīkojums/ datu avots
FT	Dūmgāzu temperatūra	ISA/CSA	<i>EN 14789:2017</i>	<i>Testo 350</i> , K tipa termopāris
O_2	Skābekļa saturs dūmgāzēs	ISA/CSA	<i>EN 14789:2017</i>	<i>Testo 350</i>
CO	Oglekļa monoksīda koncentrācija	ISA/CSA	<i>EN 15058:2017</i> ; pārrēķins uz normālapstākļiem un 10 % O_2	<i>Testo 350</i>
NO_x	Slāpekļa oksīdu koncentrācija	ISA/CSA	<i>ISO 10849:2022</i> ; pārrēķins uz normālapstākļiem un 10 % O_2	<i>Testo 350</i>
PM	Cieto daļiņu koncentrācija	ISA/CSA	<i>VDI 4206-2:2015</i> ; mēriekārtas pārrēķins pēc operatora ievadītajiem parametriem	<i>Testo 380</i>
α	Gaisa pārpalikuma koeficients	ISA/CSA	Aprēķins pēc O_2	Aprēķins no <i>Testo 350</i> datiem <i>DINI ARGEO</i> <i>DFW06</i> svaru platforma, hronometrs <i>DPT FLOW</i>
B	Kurināmā patēriņš testa periodā	ISA	<i>LVS EN 45501:2015</i>	<i>2000</i> spiediena devējs <i>Kamstrup</i> <i>MULTICAL 602</i>
P	Retinājums dūmvadā	ISA	Testa režīma kontrole	<i>Campbell Scientific</i> <i>TC 108</i> , K tipa termopāri <i>Campbell Scientific</i> <i>TC 108</i> , K tipa termopāri
WVF	Ūdens tilpuma plūsma	ISA	<i>LVS EN 303-5:2021</i> efektivitātes aprēķinam	
$\bar{T}_{in}$	Vidējā atgaitas ūdens temperatūra	ISA	<i>LVS EN 303-5:2021</i> efektivitātes aprēķinam	
$\bar{T}_{out}$	Vidējā turpgaitas ūdens temperatūra	ISA	<i>LVS EN 303-5:2021</i> efektivitātes aprēķinam	
Q_{IN}	Ar kurināmo ievadītā enerģija	ISA	Aprēķins no B un Q_z^d	Aprēķins

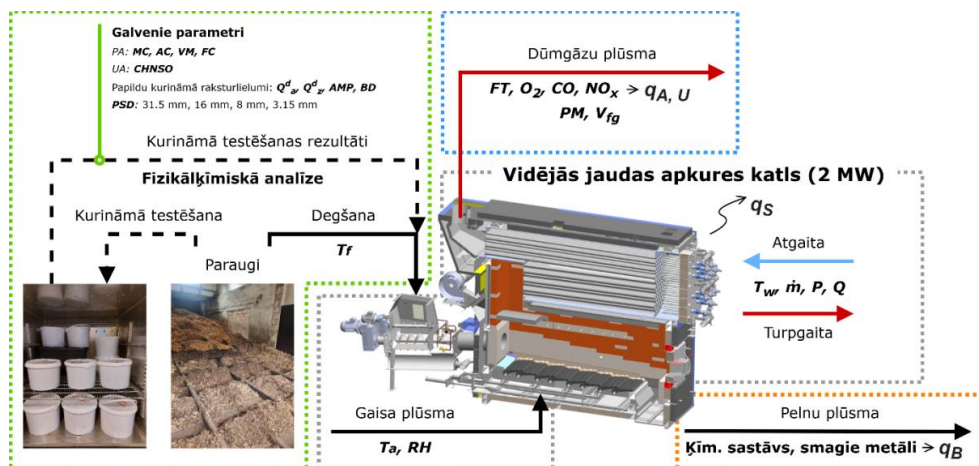
Apzīmējums	Parametrs	Pielietojums	Metodoloģiskā bāze	Aprīkojums/ datu avots
Q_{OUT}	Lietderīgi iegūtā siltumenerģija	ISA	Aprēķins no WFV , $\bar{T}_{out}$ un $\bar{T}_{in}$	Aprēķins
E_{ISA}	ISA katla efektivitāte	ISA	LVS EN 303-5:2021, tiešās bilances metode	Aprēķins
q_A	Siltuma zudumi ar sadegšanas produktu sajūtamo siltumu	CSA	LVS EN 303-5:2021	Aprēķins
q_U	Zudumi nepilnīgas oksidācijas dēļ	CSA	LVS EN 303-5:2021	Aprēķins
q_S	Zudumi starojuma, konvekcijas un vadīšanas procesā	CSA	LVS EN 303-5:2021	Aprēķins
q_B	Zudumi nesadegušās kurināmās vielas atlikumā pelnos	CSA	LVS EN 303-5:2021	Aprēķins
E_{CSA}	CSA katla efektivitāte	CSA	LVS EN 303-5:2021, netiešās bilances metode	Aprēķins no siltuma zudumiem

ISA sadedzināšanas testi veikti RTU VASSI Degšanas procesu izpētes laboratorijā, izmantojot 25 kW granulu katlu *GRANDEG GD BIO*. Visi granulu paraugi dedzināti, lietojot vienādu katla konfigurāciju, par pamatu izmantojot ražotāja iestatījumus koksnes granulu sadedzināšanai. Šāda pieeja nodrošināja salīdzināmus degšanas apstākļus un ļāva novērtēt alternatīvo granulu uzvedību bez individuālas degšanas režīma pielāgošanas katram paraugam. Granulu padeve notika ar katla gliemežtransportieri, katls testa laikā atradās uz *DINI ARGEO DFW06* svaru platformas, kas ļāva noteikt B . Dūmvadā ar *DPT FLOW 2000* spiediena devēju tika kontrolēts P , ko testa laikā uzturēja aptuveni -10 Pa. Siltuma ražošanas aprēķinam izmantota *WFV*, kas mērīta ar *Kamstrup MULTICAL 602* siltumskaitītāju, un ūdens temperatūras starpība starp $\bar{T}_{out}$ un $\bar{T}_{in}$, kas noteikta ar *Campbell Scientific TC 108* datu uztvērējam pievienotiem K tipa termopāriem. E_{ISA} noteikta pēc tiešās bilances metodes atbilstoši LVS EN 303-5:2021, salīdzinot ar kurināmo ievadīto enerģiju un lietderīgi iegūto siltumenerģiju. Pēc katra testa pelni tika savākti, marķēti un saglabāti turpmākai ķīmiskā sastāva un kristālisko fāžu analīzei. ISA stenda principiāla shēma redzama 2.2. attēlā.



2.2. attēls. Izmantotā granulu paraugu degšanas izpētes stenda principiālā shēma.

CSA sadedzināšanas testi veikti Ādažu katlumājā, izmantojot *KAPAK2000N* katlu, nominālā siltuma jauda – 2 MW. Testēti iepriekš sagatavotie šķeldas paraugi un šķeldas maisījumi, kuriem pirms sadedzināšanas veikta kvalitātes analīze. Visi paraugi dedzināti, izmantojot katla noklusējuma iestatījumus, lai novērtētu kurināmā uzvedību praktiski ekspluatējamā katlā, nevis laboratoriski optimizētā režīmā. Eksperimenta laikā katla automātiskā padeves ķēde no uzglabāšanas bunkura tika ierobežota, un sagatavotie paraugi tika padoti uz padeves piltuvi kontrolētā veidā. Maisījumi tika sagatavoti noteiktās proporcijās pirms testa, bet, ja sagatavotais daudzums nebija pietiekams pilnam testa ciklam, papildu apjoms tika sagatavots testa laikā. Katla darbības režīms tika uzraudzīts pēc vadības sistēmā pieejamajiem datiem, tostarp katla jaudas, krāsns temperatūras, gaisa padeves un kurināmā padeves informācijas. E_{CSA} aprēķināta pēc netiešās jeb apgrieztās bilances metodes atbilstoši LVS EN 303-5:2021. Aprēķinā ņemti vērā siltuma zudumi ar sadegšanas produktu sajūtam siltumu (q_A), zudumi nepilnīgas oksidācijas dēļ (q_U), zudumi starojuma, konvekcijas un vadīšanas procesā (q_S) un zudumi nesadeģušās kurināmās vielas atlikumā pelnos (q_B). Netiešā metode izvēlēta tādēļ, ka praktiski ekspluatējamā 2 MW katlā ar pieejamo mērījumu klāstu tiešās bilances metode nebija piemērojama. CSA katls atbilst vidējās jaudas cietā kurināmā sadedzināšanas iekārtai, tādēļ rezultātu interpretācijā emisiju vērtības tālāk salīdzinātas ar MK noteikumu Nr. 17 prasībām. Pēc CSA testiem savāktajiem pelniem noteikts ķīmiskais sastāvs, lai novērtētu pelnu plūsmas īpašības un potenciālos apsaimniekošanas virzienus. CSA ietvaros veikta pētījuma daļas principiālā shēma redzama 2.3. attēlā.



2.3. attēls. CSA eksperimentālās sistēmas shēma.

2.5. Pelnu ķīmiskā sastāva un struktūras analīze

Pelnu ķīmiskā sastāva un struktūras analīze veikta, lai novērtētu pēc sadedzināšanas iegūto pelnu īpašības, iespējamos ekspluatācijas riskus un turpmākās izmantošanas virzienus. Pelnu oksīdu sastāvs izmantots trīskomponentu sastāva diagrammu jeb Vasileva diagrammu veidošanai. Šāda pieeja ļauj klasificēt pelnus pēc dominējošā oksīdu kompleksa un sākotnēji izvērtēt to iespējamo lietojumu cementa ražošanā, stikla-keramikas materiālos vai agronomiskā atkārtotā izmantošanā, kā arī norādīt iespējamu sakušņu veidošanās risku sadedzināšanas procesā.

Pelnu ķīmiskā sastāva noteikšanai izmantota optiskās emisijas spektrometrija ar induktīvi saistītu plazmu (angļu val. *Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry, ICP-OES*). *ICP-OES* analīze veikta gan ISA granulu pelnu paraugiem, gan CSA šķeldas maisījumu pelnu paraugiem, jo abu pētījuma daļu rezultātu interpretācijai bija nepieciešams salīdzināms oksīdu sastāva raksturojums. Analīze veikta ar *Thermo Scientific iCAP 7400 ICP-OES* iekārtu. Pirms mērījumiem pelnu paraugi sašķīdināti slēgtos traukos, izmantojot *MARS 6* mikroviļņu sašķīdinātāju ar *EasyPrep* teflona traukiem. Silikātus saturošu pelnu pilnīgākai sašķīdināšanai izmantots slāpekļskābes un fluorūdeņraža maisījums ar ūdeņraža pārskābi, pēc sašķīdināšanas šķīdumi apstrādāti ar borskābi, lai saistītu atlikušos fluorīdus. Mērījumu kvalitātes kontrolei izmantoti akli reagentu paraugi, kalibrēšanas pārbaudes šķīdumi un paralēlie sašķīdināšanas paraugi.

