

Oskars Švedovs

ILGTSPĒJĪGAS BIOMASAS POTENCIĀLS SILTUMENERĢIJAS RAŽOŠANAI

Promocijas darbs



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 darbs

Zinātniskie vadītāji:
asociētais profesors *Dr. sc. ing.*
VLADIMIRS KIRSANOVS
asociētais profesors *Dr. sc. ing.*
EDGARS VĪGANTS

Rīga 2026

SADARBĪBA

Promocijas darbs “ILGTSPĒJĪGAS BIOMASAS POTENCIĀLS SILTUMENERĢIJAS RAŽOŠANAI” izstrādāts un finansēts:

- a. Eiropas Sociālā fonda atbalstu darbības programmas “Izaugsme un nodarbinātība” 8.2.2. specifiskā atbalsta mērķa “Stiprināt augstākās izglītības institūciju akadēmisko personālu stratēģiskās specializācijas jomās” projekta Nr. 8.2.2.0/20/I/008 “Rīgas Tehniskās universitātes un Banku augstskolas doktorantu un akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās” ietvaros

NACIONĀLAIS
ATTĪSTĪBAS
PLĀNS 2020



EIROPAS SAVIENĪBA

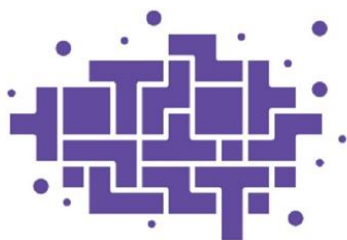
Eiropas Sociālais
fonds

I E G U L D Ī J U M S T A V Ā N Ā K O T N Ē

- b. Latvijas Zinātnes padomes atbalstu projekta Nr. LZP-2022/1-0414 “Zināšanas par alternatīvo biomasu virzībā uz enerģētisko neatkarību un klimata mērķiem (*Bioenergy Observatory*)” ietvaros



RTU
VASSI



FLPP

FUNDAMENTĀLO UN
LIETIŠKO PĒTĪJUMU
PROJEKTI

- c. Eiropas Savienības Atveseļošanas un noturības mehānisma atbalstu 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 koledžā virzībai uz izcilību augstākajā izglītībā, zinātnē un inovācijās” akadēmiskās karjeras doktorantūras grantu ietvaros (granta ID: 1126)

ANOTĀCIJA

Disertācija ir izstrādāta, ņemot vērā pieaugošo nepieciešamību paplašināt vietējo atjaunojamo energoresursu izmantošanu siltumenerģijas ražošanā, vienlaikus saglabājot kurināmā kvalitāti, zemas emisijas un pierādāmu ilgtspēju. Latvijas apstākļos biomasai ir nozīmīga loma gan individuālajā, gan centralizētajā siltumapgādē, tomēr alternatīvās biomasas izmantošanu ierobežo kvalitātes nevienmērīgums, emisiju riski, pelnu apsaimniekošanas jautājumi un nepietiekama salīdzināmība ar tradicionālajiem koksnes kurināmajiem.

Darba galvenais mērķis bija izstrādāt metodoloģiju alternatīvās biomasas ilgtspējas noteikšanai un novērtēt to potenciālu siltumenerģijas ražošanai. Darba uzdevumi bija sekojošie:

- novērtēt alternatīvās biomasas pieejamību un pamatot tās atlases kritērijus;
- izveidot alternatīvās biomasas kurināmā paraugus un noteikt to kvalitāti raksturojošos parametrus;
- noteikt pētāmo kurināmā paraugu sadedzināšanas testos iegūtos efektivitātes un emisiju rādītājus;
- definēt ilgtspējas kritērijus un veikt alternatīvo granulu komplekso novērtējumu.

Darbs sastāv no trīs nodaļām. Pirmajā nodaļā literatūras analīzes ietvaros aplūkota biomasas loma siltumenerģijas ražošanā, granulu tirgus attīstība, kurināmā kvalitātes prasības, normatīvais ietvars un ilgtspējas novērtēšanas pieejas. Otrajā nodaļā aprakstīta pētījuma metodoloģija, ietverot kurināmā kvalitātes analīzi, sadedzināšanas emisiju mērīšanas metodi, pelnu raksturošanu, regresijas analīzi, aprites cikla novērtējumu, daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas analīzi un ilgtspējas aprēķinu. Trešajā nodaļā apkopoti pētījuma rezultāti, izvērtējot alternatīvo biomasas kurināmo tehnisko piemērotību, vides ietekmi un ilgtspējas potenciālu siltumenerģijas ražošanā.

Balstoties uz pētījuma laikā iegūtajiem rezultātiem tika secināts, ka alternatīvās biomasas kurināmo izmantošanai siltumenerģijas ražošanā ir tehnisks un ilgtspējas potenciāls, tomēr to praktisko ieviešanu nosaka vairāku savstarpēji saistītu faktoru kopums. Granulu gadījumā būtiskākie ierobežojumi ir pelnu saturs, tilpumblīvums, mehāniskā izturība un emisiju kontrole individuālās siltumapgādes iekārtās. Šķeldas maisījumiem rezultātus būtiski ietekmē mitruma saturs un daļiņu izmēru sadalījums, kas atspoguļojas katla sasniegtajā jaudā un efektivitātē. Pelnu analīze parādīja, ka ekspluatācijas risku un potenciālo izmantošanas virzienu izvērtēšanai nepieciešams ņemt vērā ne tikai pelnu daudzumu, bet arī to ķīmisko un fāžu sastāvu. Aprites cikla novērtējums parādīja, ka kopējo ietekmi galvenokārt veido ražošanas un sadedzināšanas posms, bet rezultātu salīdzināmību būtiski ietekmē sistēmas robežu izvēle un funkcionālās vienības definēšana. Daudzkritēriju analīze apliecināja, ka alternatīvo kurināmo novērtēšanā nepieciešams kombinēt tehniskos, vides un sociāli tehniskos kritērijus. Ilgtspējas novērtējums parādīja, ka siltumnīcefekta gāzu emisiju samazinājumu visvairāk ietekmē ražošanas energoefektivitāte, izmantoto enerģijas avotu emisiju intensitāte un sadedzināšanas iekārtas efektivitāte.

Darbs rakstīts latviešu valodā un kopumā izklāstīts 154 lappusēs, tajā iekļauta 31 tabula un 101 attēls. Darbā izmantoti 442 literatūras avoti.

ANNOTATION

The dissertation was developed in response to the growing need to expand the use of local renewable energy resources in heat production while maintaining fuel quality, low emissions, and verifiable sustainability. In Latvia, biomass plays an important role in both residential heating sector and district heating; however, the use of alternative biomass is limited by inconsistent quality, emission risks, ash management issues, and insufficient comparability with conventional wood fuels.