Granulu pelnu kristālisko fāžu noteikšanai papildus veikta rentgendifrakcijas (angļu val. *X-ray diffraction, XRD*) analīze ar *Bruker D8 Advance* difraktometru Bragga-Brentano atstarošanas ģeometrijā. *XRD* analīze izmantota tikai ISA granulu pelnu paraugiem, jo granulu pētījuma daļā pelnu īpašības tika vērtētas padziļināti saistībā ar atšķirīgu alternatīvās biomasas sastāvu, sadedzināšanu mazas jaudas katlā un iespējamo pelnu tālāku izmantošanu. CSA pelnu daļā galvenais uzdevums bija noteikt oksīdu sastāvu un salīdzināt šķeldas maisījumu pelnu ķīmisko profilu, tādēļ šai pētījuma daļai *XRD* analīze netika piemērota. Pirms *XRD* analīzes

pelni tika smalki samalti un ievietoti parauga turētājā viendabīgā slānī. Mērījumi veikti 10–80° 20 diapazonā. Kristālisko fāžu identificēšanai izmantota Atvērtā kristalogrāfijas datubāze, puskvantitatīvā fāžu analīze veikta ar Rietvelda precizēšanu *Profex v5.5.2* vidē, izmantojot *BGMN* algoritmu.

2.6. Regresijas analīze

Regresijas analīze promocijas darba izstrādes gaitā tika izmantota, lai noteiktu sakarības starp kurināmā kvalitāti raksturojošiem neatkarīgajiem mainīgajiem un sadedzināšanas testos iegūtajiem atkarīgajiem mainīgajiem. Šī pieeja ļāva identificēt parametrus, kas visbūtiskāk skaidro emisiju un katla efektivitātes izmaiņas, kā arī izveidot empīriskus prognozēšanas modeļus pētīto kurināmā paraugu salīdzināšanai. Analīzē izmantota vienkāršā un daudzfaktoru lineārā regresija. Vienkāršā lineārā regresija lietota gadījumos, kad atkarīgā mainīgā izmaiņas pietiekami raksturoja viens dominējošs faktors, savukārt daudzfaktoru regresija tika izmantota, ja rezultātu vienlaikus ietekmēja vairāki kurināmā kvalitātes parametri. Modeļu kvalitāte tika novērtēta ar determinācijas koeficientu, kas raksturo, cik lielu atkarīgā mainīgā izklādes daļu izskaidro regresijas modelī iekļautie neatkarīgie mainīgie. Regresijas analīze tika veikta ar *Microsoft Office Excel 365* un *Statgraphics Centurion 19*. *Microsoft Office Excel 365* tika izmantots sākotnējai datu apstrādei un rezultātu apkopošanai, *Statgraphics Centurion 19* – korelāciju izvērtēšanai, daudzfaktoru regresijas modeļu veidošanai un nozīmīgāko mainīgo atlasei. Daudzfaktoru regresijā izmantota pakāpeniskā mainīgo atlase, saglabājot modelī tos kurināmā kvalitātes parametrus, kuriem bija būtiskākā ietekme uz atkarīgo mainīgo. Analīzē pieņemts, ka starp atkarīgo un neatkarīgajiem mainīgajiem pastāv lineāra sakarība, novērojumi ir savstarpēji neatkarīgi un starp neatkarīgajiem mainīgajiem nav izteiktas savstarpējas korelācijas.

2.7. Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas analīze

Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas analīze (angļu val. *Multiple-Criteria Decision Analysis, MCDA*) promocijas darbā izmantota ISA ietvaros pētīto granulu tehniski sociālajam novērtējumam. Pieeja netika piemērota CSA šķeldas maisījumiem, jo *MCDA* matrica tika veidota tieši granulu salīdzināšanai mazas jaudas apkures katla kontekstā, kur būtiska ir ne tikai kurināmā kvalitāte un sadedzināšanas rezultāti, bet arī lietotāja gatavība pieņemt alternatīvu kurināmo un pielāgot degšanas procesu. Alternatīvās biomasas granulu izvēle nav viennozīmīgs tehnisks uzdevums – granula ar augstāku siltumspēju ne vienmēr ir piemērotākā, ja tai vienlaikus ir paaugstinātas emisijas, zemāka mehāniskā noturība, sarežģītāka izejvielas iegūšana vai lielāks pielāgošanas slogs lietotājam. Tādēļ *MCDA* tika izvēlēta kā metode, kas ļauj vienā lēmumu matricā apvienot atšķirīgas mērvienības, ietekmes virziena un praktiskās nozīmes kritērijus.

Kritēriju atlase veikta, balstoties divos principos: kritērijam jābūt saistītam ar granulu praktisko izmantošanu ISA katlā; tam jābūt nosakāmam ar promocijas darbā iegūtajiem datiem vai respondentu vērtējumu. Eksperimentāli iegūtie dati (tehniskie) veido kvantitatīvo kritēriju kopu, kurā iekļauti kurināmā kvalitātes un sadedzināšanas rādītāji. Savukārt kvalitatīvo kritēriju kopu (sociālie) veido socioekonomiskie un sociotehniskie kritēriji. Kvalitatīvo kritēriju vērtības

un kritēriju svāri iegūti *Google Forms* aptaujā, kurā piedalījās 11 respondenti vecuma grupā no 20 līdz 60 gadiem. Kvalitatīvie kritēriji (izņemot “Enerģijas blīvums”) novērtēti trīs līmeņu skalā, kur “1” nozīmē labvēlīgāko, “2” – vidējo, “3” – nelabvēlīgāko vērtējumu attiecīgā kritērija kontekstā. Kritēriji apkopoti 2.4. tabulā.

2.4. tabula

MCDA matricā iekļautie kritēriji

Kritēriju grupa	Kritēriju apakšgrupa	Kritērijs	Apzīmējums	Pozitīvs (+) / negatīvs (–)
Tehniskie	Biomazas kvalitāte	Q_z^d	K1	+
		AC	K2	–
		DU	K3	+
		AMP	K4	+
	Sadegšanas parametri	CO	K5	–
		NO_x	K6	–
		PM	K7	–
		E_{ISA}	K8	+
Sociālie	Socio-ekonomiskie	Enerģijas blīvums (enerģijas daudzums uz tilpuma vai masas vienību, ietekmē transporta izmaksas)	K9	+
		Izejvielu īpatnējās izmaksas (cena par izejvielu vienību, kas ietekmē ražošanas ekonomiku)	K10	–
		Ražošanas izmaksas (kopējās izmaksas granulu izgatavošanai un esošo tehnoloģiju pielāgošanās spēja)	K11	–
	Sociotehniskie	Resursa pieejamība (vai izejvielas ir viegli un stabili pieejamas)	K12	–
		Resursa iegūšanas sarežģītība (cik grūti iegūt un apstrādāt izejvielu)	K13	–
		Sabiedrības pieņemamība (vai lietotājs ir gatavs izmantot šīs granulas)	K14	–
		Gatavība pielāgot degšanas procesu (vai lietotājs gatavs mainīt katla iestatījumus vai konstrukciju granulu dēļ)	K15	–

Kritēriju svāru noteikšanai izmantota analītiskās hierarhijas procesa (angļu val. *Analytic Hierarchy Process, AHP*) pieeja, jo tā ļauj respondentu vērtējumu pārvērst kvantitatīvos svāros. Svērto summu metode (angļu val. *Weighted Sum Model, WSM*) kombinācijā ar *AHP* izmantota kā pamatpieeja, jo tā sniedz pārskatāmu kompromisa vērtējumu un ļauj tieši izsekot, kā kritēriju svāri ietekmē alternatīvu kopējo rezultātu. Savukārt *MULTIMOORA* kombinācijā ar *AHP* izmantota kā pārbaudes pieeja, jo tā salīdzina alternatīvas attiecību sistēmā, atsaucies punkta pieejā un pilnajā multiplikatīvajā formā. Tas ļauj pārbaudīt, vai augsts rangs ir stabils, vai arī tas veidojas tikai tāpēc, ka vāji rādītāji vienā kritēriju grupā tiek kompensēti ar labākiem rādītājiem citā.

2.8. Aprites cikla analīze

Aprites cikla novērtējums (angļu val. *Life Cycle Assessment, LCA*) promocijas darbā izmantots, lai noteiktu ISA ietvaros pētīto granulu paraugu ietekmi uz vidi visā to sagatavošanas, ražošanas un izmantošanas ķēdē. *LCA* pieeja pārbaudīta tieši granulu paraugiem, jo šai pētījuma daļai tika veidota pilna un savstarpēji salīdzināma kurināmā ražošanas ķēde – no izejvielu savākšanas un transportēšanas līdz mehāniskai sagatavošanai, granulēšanai, sadedzināšanai un pelnu plūsmas iekļaušanai modelī. *CSA* šķeldas maisījumi promocijas darbā vērtēti kā praktisks sadedzināšanas gadījums centralizētās siltumapgādes katlā, kur galvenais uzdevums bija noteikt maisījumu ietekmi uz katla darbību, emisijām un atbilstību normatīvajām robežvērtībām. Tādēļ *LCA* metodoloģija šajā darbā attiecināta uz ISA granulu paraugiem, kuriem bija iespējams konsekventi definēt funkcionālo vienību, sistēmas robežas un visus ražošanas un izmantošanas posmus.

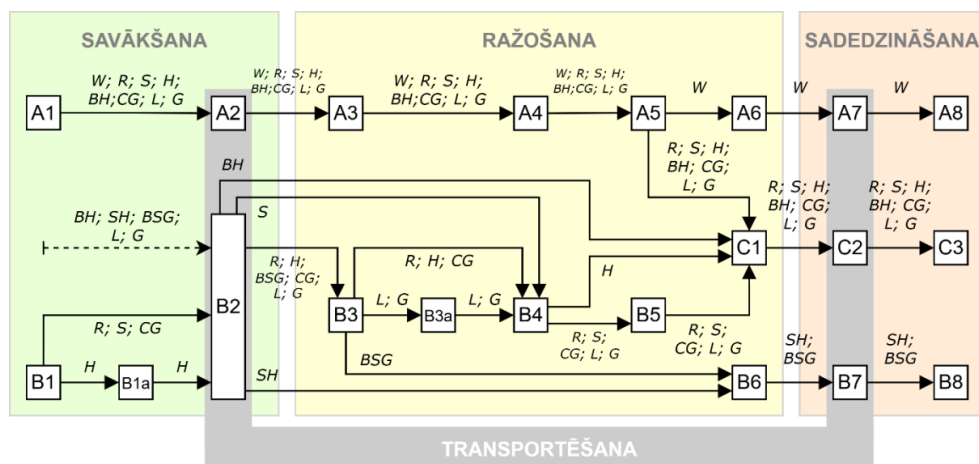
Novērtējums veikts atbilstoši *ISO 14040* un *ISO 14044 LCA* ietvaram, kas paredz mērķa un tvēruma definēšanu, inventarizācijas izveidi, ietekmes novērtējumu un rezultātu interpretāciju. Funkcionālā vienība noteikta kā 1 MWh siltumenerģijas, kas iegūta granulu sadedzināšanas rezultātā. Šāda funkcionālā vienība izvēlēta tādēļ, ka granulu salīdzinājums enerģētikas kontekstā ir pamatotāks pēc saražotās siltumenerģijas, nevis pēc masas, jo pētītajiem paraugiem atšķiras zemākais sadegšanas siltums, mitruma saturs un katla efektivitāte. Sistēmas robežas definētas kā “no šūpuļa līdz kapam”, ietverot izejvielu savākšanu, transportēšanu uz ražotni, mehānisko sagatavošanu, žāvēšanu, malšanu, granulēšanu, granulu transportēšanu līdz patērētājam un sadedzināšanu ISA katlā. Procesi strukturēti ar “A”, “B” un “C” apzīmējumiem: “A” procesi raksturo koksnes plūsmu, “B” procesi – alternatīvās biomasas plūsmu, “C” procesi – koksnes un alternatīvās biomasas maisījuma granulu ražošanu un izmantošanu. Procesi apzīmējumi un to nozīme apkopoti 2.5. tabulā. 2.4. attēlā parādīts, kā koksnes, alternatīvās biomasas un maisījuma granulu procesi savstarpēji savienojas vienotā “no šūpuļa līdz kapam” sistēmas robežā.

2.5. tabula

Granulu aprites cikla sadalījums posmos un procesos

Aprites cikla posms	Koksnes plūsma (A)	Alternatīvās biomasas plūsma (B)	Koksnes un alternatīvās biomasas maisījuma plūsma (C)
Savākšanas posms	Apaļkoksnis savākšana (ietver augšanas fāzi) (A1)	Biomasas savākšana (B1) Kaņepju primārā sasmalcināšana (B1a)	
	Koksnes transportēšana uz ražotni (A2)	Biomasas transportēšana uz ražotni (B2)	
Ražošanas posms	Koksnes šķeldošana (A3)	Biomasas žāvēšana (B3) Lapu un zāles sijāšana (B3a)	
	Koksnes žāvēšana (A4)	Biomasas sasmalcināšana (B4)	
	Koksnes malšana (A5)	Biomasas malšana (B5)	

	Koksnes granulu ražošana (A6)	Biomases granulu ražošana (B6)	Koksnes un biomasas granulu ražošana (C1)
Sadedzināšanas posms	Koksnes granulu transportēšana uz izplatītāju un patērētāju (A7)	Biomases granulu transportēšana uz izplatītāju un patērētāju (B7)	Koksnes un biomasas granulu transportēšana uz izplatītāju un patērētāju (C2)
	Koksnes granulu sadeģšana (A8)	Biomases granulu sadeģšana (B8)	Koksnes un biomasas granulu sadeģšana (C3)



2.4. attēls. Pērito biomasas granulu veidu ražošanas ķēžu procesu un sistēmas robežu plūsmas shēma (apzīmējumu. atšifrējumi – 2.1. un 2.5. tab.).

LCA inventarizācija balstīta promocijas darba izstrādes gaitā iegūtajos laboratorijas un eksperimentālajos datos. Aprēķinos izmantoti dati par izejvielu masu, mitruma saturu, elektroenerģijas un siltumenerģijas patēriņu sagatavošanas un granulēšanas procesos, transportēšanas attālumiem, granulu kvalitāti, katla efektivitāti, dūmgāzu emisijām un pelnu daudzumu. Tādējādi *LCA* modelis nav balstīts tikai literatūras pieņēmumos, bet pēc iespējas piesaistīts konkrētajiem promocijas darbā sagatavotajiem un testētajiem granulu paraugiem. Gadījumos, kad fona procesu tiešie dati nebija pieejami, izmantoti *Ecoinvent 3* datubāzēs pieejamie atbilstošie procesi, saglabājot vienādu modelēšanas pieeju visiem paraugiem.

LCA aprēķini veikti *SimaPro 10.2* programmatūras vidē, izmantojot *ReCiPe 2016 Endpoint (H) V1.09 / World (2010) H/A* metodi. Rezultāti izteikti ekopunktos (Pt), kur lielāka vērtība liecina par lielāku kopējo ietekmi uz vidi. *ReCiPe Endpoint* pieeja ļauj apvienot ietekmi uz cilvēku veselību, ekosistēmu kvalitāti un resursu pieejamību vienā salīdzināmā rādītājā, kas ir piemērots alternatīvu salīdzināšanai lēmumu pieņemšanas līmenī. Rezultātu interpretācijā *LCA* posmi grupēti trīs daļās – savākšana, ražošana un sadedzināšana. Šāds sadalījums ļauj noteikt, vai parauga kopējo ietekmi vairāk nosaka izejvielu iegūšana un transportēšana, energoietilpīgi sagatavošanas un granulēšanas procesi vai emisijas sadedzināšanas laikā. Līdz ar to *LCA* promocijas darbā izmantota ne tikai kopējās vides ietekmes aprēķinam, bet arī posmu

identificēšanai, kuros alternatīvās biomasas granulu ražošanas un izmantošanas ķēdē veidojas lielākais uzlabojumu potenciāls.

2.9. Ilgtspējas novērtējums

Ilgtspējas novērtējums promocijas darbā tieši balstīts *LCA* inventarizācijas datos, izmantojot tās pašas sistēmas robežas un tos pašus granulu aprites cikla posmus: savākšanu, ražošanu, transportēšanu un sadedzināšanu. Atšķirībā no aprites cikla ietekmes novērtējuma, kur rezultāts izteikts ekopunktos un raksturo kopējo ietekmi uz vidi, ilgtspējas novērtējums koncentrēts uz vienu normatīvajā ietvarā būtisku rādītāju — īpatnējo SEG emisiju ietaupījumu, salīdzinot ar fosilo etalonu. Šāda pieeja ļauj pētīto alternatīvās biomasas granulu rezultātus interpretēt atbilstoši spēkā esošo Eiropas Savienības (ES) tiesību aktu prasībām par cietā biokurināmā SEG emisiju samazinājumu siltumenerģijas ražošanā. Promocijas darbā izmantotā pieeja papildina *RED II* metodoloģisko loģiku; darba autors izstrādājis aprēķinu secību, kurā katrs SEG emisiju samazinājuma noteikšanai nepieciešamais mainīgais pēc iespējas tiek iegūts no pētījuma datiem. Tādējādi aprēķins raksturo nevis tipisku vai normatīvi pieņemtu piegādes ķēdi, bet konkrētu laboratorijā sagatavotu un eksperimentāli pārbaudītu granulu paraugu izmantošanas scenāriju. Aprēķinā izmantoto vienādojumu apkopojums redzams 2.6. tabulā, savukārt 2.7. tabulā doti vienādojumos izmantoto saīsinājumu atšifrējumi. Šāda struktūra ļauj īpatnējās SEG emisijas vērtēt divos līmeņos. Pirmajā līmenī tiek raksturota emisiju veidošanās granulu aprites cikla posmos pirms enerģijas transformācijas, saglabājot sasaisti ar *LCA* inventarizācijas procesiem. Otrajā līmenī emisijas tiek attiecinātas pret faktiski iegūto lietderīgo siltumenerģiju, izmantojot eksperimentāli noteikto ISA katla efektivitāti. SEG emisiju ietaupījums noteikts, salīdzinot pēc enerģijas transformācijas iegūtās īpatnējās SEG emisijas ar fosilo etalonu; granulu katliem, kas uzstādīti un darbojas no 2021. gada, ir jānodrošina vismaz 70 % SEG ietaupījums, savukārt no 2026. gada – vismaz 80 % ietaupījums. *RED II* noklusējuma vērtības dažāda veida granulām promocijas darbā izmantotas salīdzinājumam.

2.6. tabula

Īpatnējo SEG emisiju un emisiju ietaupījuma aprēķina vienādojumi

Aprēķina daļa	Vienādojums	Nozīme
Savākšana	$e_{ec} = \frac{S_b \cdot B_{dd} \cdot Q_{dd} \cdot E_{dd}}{m_p \cdot Q_z^d}$	Lauka darbu vai izejvielas savākšanas īpatnējās SEG emisijas, kas attiecinātas pret granulu enerģijas saturu
Ražošana	$e_p = \frac{(\sum_{i=1}^n Q_{el,i} \cdot 3,6) \cdot (E_{el} \cdot 277,78)}{m_p \cdot Q_z^d} + \frac{(\sum_{i=1}^n Q_{h,i} \cdot 3,6) \cdot (E_h \cdot 277,78)}{m_p \cdot Q_z^d}$	Elektroenerģijas un siltumenerģijas patēriņa radītās īpatnējās SEG emisijas biomasas sagatavošanas un granulu ražošanas procesos
Transportēšana	$e_{td} = \frac{\sum_{i=1}^n W_{x,i} \cdot E_w}{m_p \cdot Q_z^d}$	Kravas apgrozījuma radītās SEG emisijas izejvielu vai granulu transportēšanas posmos
Sadedzināšana	$e_u = \frac{m_{em\ NO_x} \cdot 0,025 \cdot E_{N_2O}}{m_p \cdot Q_z^d}$	Sadedzināšanas posmā ietvertā N_2O daļa, kas aprēķināta no NO_x masas dūmgāzēs

Aprēķina daļa	Vienādojums	Nozīme
Kopējās emisijas pirms enerģijas transformācijas	$E_x = e_{ec} + e_p + e_{td} + e_u$	Granulu aprites cikla posmu īpatnējo SEG emisiju summa pirms attiecināšanas pret katla efektivitāti
Kopējās emisijas pēc enerģijas transformācijas	$EC_x = \frac{E_x}{E_{ISA_x}} / 100$	Īpatnējās SEG emisijas pēc attiecināšanas pret eksperimentāli noteikto ISA katla efektivitāti
SEG emisiju ietaupījums	$S = \frac{EC_f - EC_x}{EC_f} \cdot 100$	Emisiju ietaupījums pret fosilo etalonu; $EC_f = 80 \text{ gCO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}$