The main aim of the study was to develop a methodology for determining the sustainability of alternative biomass and to assess its potential for heat production. The tasks of the study were as follows:

- to assess the availability of alternative biomass and justify its selection criteria;
- to produce alternative biomass fuel samples and determine the parameters characterizing their quality;
- to determine the efficiency and emission indicators obtained in combustion tests of the studied fuel samples;
- to define sustainability criteria and perform a comprehensive assessment of alternative pellets.

The dissertation consists of three chapters. The first chapter, based on the literature analysis, examines the role of biomass in heat production, the development of the pellet market, fuel quality requirements, the regulatory framework, and sustainability assessment approaches. The second chapter describes the research methodology, including fuel quality analysis, the method for measuring combustion emissions, ash characterization, regression analysis, life cycle assessment, multi-criteria decision analysis, and sustainability calculation. The third chapter presents the study results by assessing the technical suitability, environmental impact, and sustainability potential of alternative biomass fuels in heat production.

Based on the results obtained during the study, it was concluded that alternative biomass fuels have technical and sustainability potential for heat production; however, their practical implementation depends on several interrelated factors. For pellets, the main limitations are ash content, bulk density, mechanical durability, and emission control in residential heating systems. For wood chip mixtures, moisture content and particle size distribution affect the achieved boiler output and combustion efficiency. Ash analysis showed that operational risks and potential utilization pathways must be assessed not only by ash quantity but also by its chemical and phase composition. The life cycle assessment showed that the overall impact is mainly determined by the production and combustion stages, while result comparability depends on system boundaries and the functional unit. The multi-criteria analysis confirmed that alternative fuels should be assessed by combining technical, environmental, and socio-technical criteria. The sustainability assessment showed that greenhouse gas emission reductions are mainly affected by production energy efficiency, the emission intensity of energy sources, and combustion unit efficiency.

The dissertation is written in Latvian and consists of 154 pages; it includes 31 tables and 101 figures. The dissertation uses 442 literature sources.

PATEICĪBAS

Šīs disertācijas pamati meklējami vēl bakalaura studiju laikā, kad profesors Juris Blūms kādā no fizikas lekcijām mani iedvesmoja tiekties pēc doktora līmeņa izglītības, uzsverot, ka tieši tā ir īstā augstākā izglītība. Šie vārdi kļuva par klusu, bet noturīgu atskaites punktu turpmākajā akadēmiskajā ceļā. Bez šīs iedvesmas, lai cik plašs būtu iespējamo disertācijas tēmu loks, šis darbs, visticamāk, nebūtu tapis.

Vislielāko pateicību vēlos izteikt savam promocijas darba vadītājam Vladimiram Kirsanovam, kurš mani ir atbalstījis un vadījis no bakalaura darba tēmas izvēles līdz pat šīs disertācijas pabeigšanai. Ir grūti iedomāties citu cilvēku, kurš spētu saglabāt tik mierīgu, līdzsvarotu un gaišu skatījumu neatkarīgi no tā, cik sarežģīta vai šķietami neatrisināma situācija būtu izveidojusies. Vladimirs man iemācīja pielāgoties mainīgajai akadēmiskajai videi, būt izturīgam un mērķtiecīgam, kā arī nezaudēt spēju meklēt risinājumus brīžos, kad tie šķiet paslēpušies vistālāk.

Īpašu pateicību vēlos izteikt otrajam promocijas darba vadītājam Edgaram Vīgantam, kurš laikā, kad zinātniskajā vidē valda augsta konkurence un īpaši liela nozīme tiek piešķirta novitātei, mani saskatīja īsta zinātnieka dzirksti. Viņa atzinīgais vērtējums bakalaura darba laikā izstrādātajam un patentētajam tehnoloģiskajam risinājumam kļuva par nozīmīgu iedrošinājumu turpmākajai akadēmiskajai izaugsmei. Edgars šai dzirksteiļai ļāva pāraugt sātā un spēcīgā liesmā, kas turpmākajos gados deva spēku nozīmīgiem sasniegumiem.

Tomēr iedegtai liesmai ir nepieciešams ne tikai spēks, bet arī mērs, virziens un spēja degt ilgstoši. Šo pārvērtību manā akadēmiskajā ceļā palīdzēja īstenot profesore Dagnija Blumberga, piešķirot sākotnējai degsmei skaidru virzienu un līdzsvaru. Viņas klātbūtnē darba struktūra ieguva vienotu, saprotamu un skaidru veidolu, bet pats darba izstrādes process kļuva par nepārtrauktu pilnveides ceļu, tiecoties pēc arvien augstāka kvalitātes līmeņa. Savukārt profesors Ivars Veidenbergs sniedza nozīmīgu atbalstu teorētiskās bāzes nostiprināšanā un eksperimentālās izpētes plānošanā — tajā pamatu pamatā, uz kura balstās pārliecinošs zinātniskais darbs.

Pateicos laboratorijas kolēģiem — Vivitai Priedniecei, Tarasam Mikam, Amandai Stūrmanei, Haraldam Siktāram, Janai Černejai, Kristapam Kašam un Līgai Lagzdiņai. Mūsu komandas kopdarbs, kas balstījās uz katra dalībnieka stiprāko pušu apzināšanu, savstarpēju uzticēšanos un gatavību palīdzēt, rezultējās augstā produktivitātē, kvalitatīvos rezultātos un daudzos mirkļos, kuros zinātniskais darbs kļuva arī par kopīgu pieredzi.

SATURS

ATTĒLU SARAKSTS.....	8
TABULU SARAKSTS.....	11
DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI.....	12
IEVADS.....	16
1. Literatūras analīze.....	21
1.1. AR DEGŠANAS PROCESU SAISTĪTO PARĀDĪBU FUNDAMENTĀLĀ LOMA MŪSDIENĀS	21
1.1.1. Antropogēnā ietekme uz oglekļa aprites ciklu un siltumnīcefektu	22
1.1.2. Antropogēno apstākļu dēļ izraisītā degšana un kurināmā veidi.....	23
1.1.3. Biomasas resursi, patēriņš un alternatīvās biomasas jēdziens	25
1.1.4. Biomasai raksturīgā degšanas procesa norises posmi un radītie produkti	30
1.2. TENDENCES BIOMASAS IZMANTOŠANĀ SILTUMENERĢIJAS RAŽOŠANAI	33
1.2.1. Biomasas loma siltumapgādes sistēmās.....	33
1.2.2. Biomasas pielietojums enerģētikā un granulū loma siltumenerģijas ražošanā	37
1.2.3. Likumdošanas aspekti biomasas pielietošanā siltumenerģijas ražošanai	44
Prasības ISA un CSA izmantojamiem katliem.....	45
Biomasas izmantošanas nosacījumi un atbalsta mehānismi Latvijā	46
Zaļā iepirkuma ietekme uz siltumenerģijas transformācijas tehnoloģijas izvēli.....	48
1.2.4. Alternatīvās biomasas ilgtspēja.....	48
1.3. LITERATŪRAS ANALĪZES KOPSAVILKUMS	50
2. Metodoloģija	52
2.1. IZEJVIELU APRAKSTS UN TO VEIDOŠANAS PROCESS	52
2.1.1. Koksne (W).....	55
2.1.2. Niedres (R).....	57
2.1.3. Salmi (S)	58
2.1.4. Kaņepes (H)	59
2.1.5. Griķu čaumalas (BH)	62
2.1.6. Saulespuķu sēkļu čaumalas (SH).....	62
2.1.7. Drabiņas (BSG).....	62
2.1.8. Zeltslotiņa (CG)	65
2.1.9. Lapas (L).....	65
2.1.10. Zāle (G).....	68
2.1.11. Šķeldas maisījumi (WC, WR, WM)	70
2.2. PĒTĪJUMĀ IZMANTOTO ZINĀTNISKO METOŽU APRAKSTS.....	70
2.2.1. Bibliometriskā analīze	71
2.2.2. Materiālu plūsmas analīze.....	75
2.2.3. Biomasas kvalitātes analīze	77
Paraugu sagatavošana.....	78
Mitruma saturs.....	79
Pelnu saturs.....	80
Gaistošo organisko vielu saturs	81
Fiksētais ogleklis	82
Kurināmā elementārā analīze	82