2.7. tabula

Ilgspējas novērtējuma vienādojumos izmantotie apzīmējumi un mērvienības

Apzīmējums	Atšifrējums	Mērvienība
e_{ec}	īpatnējās SEG emisijas no izejvielas savākšanas vai ieguves	$\text{gCO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}$
S_b	apstrādājamā lauka platība biomasas savākšanai	ha
B_{dd}	dīzeļdegvielas īpatnējais patēriņš lauka apstrādei	l/ha
Q_{dd}	dīzeļdegvielas siltumspēja	MJ/l
E_{dd}	dīzeļdegvielas emisiju faktors	$\text{gCO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}$
m_p	granulu masa,	kg
	kas nepieciešama funkcionālās vienības sasniegšanai	
Q_z^d	granulu zemākais sadeģšanas siltums	MJ/kg
e_p	īpatnējās SEG emisijas no apstrādes un ražošanas procesiem	$\text{gCO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}$
$Q_{el,i}$	iekārtas i elektroenerģijas patēriņš	kWh
E_{el}	elektroenerģijas emisiju faktors	tCO_2/MWh
$Q_{h,i}$	iekārtas i siltumenerģijas patēriņš	kWh
E_h	siltumenerģijas emisiju faktors	tCO_2/MWh
e_{td}	īpatnējās SEG emisijas no transportēšanas	$\text{gCO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}$
$W_{x,i}$	kravas apgrozījums transportēšanas posmā	T · km
E_w	kravas automobiļu emisiju faktors	$\text{gCO}_2/(\text{t} \cdot \text{km})$
e_u	īpatnējās SEG emisijas no kurināmā izmantošanas	$\text{gCO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}$
$m_{em \text{ NO}_x}$	NO_x masa dūmgāzēs, sadedzinot m_p	g
E_{N_2O}	N_2O emisiju faktors	$\text{gCO}_{2\text{ekv}}/\text{g}$
E_{ISA_x}	ISA katla efektivitāte x granulām	%
E_x	kopējās īpatnējās SEG emisijas pirms enerģijas transformācijas	$\text{gCO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}$
EC_x	kopējās īpatnējās SEG emisijas pēc enerģijas transformācijas	$\text{gCO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}$
EC_f	fosilā etalona vērtība siltumenerģijas ražošanai	$\text{gCO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}$
S	SEG emisiju ietaupījums	%

3. REZULTĀTU APKOPOJUMS

3.1. Eksperimentālās izpētes rezultāti

3.1.1. Paraugu kurināmā kvalitātes analīzes rezultāti

Granulu un šķeldas maisījumu kvalitātes pamatrādītāji apkopoti 3.1. tabulā. Granulu paraugiem *MC* bija 5,09–12,88 %, savukārt šķeldas maisījumiem tas bija būtiski augstāks – 17,93–52,05 %. Šī atšķirība raksturo abu kurināmā grupu sagatavošanas un izmantošanas specifiku – granulas ir presēts un iepriekš sagatavots kurināmais, savukārt šķeldas maisījumi atspoguļo CSA sistēmām raksturīgu kurināmā mitruma mainību. *AC* granulu paraugiem bija 0,72–6,51 %, šķeldas maisījumiem – 1,02–6,20 %. Zemākās *AC* vērtības noteiktas koksnes paraugiem (*W* granulām un *WC1* šķeldai), savukārt augstākās vērtības iegūtas *L* granulām un *WM3* maisījumam. Granulu gadījumā paaugstināts *AC* saistāms ar nekoksnes biomasas īpatsvaru paraugā, savukārt šķeldas maisījumiem *AC* pieaugumu ietekmē šķeldas kvalitāte un piejaukumu īpatsvars. *VM* abās kurināmā grupās bija līdzīgā diapazonā – granulām 71,8–84,4 %, šķeldas maisījumiem 73,7–83,1 %. *FC* granulām bija 13,6–25,7 %, savukārt šķeldas maisījumiem 15,9–20,1 %. Plašāks *FC* diapazons granulu grupā liecina par lielāku izmantoto izejvielu atšķirību, savukārt šķeldas grupā vērtības ir tuvākas, jo tās pamatā veido dažādas koksnes plūsmas un to maisījumi.

3.1. tabula

Granulu un šķeldas maisījumu mitruma, pelnu, gaistošo organisko savienojumu un fiksētā oglekļa saturs

Paraugs	<i>MC</i> , % no masas	<i>AC</i> , % no masas	<i>VM</i> , % no masas	<i>FC</i> , % no masas
<i>W</i>	5,09	0,72	84,4	14,9
<i>R</i>	7,05	3,73	82,7	13,6
<i>S</i>	9,39	4,22	74,4	21,4
<i>H</i>	10,55	6,00	73,6	20,4
<i>BH</i>	11,52	1,39	72,9	25,7
<i>SH</i>	9,10	3,40	76,6	20,0
<i>BSG</i>	9,70	3,96	80,3	15,7
<i>CG</i>	12,88	3,76	74,5	21,7
<i>L</i>	9,18	6,51	71,8	21,7
<i>G</i>	12,02	6,32	71,9	21,8
<i>WC1</i>	47,91	1,02	83,1	15,9
<i>WC2</i>	52,05	1,49	82,3	16,2
<i>WC3</i>	17,93	2,22	81,1	16,7
<i>WR1</i>	41,15	3,71	78,8	17,5
<i>WR2</i>	35,24	4,51	77,6	17,9
<i>WM1</i>	37,70	2,77	80,8	16,4
<i>WM2</i>	33,94	3,44	80,2	16,4
<i>WM3</i>	50,92	6,20	73,7	20,1
<i>WM4</i>	51,27	3,33	78,9	17,8

Granulu un šķeldas maisījumu elementārais sastāvs un sadegšanas siltumi apkopoti 3.2. tabulā. Granulu paraugiem *C* saturs bija 46,02–51,10 %, šķeldas maisījumiem – 50,06–53,25 %. Šķeldas grupā *C*, *H* un *O* vērtības ir savstarpēji tuvākas, kas atbilst koksnes plūsmu dominejošajam īpatsvaram šajos paraugos. Granulu grupā elementārā sastāva atšķirības ir izteiktākas, jo paraugi veidoti no dažādas izcelsmes biomasas. Īpaši izceļas *BSG* granulas, kurām noteikts augstākais *C* saturs (51,10 %) un zemākais *O* saturs (32,97 %). *N* saturs granulu paraugiem variēja plašāk nekā šķeldas paraugiem. Zemākā *N* vērtība noteikta *W* granulām (0,28 %), savukārt augstākā – *BSG* granulām (4,66 %). Augstāks *N* saturs kurināmajā var veicināt paaugstinātu NO_x veidošanos sadedzināšanas laikā. Šķeldas paraugiem un maisījumiem *N* saturs bija 1,00–2,05 %, un augstākā vērtība noteikta *WR2* paraugam. *S* saturs lielākajai daļai paraugu bija zems, izņemot *BSG* granulas, kur tas sasniedza 0,44 %. Q_z^d mitrai masai granulu paraugiem bija 16,3–18,7 MJ/kg, savukārt šķeldas maisījumiem – 7,6–14,8 MJ/kg. Šī atšķirība galvenokārt saistīta ar būtiski augstāku *MC* šķeldas grupā. Q_z^d sausai masai abām kurināmā grupām ir līdzīgs: granulām tas bija 18,3–19,9 MJ/kg, šķeldas maisījumiem – 18,0–19,3 MJ/kg.

3.2. tabula

Granulu un šķeldas maisījumu elementārais sastāvs un sadegšanas siltumi

Paraugs	CHNSO					Q_z^d , MJ/kg		Q_a^d , MJ/kg
	<i>C</i> , %	<i>H</i> , %	<i>N</i> , %	<i>S</i> , %	<i>O</i> , %	Mitrai masai	Sausai masai	
<i>W</i>	47,77	6,17	0,28	0,00	45,08	18,7	19,9	21,2
<i>R</i>	46,02	5,68	1,06	0,08	43,44	17,3	18,8	20,4
<i>S</i>	46,02	5,65	0,35	0,06	43,69	16,3	18,3	19,7
<i>H</i>	46,31	6,10	0,36	0,05	41,18	16,4	18,6	19,9
<i>BH</i>	47,40	5,69	0,64	0,07	44,82	16,8	19,3	20,5
<i>SH</i>	50,50	5,90	1,10	0,05	39,05	17,0	18,9	20,3
<i>BSG</i>	51,10	6,87	4,66	0,44	32,97	17,6	19,8	21,3
<i>CG</i>	48,08	6,20	1,15	0,11	40,71	16,4	19,2	20,6
<i>L</i>	47,41	5,87	0,86	0,08	39,28	17,0	18,9	20,2
<i>G</i>	46,04	6,06	1,86	0,11	39,62	16,3	18,9	20,3
<i>WC1</i>	53,22	5,31	1,03	0,01	40,43	8,8	19,1	20,5
<i>WC2</i>	52,21	5,32	1,21	0,01	41,25	7,6	18,6	19,9
<i>WC3</i>	52,08	5,32	1,52	0,01	41,07	14,8	18,6	19,9
<i>WR1</i>	52,47	5,51	1,60	0,01	40,41	9,6	18,1	19,4
<i>WR2</i>	53,25	5,25	2,05	0,01	39,44	10,9	18,2	19,5
<i>WM1</i>	50,59	5,20	1,66	0,01	42,54	10,4	18,2	19,5
<i>WM2</i>	52,01	5,16	1,54	0,01	41,28	11,2	18,1	19,5
<i>WM3</i>	50,06	4,72	1,47	0,01	43,74	7,6	18,0	19,3
<i>WM4</i>	52,02	5,05	1,00	0,01	41,92	8,1	19,3	20,6

Granulu un šķeldas maisījumu fizikāli mehāniskie rādītāji apkopoti 3.3. tabulā. Granulu paraugiem pelnu *AMP* bija 1020–1480 °C, šķeldas maisījumiem – 1133–1353 °C. Zemākā *AMP* vērtība noteikta *S* granulām, augstākā – *BSG* granulām. Šķeldas grupā zemākā *AMP* vērtība iegūta *WM3* maisījumam, augstākā – *WC3* paraugam. Zemākas *AMP* vērtības liecina par lielāku pelnu sakušņu veidošanās risku sadedzināšanas laikā, tādēļ šis rādītājs ir būtisks,

vērtējot kurināmā piemērotību ilgstošai izmantošanai katlā. *BD* granulu paraugiem bija 390–640 kg/m³, šķeldas maisījumiem – 109–240 kg/m³. Šāda atšķirība ir sagaidāma, jo granulas ir presēts kurināmais, savukārt šķelda – berams un nevienmērīgas frakcijas materiāls. Granulu grupā augstākais *BD* noteikts *W* granulām, zemākais – *CG* granulām. Šķeldas grupā augstākais *BD* noteikts *WC2*, zemākais – *WM2*. *BD* ir nozīmīgs praktiskā izmantošanā, jo tas ietekmē kurināmā uzglabāšanai nepieciešamo tilpumu, transportēšanu un padeves sistēmas darbību. *DU* noteikta tikai granulu paraugiem. *DU* vērtības bija 91,7–97,8 %, un visi paraugi pārsniedza promocijas darbā noteikto iekšējo robežvērtību 90 %. Augstākās *DU* vērtības iegūtas *SH*, *BH* un *W* granulām, zemākās – *CG*, *BSG* un *H* granulām. Tas parāda, ka laboratorijas mērogā bija iespējams izveidot mehāniski noturīgas alternatīvās biomasas granulas, tomēr daļa paraugu nesasniedz tirgū augstākas kvalitātes granulām raksturīgo mehāniskās izturības līmeni (saskaņā ar LVS EN ISO 17225-6:2021 B klases prasībām granulu mehāniskajai izturībai jābūt vismaz 96 %).