Augstākais un zemākais sadegšanas siltums	84
Pelnu kušanas temperatūra	85
Tilpumbūvums	86
Mehāniskā izturība	87
Daļiņu izmēru sadalījums	88
2.2.4. Kurināmā sadedzināšanas testi	89
Individuālās siltumapgādes eksperimentālais stends	89
Centralizētās siltumapgādes eksperimentālais stends	96
Pelnu ķīmiskā sastāva un struktūras analīze.....	99
2.2.5. Regresijas analīze.....	104
2.2.6. Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas analīze	106
Matricas veidošana un ekspertu aptauja.....	107
WSM-AHP metode	109
MULTIMOORA-AHP metode	111
2.2.7. Aprites cikla analīze.....	113
2.2.8. Ilgtspējas novērtējums	124
2.3. METODOLOĢIJAS KOPSAVILKUMS	128
3. Rezultāti	133
3.1. BIOMASAS EKSPERIMENTĀLĀS IZPĒTES REZULTĀTI.....	133
3.1.1. Granulu paraugu izpētes rezultāti	133
Granulu paraugu kvalitātes analīzes rezultāti.....	133
Granulu paraugu sadedzināšanas testu rezultāti.....	136
Granulu paraugu eksperimentālo datu regresijas analīzes rezultāti	138
Granulu paraugu pelnu ķīmiskās un struktūras analīzes rezultāti	140
3.1.2. Šķeldas maisījumu izpētes rezultāti	143
Šķeldas maisījumu kvalitātes analīzes rezultāti	143
Šķeldas maisījumu sadedzināšanas testu rezultāti.....	145
Šķeldas maisījumu eksperimentālo datu regresijas analīzes rezultāti	147
Šķeldas maisījumu pelnu ķīmiskās un struktūras analīzes rezultāti.....	148
3.2. BIOMASAS KOMPLEKSĀS NOVĒRTĒŠANAS REZULTĀTI.....	149
3.2.1. Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas analīzes rezultāti.....	150
MCDA rezultāti pēc vienkāršās pieejas (WSM)	150
MCDA rezultāti pēc padziļinātās pieejas (MULTIMOORA)	151
3.2.2. Aprites cikla ietekmes novērtējuma rezultāti.....	153
3.2.3. Ilgtspējas novērtējuma rezultāti	157
Jūtīguma analīze	159
Salīdzinājums ar RED II noklusējuma vērtībām	163
3.3. REZULTĀTU KOPSAVILKUMS	164
Secinājumi.....	168
Literatūras saraksts	185

ATTĒLU SARAKSTS

Attēla numurs	Attēla nosaukums	Lpp.
1.1.	Vienkāršota ilustrācija oglekļa aprites cikla norisei dabā	21
1.2.	Neapsaimniekoto un aizaugušo lauksaimniecības teritoriju karte Latvijā	27
1.3.	Energoresursu patēriņš Latvijā	27
1.4.	Koksnes kurināmo un salmu patēriņš Latvijā	28
1.5.	Bioekonomikas vērtības hierarhija un biomasas izmantošanas piramīda	29
1.6.	Biomasas termokīmiskās konversijas tehnoloģiju principiālās shēmas: tiešā sadedzināšana (A), pirolīze (B) un gazifikācija (C)	31
1.7.	Energoresursu patēriņa sadalījums pēc enerģijas pielietojuma veida Latvijā	34
1.8.	Primārās enerģijas patēriņš CSS katlumājās ES starpā (augšā) un Latvijā (apakšā)	34
1.9.	CSS katlu sadalījums (A) un to saražotās siltumenerģijas īpatsvars (B) Latvijā	35
1.10.	Kurināmā patēriņš koģenerācijā Latvijā	36
1.11.	Koģenerācijas staciju sadalījums (A) un to saražotās siltumenerģijas īpatsvars (B) Latvijā	36
1.12.	CSS un koksnes kurināmā īpatsvars mājāsaimniecībās un citās nozarēs	37
1.13.	CSS un ISS īpatsvars apdzīvotās vietās Latvijā	37
1.14.	Ar biomasu enerģētikas kontekstā saistītie atslēgvārdi no zinātniskiem izdevumiem	39
1.15.	Ar biomasas tematiku saistīto publikāciju skaita pieaugums	40
1.16.	Ar biodegvielu saistīto publikāciju skaita pieaugums	41
1.17.	Ar biomasas sadedzināšanu, pirolīzi un gazifikāciju saistīto publikāciju skaita pieaugums	41
1.18.	Ar biomasas granulū sadedzināšanu, pirolīzi un gazifikāciju saistīto publikāciju skaita pieaugums	42
1.19.	Cietā kurināmā katlu sadalījums ES tirgū pa energoefektivitātes klasēm (2025. gadā)	46
1.20.	Infografika par Latvijā īstenotiem mazas jaudas granulū katlu projektu finansējuma atbalstu	47
2.1.	Pētījumā izmantotais granulators	54
2.2.	Veidoto granulū paraugs (drabiņu un kokskaudu maisījuma granulās)	55
2.3.	W materiālu plūsmas analīzes rezultāts (mērvienība: TJ/gadā)	56
2.4.	Iegādāto zāģskaidu vizuālais izskats	57
2.5.	R materiālu plūsmas analīzes rezultāts (mērvienība: TJ/gadā)	58
2.6.	Granulū ražošanai izmantots R materiāls	58
2.7.	S materiālu plūsmas analīzes rezultāts (mērvienība: TJ/gadā)	59
2.8.	H auga sastāvdaļu izmantošanas iespējas	60
2.9.	H savākšana pie IK "Obelisk Farm"	61
2.10.	H žāvēšanas process (A) un sasmalcinātā frakcija (B)	61
2.11.	BSG materiālu plūsmas analīzes rezultāts (mērvienība: TJ/gadā)	63
2.12.	BSG savākšanas process no uzņēmuma	64
2.13.	BSG ar pelējumu	64
2.14.	CG paraugi, kas savākti ziedēšanas perioda sākumā (A) un beigās (B)	65
2.15.	L materiālu plūsmas analīzes rezultāts (mērvienība: TJ/gadā)	66
2.16.	L žāvēšanas procesā	67
2.17.	L sijāšanas process un izsijātais materiāls	67
2.18.	L masā atrasto piejaukumu vizuālais izskats	68
2.19.	L pirms un pēc smalcināšanas ar MEKA smalcinātāju	68