3.3. tabula

Granulu un šķeldas maisījumu tilpumblīvums, mehāniskā izturība un pelnu kušanas temperatūra

Paraugs	AMP, °C	BD, kg/m ³	DU, %
<i>W</i>	1295	640	96,9
<i>R</i>	1096	580	94,9
<i>S</i>	1020	520	92,9
<i>H</i>	1422	453	92,4
<i>BH</i>	1079	540	97,3
<i>SH</i>	1125	498	97,8
<i>BSG</i>	1480	570	92,1
<i>CG</i>	1102	390	91,7
<i>L</i>	1208	500	95,8
<i>G</i>	1128	520	96,0
<i>WC1</i>	1251	226	–
<i>WC2</i>	1265	240	–
<i>WC3</i>	1353	184	–
<i>WR1</i>	1198	174	–
<i>WR2</i>	1192	215	–
<i>WM1</i>	1179	133	–
<i>WM2</i>	1187	109	–
<i>WM3</i>	1133	216	–
<i>WM4</i>	1225	189	–

3.1.2. Paraugu sadedzināšanas testu rezultāti

ISA granulu un CSA šķeldas maisījumu sadedzināšanas testu rezultāti apkopoti 3.4. tabulā. E_{ISA} bija 66,3–80,4 %, augstākās vērtības iegūtas *W* un *BSG* granulām, zemākā – *SH* granulām. *W* granulas vienlaikus uzrādīja zemākās *CO*, NO_x un *PM*. *CO* ISA testos mainījās ļoti plašā diapazonā – no 52 mg/Nm³ *W* granulām līdz 29 237 mg/Nm³ *SH* granulām. Augstas *CO* vērtības iegūtas arī *S*, *G*, *L*, *CG* un *BSG* granulām. α ISA testos bija 1,6–2,1, tomēr augstas *CO* saglabājās arī tad, ja α ~2,0–2,1, piemēram, *S* un *G* granulām. Tas norāda, ka alternatīvo

granulu gadījumā nepilnīgu oksidāciju nenosaka tikai gaisa pārpalikums; būtiska nozīme ir arī kurināmā īpašībām, padevei un degšanas apstākļiem. NO_x ISA testos bija 140–948 mg/Nm³. Zemākā vērtība noteikta W granulām, augstākā – BSG granulām. BSG gadījumā augstākais NO_x līmenis sakrīt ar paaugstinātu N saturu kurināmajā, tādēļ šī parauga emisiju veidošanās ir saistāma ne tikai ar degšanas režīmu, bet arī ar elementāro sastāvu. PM ISA testos bija 21–211 mg/Nm³, zemākā vērtība – W granulām, augstākā – G granulām.

E_{CSA} bija 73,5–88,2 %, augstākā efektivitāte noteikta $WC3$ paraugam, zemākā – $WM3$ maisījumam. α CSA testos bija 1,8–2,3. Augstākās α vērtības iegūtas $WC1$ un $WC2$, savukārt zemākās – $WM2$ un $WM3$. CO CSA testos bija 288–8017 mg/Nm³. NO_x CSA testos bija 139–416 mg/Nm³. Zemākās vērtības noteiktas $WC2$ un $WM4$, augstākās – $WR2$ un $WR1$. $WR2$ gadījumā augstākais NO_x līmenis sakrīt ar augstāko N saturu šķeldas grupā. PM CSA testos bija 52–180 mg/Nm³. Zemākā PM vērtība noteikta $WC3$, augstākā – $WM3$. $WM3$ un $WM4$ vienlaikus raksturo augstas CO un PM , kas liecina par mazāk vienmērīgu degšanas procesu šiem maisījumiem. CO un PM rezultāti neparāda vienkāršu sakarību ar α : $WR1$ un $WR2$ pie α 2,1 un 1,9 iegūtas zemākās CO (288 un 301 mg/Nm³, attiecīgi), savukārt $WM3$ un $WM4$ CO sasniedza 8017 mg/Nm³ un 4541 mg/Nm³ pie α 1,8 un 2,0, attiecīgi. Tas nozīmē, ka CSA apstākļos gaisa pārpalikums nav vienīgais noteicošais faktors; būtiska ir arī šķeldas mitruma, pelnu satura un maisījuma viendabīguma ietekme uz padevi un sadegšanu uz ārdiem.

3.4. tabula

Granulu un šķeldas maisījumu sadedzināšanas testu rezultāti

Paraugs	FT , °C	E_{ISA} vai E_{CSA} , %	O_2 , %	α , bezdīm.	CO , mg/Nm ³	NO_x , mg/Nm ³	PM , mg/Nm ³
W	125	80,4	10,4	2,0	52	140	21
R	121	72,7	9,0	1,8	3421	677	143
S	109	68,0	10,8	2,1	20416	192	176
H	108	77,3	11,0	2,1	646	189	161
BH	97	78,4	10,6	2,0	4464	321	58
SH	81	66,3	9,7	1,9	29237	353	104
BSG	110	80,4	8,21	1,6	7288	948	177
CG	104	74,1	11,2	2,1	7648	525	139
L	100	70,5	10,5	2,0	9827	369	139
G	94	72,4	10,6	2,0	14750	780	211
$WC1$	128	80,9	10,4	2,3	1526	156	59
$WC2$	123	79,7	9,6	2,3	2405	139	81
$WC3$	149	88,2	9,0	2,2	2453	224	52
$WR1$	123	84,1	10,5	2,1	288	340	102
$WR2$	132	85,4	9,9	1,9	301	416	153
$WM1$	136	83,2	11,1	2,0	542	329	109
$WM2$	144	82,0	11,6	1,8	752	321	112
$WM3$	120	73,5	11,8	1,8	8017	273	180
$WM4$	122	75,7	11,8	2,0	4541	142	172

ISA testu rezultāti salīdzināti ar ekodizaina regulas (Regulu (ES) 2015/1189) prasībām, kas attiecināmas uz šādas jaudas automātiski darbināmu cietā biokurināmā katlu. Saskaņā ar

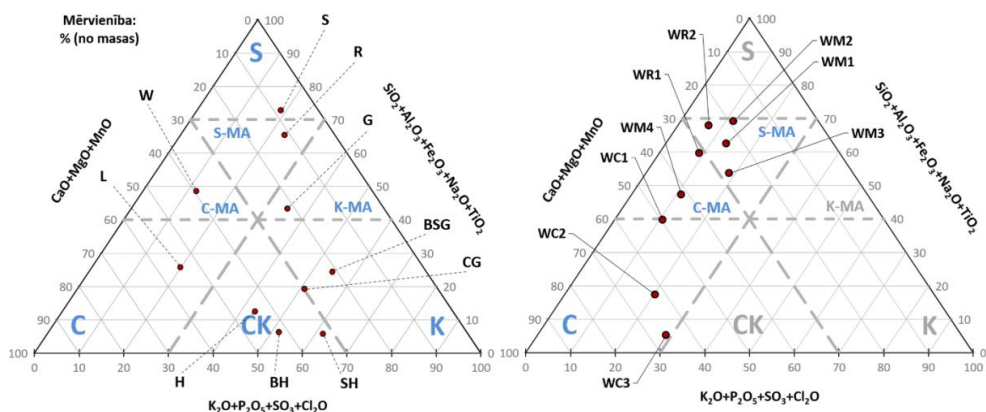
šīm prasībām katlam ar nominālo siltuma jaudu > 20 kW minimālajai E_{ISA} jābūt > 77 %, savukārt emisiju robežvērtības ir $CO < 500$ mg/Nm³, $NO_x < 200$ mg/Nm³ un $PM < 40$ mg/Nm³. Visi paraugi tika testēti vienā un tajā pašā 25 kW granulu katlā nemainīgos degšanas apstākļos, tāpēc salīdzinājums parāda nevis dažādu iekārtu atbilstību, bet konkrētā katla darbības rezultātu, izmantojot atšķirīgus granulu paraugus. Pilnu atbilstību efektivitātes un emisiju prasībām nodrošina tikai W granulas. E_{ISA} prasību izpilda arī H , BH un BSG granulas, tomēr to izmantošanu ierobežo emisiju rādītāji. NO_x robežvērtību papildus W granulām izpilda S un H granulas, bet CO un PM robežvērtības visiem alternatīvās biomasas granulu paraugiem tiek pārsniegtas.

CSA testu rezultāti salīdzināti ar MK noteikumu Nr. 17 prasībām, ņemot vērā to, ka eksperiments veikts 2 MW cietā kurināmā katlā, kas atbilst vidējas jaudas sadedzināšanas iekārtai. Līdz 2029. gada 31. decembrim esošām 1–10 MW cietā kurināmā iekārtām tiek piemērotas šādas robežvērtības: $CO < 2000$ mg/Nm³, $NO_x < 600$ mg/Nm³ un $PM < 1000$ mg/Nm³. Šajā salīdzinājumā visi testētie paraugi iekļaujas NO_x un PM robežvērtībās, savukārt CO robežvērtību pārsniedz $WC2$, $WC3$, $WM3$ un $WM4$. Tas nozīmē, ka esošo prasību kontekstā CSA testos galvenais neatbilstības rādītājs ir CO , kas raksturo nepilnīgas oksidācijas īpatsvaru konkrētajā katla darbības režīmā. Sākot no 2030. gada 1. janvāra, 1–5 MW cietā kurināmā iekārtām kļūst aktuālas stingrākas robežvērtības – $CO < 1000$ mg/Nm³, $NO_x < 650$ mg/Nm³ un $PM < 50$ mg/Nm³. Šajā prasību līmenī NO_x robežvērtību izpilda visi paraugi, CO robežvērtību izpilda $WR1$, $WR2$, $WM1$ un $WM2$, bet PM robežvērtību neizpilda neviens no testētajiem paraugiem ($WC3$ ar 52 mg/Nm³ ir vistuvāk noteiktajai robežai).

3.1.3. Pelnu analīzes rezultāti

Pelnu ķīmiskā analīze ir nepieciešama, jo pelnu turpmāka izmantošana nav pamatojama tikai ar to daudzumu vai izcelsmi. Lai pelnus varētu vērtēt kā potenciāli izmantojamu materiālu, nevis tikai kā atkritumu plūsmu, jābūt zināmam to ķīmiskajam sastāvam un iespējamajiem izmantošanas ierobežojumiem. Šāda pieeja ir būtiska arī normatīvā kontekstā, jo MK noteikumi Nr. 302 paredz kritērijus blakusproduktu statusam un atkritumu statusa piemērošanas izbeigšanai. Vasileva diagramma šajā darbā izmantota kā sākotnējs pelnu klasifikācijas instruments. Tā ļauj pēc pelnu ķīmiskā profila noteikt, vai konkrētais pelnu paraugs vairāk atbilst materiāliem, kurus potenciāli varētu vērtēt izmantošanai būvmateriālos (S domēns), kalpošanas materiālos (C domēns) vai agronomiskā virzienā (K domēns). Šī pieeja nenozīmē, ka konkrēts izmantošanas veids ir automātiski apstiprināts, bet tā ļauj pamatoti sašaurināt turpmākās pārbaudes virzienu.

Kā redzams 3.1. attēlā W , L , $WC1$, $WC2$, $WM4$ un $WR1$ pelni vērtējami kalpošanai, H , BH , SH , CG , BSG un G pelni – mēslošanai, savukārt S , R , $WR2$, $WM1$, $WM2$ un $WM3$ pelni – izmantošanai par cementa piedevu. Šāds iedalījums parāda, ka alternatīvās biomasas un šķeldas maisījumu pelni nav vienādi vērtējami kā koksnes pelni. Katram paraugam nepieciešama atsevišķa kvalitātes pārbaude, īpaši ņemot vērā piesārņojošo vielu saturu, izskalošanās risku un paredzēto izmantošanas veidu.



3.1. attēls. Granulu (kreisajā pusē) un šķeldas maisījumu (labajā pusē) pelnu klasifikācija pēc Vasileva diagrammas.

3.1.4. Regresijas analīzes rezultāti

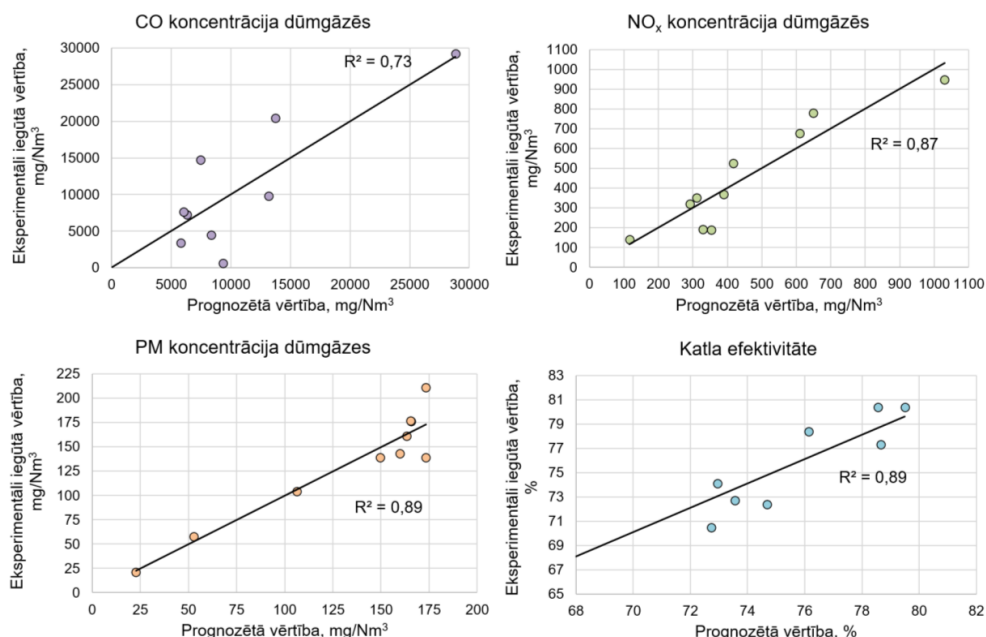
Kā rezultātu piemērs promocijas darbā iekļauta daudzfaktoru regresijas analīze, kas veikta ISA granulu paraugu datiem. Tās mērķis bija pārbaudīt, vai emisiju rādītājus un katla efektivitāti iespējams aprakstīt ar kurināmā kvalitātes un degšanas parametriem. Šāda pieeja ļauj noteikt, kuri parametri konkrētajā datu kopā visciešāk saistīti ar atkarīgo mainīgo izmaiņām, kā arī dod pamatu līdzīgu paraugu sākotnējai priekšvērtēšanai pirms pilna sadedzināšanas testa. Tālākai interpretācijai atlasīti tikai tie empīriskie modeļi, kuru determinācijas koeficients (R^2) pārsniedza 0,7. Modeļu veidošanā saglabāti tikai būtiskākie mainīgie, lai iegūtu pēc iespējas vienkāršus vienādojumus ar pietiekamu skaidrojošo spēju. Iegūtie modeļi apkopoti 3.5. tabulā. Augstākās R^2 vērtības iegūtas PM un E_{ISA} modeļiem ($R^2 = 0,89$), kā arī NO_x modelim ($R^2 = 0,87$), savukārt CO modelim atbilstība bija zemāka ($R^2 = 0,73$).

3.5. tabula

Sadedzināšanu raksturojošo mainīgo empīriskie modeļi

Atkarīgais mainīgais	Empīriskais modelis	R^2
CO	$-15802,7 + 6450,17 \cdot \alpha + 4458,88 \cdot C - 17485,48 \cdot Q_z^d + 1410,59 \cdot DU$	0,73
NO_x	$5465,43 - 662,68 \cdot \alpha + 195,27 \cdot N - 71,64 \cdot C - 1,05 \cdot BD$	0,87
PM	$1393,91 - 112,38 \cdot \alpha + 22,72 \cdot AC - 0,11 \cdot AMP - 10,58 \cdot DU$	0,89
E_{ISA}	$-197,4 + 2,24 \cdot MC + 0,024 \cdot AMP + 1,81 \cdot DU + 0,473 \cdot FT$	0,89

Modeļu pārbaude veikta, salīdzinot aprēķinātās un eksperimentāli iegūtās vērtības (3.2. att.). Iegūtie vienādojumi raksturo sakarības tikai šajā darbā pētītajā ISA granulu paraugu kopā un attiecīgajā mērījumu diapazonā. Tāpēc tie nav izmantojami kā universāli modeļi visiem biomasas granulu veidiem; plašākai lietošanai būtu nepieciešams papildu eksperimentālo datu apjoms.



3.2. attēls. Empīrisko modeļu validācija.

3.2. Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas analīzes rezultāti

MCDA veikta ISA granulu paraugiem, izmantojot kvantitatīvus kritērijus no eksperimentālās izpētes (K1–K8) un kvalitatīvus kritērijus no ekspertu un lietotāju aptaujas (K9–K15). Lēmumu matricā iekļauti 15 kritēriji (3.6. tab.). K10–K15 kritēriju vērtības iegūtas, izrēķinot vidējo aritmētisko no visu respondentu atbildēm, savukārt svāri iegūti vidējās aritmētiskās vērtības attiecinot pret kopējo kritēriju skaitu un normalizējot pret kopsummā “1”.

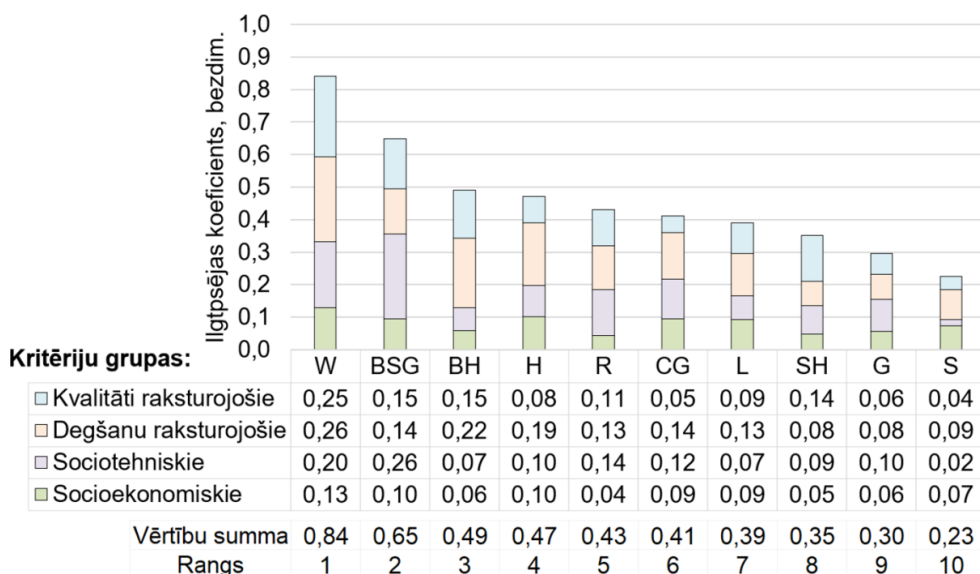
3.6. tabula

MCDA lēmumu matrica granulu tehniski-sociālajam novērtējumam

Kritērijs	Mērvienība	Svars	Alternatīva (granulu parauga veids)									
			<i>W</i>	<i>R</i>	<i>S</i>	<i>H</i>	<i>BH</i>	<i>SH</i>	<i>BSG</i>	<i>CG</i>	<i>L</i>	<i>G</i>
K1	MJ/kg	0,08	18,7	17,3	16,3	16,4	16,8	17,0	17,6	16,4	17,0	16,3
K2	%	0,07	0,72	3,73	4,22	6,00	1,39	3,40	3,96	3,76	6,51	6,32
K3	%	0,06	96,9	94,9	92,9	92,4	97,3	97,8	92,1	91,7	95,8	96,0
K4	°C	0,07	1295	1096	1020	1422	1079	1125	1480	1102	1208	1128
K5	mg/Nm ³	0,07	52	3421	20416	646	4464	29237	7288	7648	9827	14750
K6	mg/Nm ³	0,05	140	677	192	189	321	353	948	525	369	780
K7	mg/Nm ³	0,06	21	143	176	161	58	104	177	139	139	211
K8	%	0,08	80,4	72,7	68,0	77,3	78,4	66,3	80,4	74,1	70,5	72,4
K9	bezdīm.	0,06	3	1	1	2	1	1	2	2	2	1
K10	bezdīm.	0,07	2,33	2,30	1,40	2,00	1,80	2,33	2,67	1,9	1,60	1,60
K11	bezdīm.	0,07	1,50	2,00	2,30	1,78	2,22	1,89	1,25	2,00	2,30	2,44
K12	bezdīm.	0,07	1,18	1,64	2,64	2,27	2,09	2,09	1,18	1,91	2,36	1,91

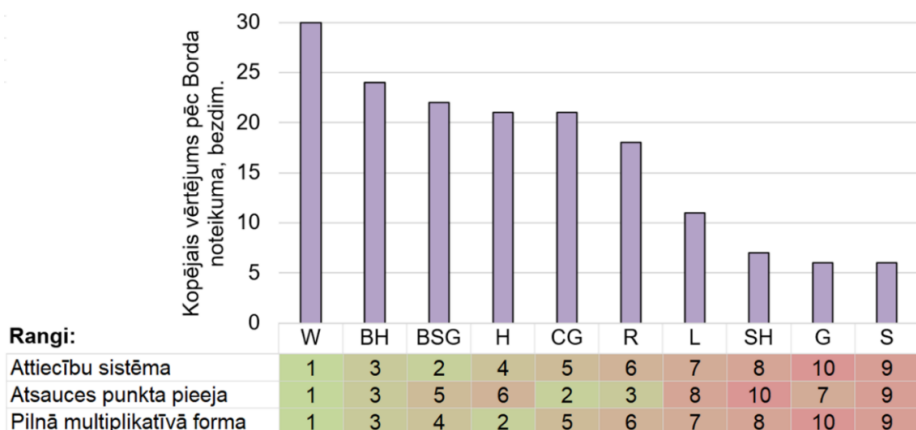
Kritērijs	Mērvienība	Svars	Alternatīva (granulu parauga veids)									
			<i>W</i>	<i>R</i>	<i>S</i>	<i>H</i>	<i>BH</i>	<i>SH</i>	<i>BSG</i>	<i>CG</i>	<i>L</i>	<i>G</i>
K13	bezdīm.	0,07	1,55	1,55	2,82	2,09	1,82	2,09	1,27	2,18	2,09	2,00
K14	bezdīm.	0,06	1,45	1,73	1,82	1,64	2,09	1,73	1,00	1,55	1,91	1,82
K15	bezdīm.	0,06	1,73	2,27	2,55	2,18	2,64	2,45	1,27	2,00	2,27	2,36

WSM-AHP rezultāti (3.3. att.) parāda, ka augstāko kopējo vērtējumu ieguva *W* granulas (0,84), tām seko *BSG* (0,65), *BH* (0,49) un *H* (0,47) granulas. *W* granulu pirmā vieta saistīta ar līdzsvarotu rezultātu visās kritēriju grupās, īpaši kvalitātes un sadedzināšanas rādītājos. *BSG* granulu 2. vietu galvenokārt nodrošina sociotehnisko kritēriju ieguldījums, savukārt *BH* un *H* granulu pozīciju vairāk ietekmē sadedzināšanas rādītāji. Vidējo grupu veido *R*, *CG* un *L* granulas, bet zemākās vērtības iegūtas *SH*, *G* un *S* granulām.