Attēla numurs	Attēla nosaukums	Lpp.
2.20.	G žāvēšanas process	69
2.21.	G pirms un pēc malšanas	69
2.22.	BA algoritms	72
2.23.	Materiālu plūsmas analīzes veikšanas algoritms	75
2.24.	Parauga sagatavošana (1: koniskās kaudzes izveidošana, 2: parauga kvartēšana, 3: parauga kvartēšana, 4: parauga atdalīšana, 5: paraugs pēc kvartēšanas)	79
2.25.	BSG pirms (pa kreisi) un pēc (pa labi) malšanas	80
2.26.	<i>Costech ECS 4010</i> elementanalizators un to komponentes	82
2.27.	Kalibrēšanas līkne slāpeklim	83
2.28.	Kalorimetrs <i>IKA C2000</i> ar pievienotu kalorimetrisko bumbu	84
2.29.	Parauga kušanas procesa piemērs atbilstoši novērojumiem <i>Carbolite CAF DIGITAL</i> (augšā) un standartā esošai vizualizācijai (lejā)	86
2.30.	Konteiners tilpumblīvuma noteikšanai	86
2.31.	Standartam atbilstoša mehāniskās izturības noteikšanas stands	87
2.32.	Svari <i>KERN 572-57</i>	88
2.33.	Sijātājs <i>Retsch AS 400</i>	88
2.34.	Izmantotā granulu paraugu degšanas izpētes stenda principiālā shēma	90
2.35.	Izmantotā granulu katla vizuālais izskats (A), svaru displejs (B) un datu nolasīšanas programmas interfeiss no svaru displeja (C)	91
2.36.	Dūmgāzu izvadīšana atmosfērā	91
2.37.	Ar granulu katlu savienots siltumenerģijas patēriņa simulācijas stands (A) un siltuma/ūdens plūsmas skaitītājs (B)	92
2.38.	Termopāru un plūsmas mērītāju pieslēgumu punkti pie datu uztvērēja granulu katla jaudas kontrolei	93
2.39.	Spiediena devējs retinājuma kontrolei	94
2.40.	Testos izmantotais dūmgāzu analizators (A) un cieto daļiņu mērītājs (B)	95
2.41.	CSA eksperimentālās sistēmas shēma	97
2.42.	<i>KAPAK2000N</i> katls (2 MW): (A) vispārējais skats uz iekārtu un siltummaiņa kolektoriem; (B) degkameras zona ar primārās un sekundārās gaisa padeves ventilatoriem	98
2.43.	Vadības paneļa ekrāns (<i>Siemens SIMATIC HMI</i>)	98
2.44.	Kurināmā padeves sistēma: (A) lentveida padeves konveijers no bunkura; (B) piltuve ar apskates lūku un līmeņa kontroli; (C) gliemežtransportieris ar maisītāju kurināmā homogenizācijai	99
2.45.	Maisījumu sagatavošana	99
2.46.	<i>ICP-OES 7400 Thermo Fisher</i> iekārta	100
2.47.	<i>MARS 6</i> mikroviļņu sašķīdinātājs	101
2.48.	Pētījumā izmantotā difraktometra vizuālais izskats	102
2.49.	Analizējamo biomasu pelnu difraktogrammas pirms kristālisko fāžu noteikšanas	103
2.50.	Rezultātu piemērs no “ <i>Statgraphics Centurion 19</i> ”	106
2.51.	Pētīto biomasas granulu veidu ražošanas ķēžu procesu un sistēmas robežu plūsmas shēma	116
2.52.	Pētījumā iekļautie paraugi	129
2.53.	Vienkāršās un daudzfaktoru regresijas pielietojums pētījumā	131
2.54.	Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas analīzes pielietojums pētījumā	131
2.55.	Vides novērtējuma, kas sastāv no aprites cikla analīzes un ilgtspējas novērtējuma, pielietojums pētījumā	132
3.1.	Granulu sadedzināšanas emisiju salīdzinājums ar ekodizaina regulas līmeņatzīmi	137

Attēla numurs	Attēla nosaukums	Lpp.
3.2.	Pēc granulu sadedzināšanas testiem iegūto pelnu un sakušņu piemērs atsevišķiem paraugiem	138
3.3.	Empīrisko modeļu validācija	139
3.4.	Granulu pelnu paraugu pozīcijas Vasileva diagrammā	143
3.5.	Šķeldas maisījumu sadedzināšanas emisiju salīdzinājums ar MK noteikumu Nr. 17 līmeņatzīmēm	147
3.6.	Sadedzināšanas emisiju korelācija ar kurināmā kvalitātes mainīgajiem	148
3.7.	Šķeldas maisījumu pelnu paraugu pozīcijas Vasileva diagrammā	149
3.8.	Granulu tehniski-sociālā novērtējuma ar WSM-AHP rezultāti	151
3.9.	Granulu tehniski-sociālā novērtējuma ar MULTIMOORA-AHP rezultāti	153
3.10.	Savākšanas posmā iekļauto procesu kopējā ietekme uz vidi	155
3.11.	Ražošanas posmā iekļauto procesu kopējā ietekme uz vidi	155
3.12.	Sadedzināšanas posmā iekļauto procesu kopējā ietekme uz vidi	156
3.13.	Granulu aprites cikla posmu kopējā ietekme uz vidi	156
3.14.	Granulu aprites cikla posmu kopējā ietekme uz cilvēku veselību, ekosistēmām un resursiem	157
3.15.	Īpatnējās SEG emisijas no granulu aprites cikla posmiem pirms enerģijas transformācijas	158
3.16.	Īpatnējās SEG emisijas no granulu aprites cikla posmiem attiecinot pret sadedzināšanas iekārtas efektivitāti	158
3.17.	Īpatnējo SEG emisiju samazinājums, salīdzinot granulu iegūtās vērtības ar fosilo etalonu siltumenerģijas ražošanas kontekstā	159
3.18.	Elektroenerģijas CO ₂ emisiju faktora izmaiņu ietekme uz īpatnējām SEG emisijām no granulu aprites cikla posmiem	160
3.19.	Elektroenerģijas CO ₂ emisiju faktora izmaiņu ietekme uz granulu aprites cikla īpatnējo SEG emisiju samazinājumu	160
3.20.	Siltumenerģijas CO ₂ emisiju faktora izmaiņu ietekme uz īpatnējām SEG emisijām no granulu aprites cikla posmiem	161
3.21.	Siltumenerģijas CO ₂ emisiju faktora izmaiņu ietekme uz granulu aprites cikla īpatnējo SEG emisiju samazinājumu	161
3.22.	NO _x daudzuma dūmgāzēs izmaiņu ietekme uz īpatnējām SEG emisijām no granulu aprites cikla posmiem	162
3.23.	NO _x daudzuma dūmgāzēs izmaiņu ietekme uz granulu aprites cikla īpatnējo SEG emisiju samazinājumu	162
3.24.	Īpatnējās SEG emisiju no granulu aprites cikla posmiem pirms enerģijas transformācijas pētāmiem un RED II iekļautiem granulu veidiem	163
3.25.	Īpatnējo SEG emisiju samazinājums granulām un atbilstība RED II sliekšņiem	164
3.26.	Pētāmo biomasu izvietojums Van Krevelena diagrammā	165