3.3. attēls. Granulu tehniski sociālā novērtējuma ar *WSM-AHP* rezultāti.

MULTIMOORA-AHP rezultāti (3.4. att.) apstiprina *W* granulu stabilu 1. vietu, jo tās ieņem augstāko pozīciju visās trīs apakšmetodēs. *BH* granulas iegūst 24 Borda punktus un visās apakšmetodēs saglabā 3. vietu, tāpēc tās vērtējamas kā stabilākā alternatīva aiz *W* granulām. *BSG*, *H* un *CG* granulas iegūst līdzīgu kopējo vērtējumu, tomēr to pozīcija mainās atkarībā no aprēķina pieejas: *BSG* augstāk tiek vērtētas attiecību sistēmā, *H* – pilnajā multiplikatīvajā formā, *CG* – atsaucēs punkta pieejā.



3.4. attēls. Granulu tehniski sociālā novērtējuma ar *MULTIMOORA-AHP* rezultāti.

Salīdzinot abas *MCDA* pieejas, redzams, ka *W* granulas abos gadījumos ir references variants. Galvenā atšķirība starp metodēm ir *BH* un *BSG* pozīciju interpretācijā. *WSM-AHP* augstāk novērtē *BSG* granulas, jo svērtās summas pieeja ļauj sociotehnisko kritēriju priekšrocībām kompensēt vājākus rezultātus citās grupās. Savukārt *MULTIMOORA-AHP* vairāk izceļ *BH* granulu stabilitāti, jo šis paraugs saglabā vienādu vietu visās apakšmetodēs. Līdz ar to *BH* granulas vērtējamas kā stabilākā alternatīvās biomasas izvēle aiz *W* granulām, savukārt *BSG*, *H* un *CG* granulas – kā perspektīvas alternatīvas noteiktu prioritāšu gadījumā. *S*, *G* un *SH* granulu zemākās pozīcijas norāda, ka to praktiskai izmantošanai nepieciešami uzlabojumi vairākās kritēriju grupās, nevis tikai atsevišķā rādītājā.

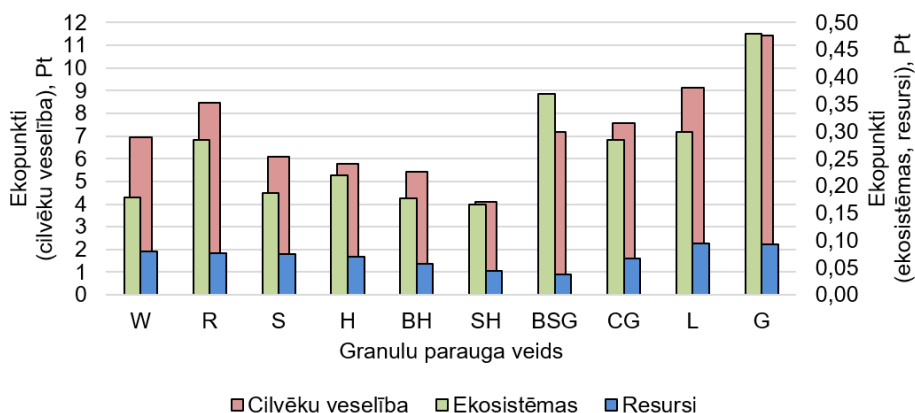
3.3. Aprites cikla ietekmes novērtējuma rezultāti

Aprites cikla ietekmes rezultāti pa procesiem apkopoti 3.7. tabulā. Savākšanas posmā lielākā ietekme noteikta *W* granulām (2,90 Pt), jo šajā posmā dominē koksnes izejvielas savākšanas process. Zemākā savākšanas posma ietekme noteikta *SH* granulām (0,29 Pt), kuru modelī šis posms galvenokārt saistīts ar alternatīvās biomasas transportēšanu uz ražotni. Ražošanas posmā lielākā ietekme noteikta *G* granulām (4,66 Pt), kam seko *L* granulas (4,11 Pt); abos gadījumos būtisku ieguldījumu veido biomasas mehāniskā sagatavošana. Zemākā ražošanas posma ietekme ir *SH* granulām (1,30 Pt). Sadedzināšanas posmā lielākā ietekme noteikta *BSG* granulām (5,22 Pt) un *G* granulām (5,04 Pt), savukārt zemākā – *W* granulām (1,21 Pt). Kopējās ietekmes griezumā zemākās vērtības iegūtas *SH*, *BH*, *H* un *S* granulām, kas uzrāda mazāku ietekmi nekā *W* granulas. Tas parāda, ka daļa alternatīvās biomasas granulu var būt konkurētspējīgas no aprites cikla ietekmes viedokļa, ja to ražošanas un sadedzināšanas posmos neveidojas būtiski papildu slodzes avoti. Savukārt augstākā kopējā ietekme noteikta *G* un *L* granulām, kur rezultātu būtiski palielina ražošanas posms, kā arī *BSG* un *G* granulām – sadedzināšanas posma ietekme.

Aprites cikla analīzes rezultāti ekopunktos (Pt)

Granulu parauga veids	Savākšanas posma procesi				Ražošanas posma procesi				Sadedzināšanas posma procesi	
	A1	B1 (+B1a)	A2	B2	A3/B4	A4/B3 (+B3a)	A5/B5	A6/B6/C1	A7/B7/C2	A8/B8/C3
<i>W</i>	2,49	-	0,41	-	1,02	0,41	0,66	1,00	0,21	1,00
<i>R</i>	1,34	0,64	0,22	0,13	0,55	0,24	0,72	0,98	0,25	3,60
<i>S</i>	1,45	0,04	0,24	0,13	0,59	0,23	0,93	0,66	0,28	1,53
<i>H</i>	1,23	0,44	0,20	0,33	0,51	0,41	0,33	0,72	0,25	1,53
<i>BH</i>	1,15	-	0,19	0,10	0,48	0,19	0,31	1,10	0,24	1,91
<i>SH</i>	-	-	-	0,29	-	-	-	1,30	0,28	2,46
<i>BSG</i>	-	-	-	0,83	-	1,15	-	0,40	0,22	5,00
<i>CG</i>	1,20	0,02	0,20	0,25	0,50	0,49	0,80	0,62	0,26	3,44
<i>L</i>	1,34	-	0,22	0,33	0,55	0,77	1,90	0,89	0,26	3,15
<i>G</i>	1,26	-	0,21	0,75	0,52	1,39	1,80	0,95	0,20	4,84

3.5. attēlā *LCA* rezultāti apkopoti *ReCiPe* aizsargājamajās jomās – cilvēku veselība, ekosistēmu kvalitāte un resursu pieejamība. *SH* granulām visās trīs jomās ir zemākā ietekme, savukārt *G* granulām – augstākā. Cilvēku veselības un ekosistēmu kvalitātes jomās starp augstākajām vērtībām ir arī *L* un *BSG* granulas, bet resursu pieejamības jomā lielāka ietekme raksturīga *L* un *G* granulām. Zemāka kopējā ietekme nav vienmērīgi sadalīta starp visām ietekmes jomām; atsevišķiem paraugiem rezultātu vairāk nosaka ražošanas posma resursu patēriņš, citiem – sadedzināšanas posma emisijas.



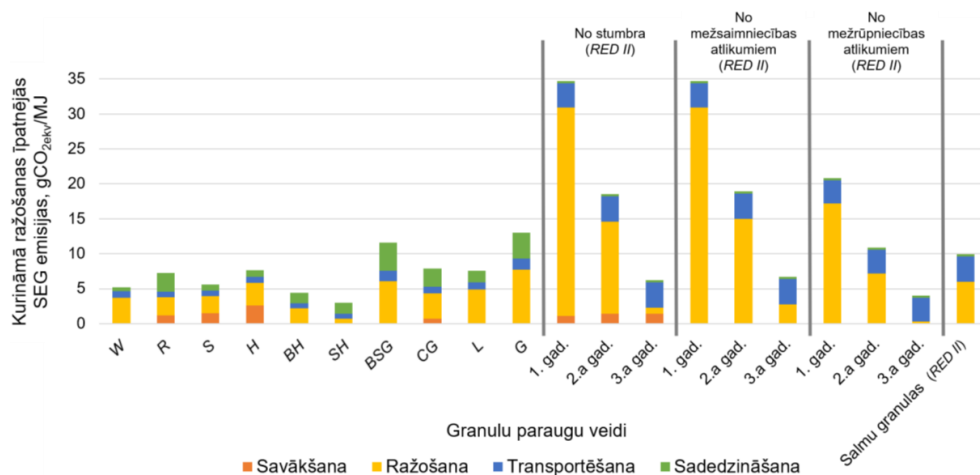
3.5. attēls. Granulu aprites cikla posmu kopējā ietekme uz cilvēku veselību, ekosistēmām un resursiem.

3.4. Ilgtspējas novērtējuma rezultāti

Ilgtspējas novērtējumā aprēķinātas pētīto granulu īpatnējās SEG emisijas un to ietaupījums salīdzinājumā ar *RED II* noteikto fosilo etalonu 80 gCO_{2ekv}/MJ. Aprēķins balstīts

promocijas darbā iegūtajos *LCA* inventarizācijas datos, sadedzināšanas testos noteiktajā ISA katla efektivitātē un autora papildinātajā *RED II* aprēķinu pieejā. Rezultāti ļauj novērtēt, vai konkrētie granulū paraugi spēj sasniegt *RED II* emisiju ietaupījuma sliekšņus siltumenerģijas ražošanā.