TABULU SARAKSTS

Tabulas numurs	Tabulas nosaukums	Lpp.
2.1.	Latvijas uzņēmumi, kas audzē H vai izmanto tās rūpnieciskajā procesā	60
2.2.	Latvijā esošo pazīstamāko alus darītavu BSG apjomi un esošie izmantošanas veidi	63
2.3.	Datubāzu raksturojums inženierzinātņu jomā (reprodukcija no)	73
2.4.	TA rīku kopsavilkums (reprodukcija no)	74
2.5.	MFA rīku salīdzinājums	76
2.6.	Kurināmā eksperimentālās izpētes parametri, metodes un aprīkojums	77
2.7.	Elementanalizatora darbības specifika	83
2.8.	ISA sadedzināšanas testu ietvaros pētāmo parametru kopsavilkums	96
2.9.	Metodes parametri un paraugu ievades iestatījumi	100
2.10.	Analītiskie viļņu garumi	101
2.11.	Matricā iekļautie kritēriji	108
2.12.	Aptaujā iekļauto kritēriju vērtēšanas skala	109
2.13.	Granulu aprites cikla sadalījums posmos un procesos	115
2.14.	LCA modelī iekļaujamo elektroenerģiju patērējošo iekārtu biomasas savākšanas un apstrādes procesos elektriskā jauda	118
2.15.	Īpatnējais siltumenerģijas un elektroenerģijas patēriņš katrā procesā	121
2.16.	LCA inventarizācija	122
2.17.	Noklusētās kurināmā ražošanas un izmantošanas īpatnējo SEG emisiju vērtības koksnes granulām atkarībā no izcelsmes Latvijas kontekstā	126
3.1.	Pētāmo granulu paraugu un šķeldas maisījumu sastāvs (ar % apzīmētas proporcijas sausās masas daļām)	133
3.2.	Granulu mitruma, pelnu, gaistošo organisko vielu un fiksētā oglekļa saturs	134
3.3.	Granulu ķīmiskais sastāvs un sadegšanas siltums	134
3.4.	Granulu tilpumblīvums, mehāniskā izturība un pelnu kušanas temperatūra	135
3.5.	Granulu sadedzināšanas testu rezultāti	136
3.6.	Sadedzināšanu raksturojošo mainīgo empīriskie modeļi	138
3.7.	Granulu pelnu ķīmiskās analīzes rezultāti	140
3.8.	Granulu pelnu kristālisko fāžu analīzes rezultāti	141
3.9.	Šķeldas maisījumu mitruma, pelnu, gaistošo organisko vielu un fiksētā oglekļa saturs	144
3.10.	Šķeldas maisījumu ķīmiskais sastāvs un sadegšanas siltums	144
3.11.	Šķeldas maisījumu tilpumblīvums, frakciju sadalījums un pelnu kušanas temperatūra	145
3.12.	Šķeldas maisījumu sadedzināšanas testu rezultāti	146
3.13.	MCDA lēmumu matrica granulu tehniski-sociālajam novērtējumam	150
3.14.	MULTIMOORA-AHP rezultāti	152
3.15.	Aprites cikla analīzes rezultāti ekopunktos (Pt)	154

DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI

Saīsinājums/ apzīmējums	Atšifrojums/skaidrojums
O ₂	skābeklis
H ₂ O	ūdens/ūdens tvaiks
CO ₂	oglekļa dioksīds
OAC	oglekļa aprites cikls
SEG	siltumnīcefekta gāzes
CH ₄	metāns
N ₂ O	dislāpekļa oksīds
O ₃	ozons
AER	atjaunīgie energoresursi
CSA	centralizētā siltumapgāde
CSS	centralizētās siltumapgādes sistēma
VSA	vietējā siltumapgāde
VSS	vietējās siltumapgādes sistēma
ISA	individuālā siltumapgāde
ISS	individuālās siltumapgādes sistēma
LC	lēnais cikls
ĀC	ātrais cikls
SF ₆	sēra heksafluorīds
SO ₂	sēra dioksīds
ES	Eiropas Savienība
EK	Eiropas Komisija
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
OSP	Oficiālās statistikas portāls
CSP	Centrālā statistikas pārvalde
EPREL	Eiropas energomarkējuma produktu reģistrs
MK	Ministru kabinets
EKII	Emisijas kvotu izsolīšanas instruments
ZPI	zaļais publiskais iepirkums
RED II	Direktīva (ES) 2018/2001 par atjaunojamo energoresursu izmantošanas veicināšanu
RED III	Direktīva (ES) 2023/2413 par atjaunojamo energoresursu izmantošanas veicināšanas grozījumiem
SBP	Ilgtspējīgas biomasas programma
SURE	<i>Sustainable Resources Verification Scheme</i>
CCS	oglekļa uztveršana un uzglabāšana
CCU	oglekļa uztveršana un izmantošana
CCUS	oglekļa uztveršana, izmantošana un uzglabāšana
W	koksne
R	niedres
S (biomasa)	salmi
H (biomasa)	kaņepes
BH	griķu čaumalas
SH	saulespuķu sēklu čaumalas

Saisinājums/ apzīmējums	Atšifējums/skaidrojums
BSG	drabiņas
CG	Kanādas zeltslotiņa
L	lapas
G	zāle
WC1	šķelda no augstas kvalitātes apaļkoksnes (100 %)
WC2	šķelda no zemas kvalitātes apaļkoksnes (100 %)
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 R granulas (20 %)
WM2	šķelda no augstas kvalitātes apaļkoksnes (60 %) un R granulas (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 %)
MC	mitruma saturs
AC	pelnu saturs
VM	gaistošo organisko vielu saturs
FC	fiksētais ogleklis
CHNSO	elementārā analīze: ogleklis, ūdeņradis, slāpeklis, sērs un skābeklis
C	ogleklis
H (elements)	ūdeņradis
N	slāpeklis
S (elements)	sērs
O	skābeklis
Q_a^d	augstākais sadegšanas siltums
Q_z^d	zemākais sadegšanas siltums
AMP	pelnu kušanas temperatūra
BD	tilpumbūvums
DU	mehāniskā izturība
PSD	daļiņu izmēru sadalījums
FT	dūmgāzu temperatūra
CO	oglekļa monoksīds
NO _x	slāpekļa oksīdi
PM	cietās daļiņas
Q _{OUT}	katla saražotā siltuma jauda
E _{ISA}	ISA katla efektivitāte
E _{CSA}	CSA katla efektivitāte
α	gaisa pārpalikuma koeficients
ICP-OES	optiskās emisijas spektrometrija ar induktīvi saistītu plazmu
XRD	rentgendifrakcija
HNO ₃	slāpekļskābe
HF	fluorūdeņradis
H ₂ O ₂	ūdeņraža pārskābe
H ₃ BO ₃	borskābe

Saīsinājums/ apzīmējums	Atšifrējums/skaidrojums
CaO	kalcija oksīds
MgO	magnija oksīds
K ₂ O	kālija oksīds
P ₂ O ₅	fosfora pentoksīds
SiO ₂	silīcija dioksīds
Al ₂ O ₃	alumīnija oksīds
Fe ₂ O ₃	dzelzs oksīds
LCA	aprites cikla novērtējums
LCIA	aprites cikla ietekmes novērtējums
FU	funkcionālā vienība
Pt	ekopunkts
VIK	vidusposma ietekmes kategorija
GIK	galarezultāta ietekmes kategorija
A1	apaļkoksnes savākšana
A2	koksnes transportēšana uz ražotni
A3	koksnes šķeldošana
A4	koksnes žāvēšana
A5	koksnes malšana
A6	koksnes granulu ražošana
A7	koksnes granulu transportēšana uz izplatītāju/patērētāju
A8	koksnes granulu sadegšana
B1	biomasas savākšana
B1a	kaņepju primārā sasmalcināšana
B2	biomasas transportēšana uz ražotni
B3	biomasas žāvēšana
B3a	lapu un zāles sijāšana
B4	biomasas sasmalcināšana
B5	biomasas malšana
B6	biomasas granulu ražošana
B7	biomasas granulu transportēšana uz izplatītāju/patērētāju
B8	biomasas granulu sadegšana
C1	koksnes un alternatīvās biomasas granulu ražošana
C2	maisījuma granulu transportēšana uz izplatītāju/patērētāju
C3	maisījuma granulu sadegšana
RoW	pārējā pasaule <i>Ecoinvent</i> datubāzē
MCDA	daudzkritēriju lēmumu analīze
AHP	analītiskās hierarhijas process
WSM	svērto summu metode
MULTIMOORA	daudzmērķu optimizācija uz attiecību analīzes pamata, papildināta ar pilno multiplikatīvo formu
K1	zemākais sadegšanas siltums mitrai masai
K2	pelnu saturs
K3	mehāniskā izturība
K4	pelnu kušanas temperatūra

Saisinājums/ apzīmējums	Atšifrējums/skaidrojums
K5	CO koncentrācija dūmgāzēs
K6	NO _x koncentrācija dūmgāzēs
K7	PM koncentrācija dūmgāzēs
K8	katla efektivitāte
K9	enerģijas blīvums
K10	izejvielu īpatnējās izmaksas
K11	ražošanas izmaksas
K12	resursa pieejamība
K13	resursa iegūšanas sarežģītība
K14	sabiedrības pieņemamība
K15	gatavība pielāgot degšanas procesu
Y_i	MULTIMOORA attiecību sistēmas vērtība
R_i	MULTIMOORA atsaucē punkta pieejas vērtība
U_i	MULTIMOORA pilnās multiplikatīvās formas vērtība
B_i	Borda noteikuma vērtējums
EC_f	fosilā etalona atsaucē vērtība
EC_x	attiecīgā kurināmā īpatnējā kopējo emisiju vērtība pēc enerģijas transformācijas
E_x	attiecīgā kurināmā īpatnējā kopējo emisiju vērtība pirms enerģijas transformācijas
e_{ec}	īpatnējās emisijas no audzēšanas un/vai ieguves
e_l	īpatnējās emisijas no zemes lietojuma maiņas ietekmes
e_p	īpatnējās emisijas no apstrādes/ražošanas procesiem
e_{td}	īpatnējās emisijas no transportēšanas un realizācijas
e_u	īpatnējās emisijas no kurināmā izmantošanas
e_{sca}	īpatnējo emisiju ietaupījums no oglekļa uzkrāšanās augsnē
e_{ccs}	īpatnējo emisiju ietaupījums no CO ₂ uztveršanas un uzglabāšanas
e_{ccr}	īpatnējo emisiju ietaupījums no CO ₂ uztveršanas un aizstāšanas
S_b	apstrādājamā lauka platība biomasas savākšanai
B_{dd}	dīzeļdegvielas īpatnējais patēriņš uz lauka apstrādi
Q_{dd}	dīzeļdegvielas siltumspēja
E_{dd}	dīzeļdegvielas emisiju faktors
m_p	granulu masa, kas nepieciešama funkcionālās vienības sasniegšanai
$Q_{el,i}$	iekārtu elektroenerģijas patēriņš apstrādes un ražošanas procesā
E_{el}	elektroenerģijas emisiju faktors
$Q_{h,i}$	iekārtu siltumenerģijas patēriņš apstrādes un ražošanas procesā
E_h	siltumenerģijas emisiju faktors
$W_{x,i}$	kravas apgrozījums
E_w	kravas automobiļu emisiju faktors
$m_{em\ NO_x}$	NO _x masa dūmgāzēs
E_{N_2O}	N ₂ O emisiju faktors
KEM	Klimata un enerģētikas ministrija
CO _{2ekv}	oglekļa dioksīda ekvivalents