Īpatnējās SEG emisijas pirms enerģijas transformācijas sadalījumā pa aprites cikla posmiem pētāmām granulām parādītas 3.6. attēla kreisajā pusē. Zemākā kopējā vērtība iegūta *SH* granulām – 3,00 gCO_{2ekv}/MJ, augstākā – *G* granulām, 12,99 gCO_{2ekv}/MJ. Visos paraugos būtisku emisiju daļu veido ražošanas posms, savukārt atšķirības starp paraugiem nosaka sagatavošanas procesu enerģijas patēriņš, transportēšana un sadedzināšanas emisijas. Salīdzinājums ar *RED II* noklusējuma vērtībām (3.6. att. labajā pusē) parāda, ka augstākās īpatnējās SEG emisijas ir tiem granulū scenārijiem, kuros ražošanas siltumenerģija iegūta no dabasgāzes. Palielinoties atjaunojamo energoresursu īpatsvaram siltumenerģijas un elektroenerģijas nodrošināšanā, noklusējuma vērtības būtiski samazinās. *W* granulū rezultāts ir tuvs *RED II* vērtībai granulām no mežrūpniecības atlikumiem modernākā ražošanas scenārijā, lai gan emisiju sadalījums pa posmiem atšķiras. Līdzīga atšķirība redzama *S* granulū un *RED II* salmu granulū salīdzinājumā: promocijas darbā aprēķinātā kopējā vērtība ir zemāka, bet posmu ieguldījums nav identisks *RED II* noklusējuma sadalījumam.

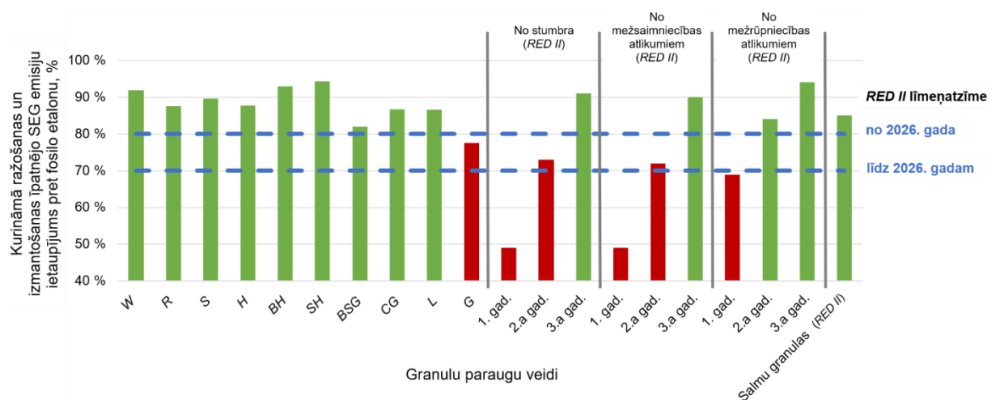


3.6. attēls. Īpatnējās SEG emisiju no granulū aprites cikla posmiem pirms enerģijas transformācijas pētāmiem un *RED II* iekļautiem granulū veidiem.

1. gad. – siltumenerģija ražota no dabasgāzes, elektroenerģija no tīkla;
2. a gad. – siltumenerģija no šķeldas katla, elektroenerģija no tīkla;
3. a gad. – siltumenerģija un elektroenerģija no koģenerācijas.

Pēc īpatnējo SEG emisiju attiecināšanas pret eksperimentāli noteikto ISA katla efektivitāti aprēķināts emisiju ietaupījums pret *RED II* fosilo etalonu. Rezultāti parādīti 3.7. attēla kreisajā pusē. *RED II* kontekstā cietajam biokurināmajam būtiska ir atbilstība SEG emisiju ietaupījuma sliekšņiem – vismaz 70 % iekārtām, kas palaistas līdz 2026. gadam, un vismaz 80 % iekārtām, kas palaistas pēc 2026. gada. No pētītajiem granulū paraugiem

vislielākais SEG emisiju ietaupījums iegūts *SH* granulām (94 %), savukārt zemākais – *G* granulām (78 %). *G* granulas pārsniedz 70 % sliekšni, bet nesasniedz 80 % sliekšni, tādēļ to izmantošana jaunās iekārtās būtu iespējama tikai tad, ja praktiskā ekspluatācijā tiktu uzlabota sadedzināšanas efektivitāte vai samazinātas ar sadedzināšanu saistītās emisijas. Visi pārējie pētītie granulū paraugi sasniedz abus *RED II* sliekšņus, kas parāda, ka alternatīvās biomasas granulas var izpildīt spēkā esošās ilgtspējas prasības siltumenerģijas ražošanai.



3.7. attēls. Īpatnējo SEG emisiju samazinājums granulām un atbilstība *RED II* sliekšņiem.

1. gad. – siltumenerģija ražota no dabasgāzes, elektroenerģija no tīkla;
2. a gad. – siltumenerģija no šķeldas katla, elektroenerģija no tīkla;
3. a gad. – siltumenerģija un elektroenerģija no koģenerācijas.

Salīdzinājums ar *RED II* noklusējuma vērtībām (3.7. att. labajā pusē) parāda, ka emisiju ietaupījums būtiski atkarīgs no ražošanā izmantotā energoresursa. Granulām, kuru ražošanā siltumenerģija iegūta no dabasgāzes, ietaupījums ir zemāks un daļa scenāriju nesasniedz 70 % vai 80 % sliekšņus. Savukārt scenārijos, kuros siltumenerģija tiek nodrošināta ar šķeldas katlu vai koģenerāciju, *RED II* noklusējuma vērtības sasniedz augstāku ietaupījumu. Tas apstiprina, ka granulū ilgtspējas rezultātu nosaka ne tikai izejvielas veids, bet arī ražošanas procesa energoapgāde un sadedzināšanas efektivitāte. Promocijas darbā iegūtie rezultāti rāda, ka, balstoties konkrētos laboratorijas un sadedzināšanas testu datus, lielākā daļa alternatīvās biomasas granulū nodrošina pietiekamu SEG emisiju ietaupījumu un tādēļ var tikt vērtētas kā ilgtspējīgs kurināmais siltumenerģijas ražošanai.

SECINĀJUMI

1. Promocijas darbā izstrādātā daudzdimensiālā metodoloģija nodrošina zinātnisku un strukturētu pieeju biomasas ilgtspējas potenciāla novērtēšanai siltumenerģijas ražošanas kontekstā, to var izmantot lēmumu pieņemšanai cietā biokurināmā aprites ciklā iesaistīto pušu ietvaros.
2. Hipotēze apstiprinājās – alternatīvās granulas neizpilda prasības attiecībā uz degšanas procesā radīto emisiju limitiem, tomēr sasniedz būtisku īpatnējo SEG emisiju ietaupījumu, ar to pierādot ilgtspējas potenciālu.
3. Granulu kvalitātes analīze un salīdzinājums ar LVS EN ISO 17225-6:2021 B klases prasībām parāda, ka pētāmo paraugu ierobežojošie rādītāji ir *BD* un *DU*. Pilnīga atbilstība visiem B klases kritērijiem sasniegta tikai *W* granulām, bet alternatīvo granulu neatbilstību galvenokārt nosaka šo divu rādītāju robežvērtību neizpilde.
4. Granulu un šķeldas sadedzināšanas rezultāti parāda, ka emisiju līmeni nosaka kurināmā īpašības un sadedzināšanas apstākļi. ISA modeļos būtiski parametri bija α , *C*, *N*, *AC*, *AMP*, *BD*, *DU* un *FT*, savukārt CSA testos emisijas bija saistītas ar *MC*, *AC*, *N* saturu un šķeldas frakciju sadalījumu.
5. Pelnu analīze parāda, ka ekspluatācijas risku nosaka ne tikai *AC*, bet arī pelnu fizikālķīmiskais raksturs. Pelnu plūsmas statusa maiņai no atkritumiem uz blakusproduktu nepieciešams pierādāms ķīmiskā sastāva un kristālisko fāžu pamatojums. Vasileva diagrammu pieeja ļauj grupēt pelnus pēc dominējošā oksīdu kompleksa un sākotnēji definēt izmantošanas virzienus.
6. *LCA* “no šūpuļa līdz kapam” tvērumā parāda, ka kopējo ietekmi galvenokārt nosaka ražošanas un sadedzināšanas posms, bet savākšanas posmu būtiski ietekmē sistēmas robežas. Zemākā kopējā ietekme noteikta *SH*, *BH* un *H* granulām (4,33 Pt, 5,67 Pt un 5,95 Pt, attiecīgi, uz 1 MWh saražotās siltumenerģijas), bet augstākā *G* granulām. Ietekmes mazināšanai prioritāri jāsamazina ražošanas enerģijas patēriņš, jānodrošina sausāks izejmateriāls un zemāks NO_x līmenis dūmgāzēs.
7. *MCDA* rezultāti rāda, ka *WSM-AHP* un *MULTIMOORA-AHP* dod saskanīgu, bet metodoloģiski atšķirīgi interpretējamu rangu. *WSM-AHP* vairāk atspoguļo kritēriju kompromisu, savukārt *MULTIMOORA-AHP* precīzāk izgaismo alternatīvas ar izteikti vājiem rādītājiem. *WSM-AHP* augstāk novērtētas *W*, *BSG* un *BH* granulas, savukārt *MULTIMOORA-AHP* – *W*, *BH* un *BSG* granulas; *BH* un *BSG* ir spēcīgākās alternatīvās biomasas alternatīvas aiz *W* granulām.
8. Ilgtspējas novērtējums parāda, ka pētītās granulas kopumā nodrošina augstu SEG emisiju ietaupījumu pret fosilo etalonu. Lielākais ietaupījums sasniegts *SH* granulām (94 %), zemākais – *G* granulām (78 %). Rezultāta jutīgumu nosaka ražošanas posma enerģijas struktūra un sadedzināšanas iekārtas efektivitāte; prioritātes ir procesa energoefektivitāte, enerģijas avotu dekarbonizācija un samazināta NO_x veidošanās.



Oskars Švedovs dzimis 1998. gadā Rīgā. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvis bakalaura grādu vides zinātnē (2020) un maģistra grādu vides inženierzinātnēs (2022). Kopš 2019. gada strādā RTU Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūtā, ieņemot zinātniskā asistenta amatu, kopš 2022. gada – pētnieka un lektora amatu.

2024. gadā akadēmiskā personāla pieredzes apmaiņas ietvaros stažējies Polijas Zinātņu akadēmijas Šķidrumu plūsmas mašīnu institūtā, pilnveidojot zināšanas degšanas procesu matemātiskajā modelēšanā un optimizācijā. Par maģistra darbu ieguvis 1. vietu AS "Latvenergo" 2022. gada studiju noslēguma darbu konkursā.

Zinātniskās intereses saistītas ar alternatīvās biomasas izmantošanu enerģētikā, biomasas kurināmā kvalitātes un sadedzināšanas izpēti, sistēmu tehnisko modelēšanu, dūmgāzu attīrīšanu, dzīves cikla novērtējumu un daudzkritēriju analīzes metožu izmantošanu ilgtspējas novērtēšanā.