IEVADS

Pētījuma aktualitāte

Cietais biokurināmais saglabā nozīmīgu lomu siltumenerģijas ražošanā, vienlaikus pieaugot spiedienam samazināt fosilo kurināmo izmantošanu un paplašināt vietējo energoresursu bāzi. Pasaules bioenerģijas patēriņa dati rāda, ka 2014.–2023. gadā biomasas izmantojums 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 par to, kuras biomasas plūsmas iespējams pamatoti iekļaut enerģētikā, saglabājot resursu efektīvas izmantošanas un ilgtspējas principus. Neizmantotā biomasas potenciāla struktūrā koksne veido 74 %, bet nekoksnes biomasā veido 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 nekā koksnes kurināmajam. Tas ir īpaši nozīmīgi granulū un šķeldas sektorā, kur kvalitātes, loģistikas un sadedzināšanas priekšnosacījumi lielā mērā veidoti, balstoties uz koksnes kurināmā īpašībām. Granulū tirgus mērogs šo problēmu pastiprina. 2024. gadā globālā granulū ražošana sasniedza 48,3 milj. t, bet patēriņš pirmo reizi pārsniedza 45 milj. t. Šāds tirgus apjoms norāda, ka granulās ir kļuvušas par starptautiski tirgotu un standartizētu cieto biokurināmo. Vienlaikus granulū ražošanas izejvielu bāze pārsvarā balstās uz mežrūpniecības un koksnes apstrādes atlikumiem, kuru pieejamību ietekmē kokrūpniecības apjomi, eksporta plūsmas, kaskādveida izmantošanas princips un konkurence ar citiem produktiem. Tādēļ granulū 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, kuras 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 granulās, tika pārdotas ar ilgtspējīgas biomasas programmas sertifikātu. Līdz ar RED II un RED III 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 izvirzīti šādi uzdevumi:

- izvēlēties alternatīvās biomasas veidus izpētei 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 atkārtojamība 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

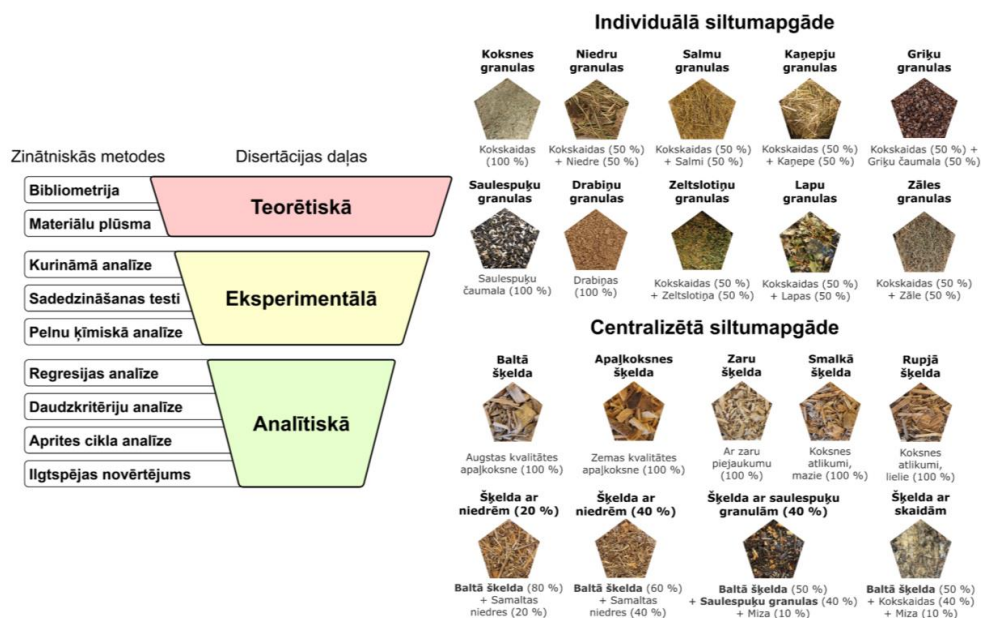
Alternatīvās biomasas kurināmā kvalitāti un degšanu raksturojošie rādītāji var neatbilst esošām prasībām attiecībā uz cietā biokurināmā izmantošanu, tomēr tāds kurināmais var būt ilgtspējas ziņā līdzvērtīgs salīdzinājumā ar koksni.

Pētījuma praktiskā nozīme

Izstrādātā metodoloģija ir pielietojama 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 ietekmju 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 lineārā struktūra, kas sastāv no trīs daļām — teorētiskās, eksperimentālās un analītiskās. Teorētiskajā daļā tiek izvēlēts pētījuma virziens pamatojoties uz bibliometrisko analīzi un pētīta darbā izvēlēto biomasu pieejamība. 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 uz eksperimentāli un aptaujas ietvaros iegūto datu pamata, 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 izvēlēto biomasas veidi (granulu paraugi individuālās siltumapgādes kontekstā un šķeldas maisījumi centralizētās siltumapgādes kontekstā) ir redzami 1. attēlā.



1. att. Darba struktūra (pa kreisi) un izveidotie biomasas paraugi (pa labi)

Pētījuma rezultātu aprobācija

- Promocijas darba pētījuma rezultāti ir prezentēti 4 starptautiskās zinātniskās konferencēs:
 - Švedovs, O., Dzikēvičs, 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., Dzikēvičs, 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 ir atspoguļoti 6 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., Kalnbalkīte, 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.**, Kārklīņa, A., Bass, D., Kirsanovs, V., Vīgants, E., Kušnere, Z., Kalnbalkīte, 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>
 3. Veicot zinātniskās, akadēmiskās un pētnieciskās aktivitātes, promocijas darba autors ir piedalījies izgudrojuma “Kompakts cieta daļiņu atdalītājs” radīšanā un ir tā galvenais

izgudrotājs (Latvijas Republikas patents Nr. 15739B; apliecība par izgudrojuma iekļaušanu Patentu reģistrā ir izsniegta 20.08.2023).

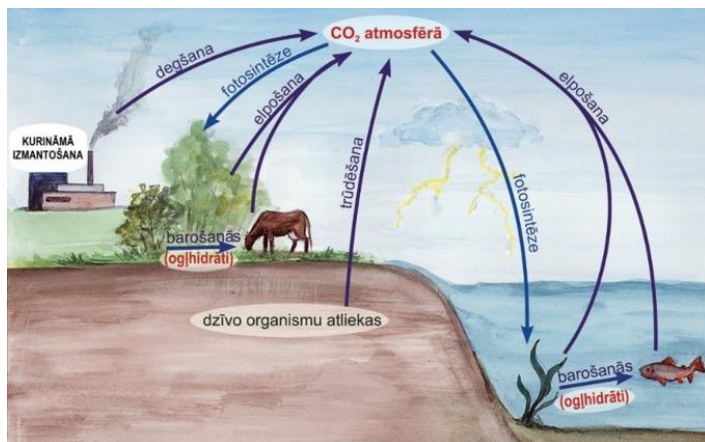
4. Promocijas darba autors ir iesaistījies citu zinātnisko publikāciju rakstīšanā:
 - **Švedovs, O.**, Dzikēvičs, M., Kirsanovs, V. un Veidenbergs, I. (2023). A New Approach to Water Treatment: Investigating the Performance of Compact Particulate Matter Collector for Use in Compact Flue Gas Condenser. *Environmental and Climate Technologies*, 27(1), 212–219. ISSN 1691-5208, e-ISSN 2255-8837. Pieejams: <https://doi.org/10.2478/rtuct-2023-0016>
 - **Švedovs, O.**, Dzikēvičs, M. un Kirsanovs, V. (2023). Bibliometric Analysis of the Alternative Biomass Types and Biomass Combustion Technologies. *Environmental and Climate Technologies*, 27(1), 559–569. ISSN 1691-5208, e-ISSN 2255-8837. Pieejams: <https://doi.org/10.2478/rtuct-2023-0041>
 - Balode, L., Zlaugotne, B., Grāvelsiņš, A., **Švedovs, O.**, Pakere, I., Kirsanovs, V. un Blumberga, D. (2023). Carbon Neutrality in Municipalities: Balancing Individual and District Heating Renewable Energy Solutions. *Sustainability*, 15(10), raksta Nr. 8415. ISSN 2071-1050. Pieejams: <https://doi.org/10.3390/su15108415>
 - Kramens, J., **Švedovs, O.**, Stūrmane, A., Vīgants, E., Kirsanovs, V. un Blumberga, D. (2024). Exploring Energy Security and Independence for Small Energy Users: A Latvian Case Study on Unleashing Stirling Engine Potential. *Sustainability*, 16(3), raksta Nr. 1224. ISSN 2071-1050. Pieejams: <https://doi.org/10.3390/su16031224>
 - **Švedovs, O.**, Dzikēvičs, M., Kirsanovs, V. un Wardach-Święcicka, I. (2024). Bibliometric Analysis of the Modelling of Low-Quality Biomass Pellets Combustion. *Environmental and Climate Technologies*, 28(1), 286–302. Pieejams: <https://doi.org/10.2478/rtuct-2024-0023>
 - **Švedovs, O.**, Rakhimova, L., Irbe, T. un Kirsanovs, V. (2026). Multivariate Regression Analysis of Bio-Oil Yield Using Literature-Derived Biomass Data. *Environmental and Climate Technologies*, 30(1), 203–215. Pieejams: <https://doi.org/10.2478/rtuct-2026-0014>

1. LITERATŪRAS ANALĪZE

Pirmajā nodaļā aplūkota biomasas izmantošana siltumenerģijas ražošanā, cietā biokurināmā un granulu tirgus attīstība, alternatīvās biomasas resursu izmantošanas priekšnosacījumi, kurināmā kvalitātes un sadedzināšanas rādītāji, emisiju un pelnu apsaimniekošanas jautājumi, kā arī normatīvais ietvars un ilgtspējas novērtēšanas pieejas, kas nepieciešamas alternatīvās biomasas granulu un šķeldas maisījumu kompleksai izvērtēšanai.

1.1. Ar degšanas procesu saistīto parādību fundamentālā loma mūsdienās

Saules sistēmas veidošanās ir sākusies pirms ~ 4,5 mljrd. gadiem ¹⁻³, iezīmējot kolosālā notikuma sākumu, ko pavada nejausu fundamentālo mijiedarbību un procesu virkne un tā rezultātā mēs eksistējam pašreizējā realitātē. Šajā [objektīvajā] realitātē process, ko sauc par kodoltermisko sintēzi ⁴ un kas notiek Saules kodola iekšienē ⁵, nodrošina mūsu planētu [Zemi] ar praktiski neizsīkstošu enerģijas avotu ⁶. Šī enerģija sasniedz Zemes atmosfēru un virsmu pateicoties siltuma starojumam (elektromagnētiskais starojums, ko rada visas vielas, kurām piemīt temperatūra $> 0\text{ K}$ ($-273,15\text{ °C}$), viļņu garuma diapazonā no $0,1\text{ }\mu\text{m}$ līdz $100\text{ }\mu\text{m}$ ⁷), kas ir viens no siltumapmaiņas veidiem ^{8,9}. Saules enerģija ir nopietnas dzīvības formu uz oglekļa bāzes (fotoautotrofo organismu ^{10,11}) daļas galvenais virzītājspēks ^{12,13}, kas fotosintēzes ^{14,15} (fotoķīmiskās reakcijas ^{16,17}) procesā piedalās organisko savienojumu (ogļhidrātu ¹⁸ (piem., celulozes ¹⁹), olbaltumvielu ²⁰ (pateicoties aminoskābēm ²¹) un taukskābju ²²) veidošanā. Šādi organiskie savienojumi, pēc būtības, ir barības vielas, kuras kalpo par enerģijas avotu visiem heterotrofajiem organismiem, kuri sava metabolisma procesā spēj tās sašķelt ²³⁻²⁶. Metabolisms ir viens no enerģijas pārveidošanas veidiem ²⁷, kas aerobās elpošanas ²⁸ gadījumā (attiecas t.sk. uz cilvēkiem ²⁹) patērē skābekli (O_2) ³⁰, kuras rezultātā izdalās siltums ³¹⁻³⁴ un ūdens tvaiks (H_2O) un oglekļa dioksīds (CO_2) ³⁵. Elpošanas process no ķīmijas viedokļa atgādina degšanas reakciju — abos gadījumos procesa nodrošināšanai tiek patērēts skābeklis, izdalās siltums un rodas tādi produkti kā H_2O un CO_2 . Fotosintēzes procesā minētie produkti pārvēršas par izejvielām, noslēdzot t. s. oglekļa aprites ciklu (OAC) (sk. 1.1. attēls att.).



1.1. attēls. Vienkāršota ilustrācija oglekļa aprites cikla norisei dabā (reprodukcija no ³⁶)

Kopējais OAC ir daļa no t. s. barības vielu cikliem jeb biogeoķīmiskiem cikliem, kuros ietilpst arī slāpekļa cikls un fosfora cikls ³⁷⁻³⁹. Šo ciklu augšējā robeža ir Zemes troposfēras–stratosfēras norobežojošais slānis, kas skaitās arī par t. s. siltumnīcefekta (angļu val. *Greenhouse effect*) robežu.

Siltumnīcefekts rodas dēļ atmosfērā esošo gāzu molekulu, kas spēj akumulēt Zemes emitēto infrasarkanā starojumu. Kaut tādu gāzu (sauc par “siltumnīcefekta gāzēm” (SEG)) molekulu īpatsvars pret kopējo tilpumu ir niecīgs, tie spēj nodrošināt labvēlīgus apstākļus (t. s. “klimatu”) augstāk tekstā minēto procesu nepārtrauktai norisināšanai. Pie dabā sastopamiem SEG galvenokārt attiecas jau pieminētie H₂O un CO₂, kā arī metāns (CH₄), dislāpekļa oksīds (N₂O), ozons (O₃) ^{40,41}.

1.1.1. Antropogēnā ietekme uz oglekļa aprites ciklu un siltumnīcefektu

Procesu ciklus, kas ietilpst kopējā OAC, iedala lēnajos un ātrajos ⁴². Lēno ciklu (LC), pēc būtības, raksturo ogleklis, kas iegults ģeoloģiskajos veidojumos un salīdzinoši ilgā laika intervālā atkal nonāk atmosfērā/biosfērā, savukārt ātro ciklu (ĀC) raksturo ogleklis, kas piedalās fotosintēzē un atkārtoti izdalās atmosfērā no organisma vai auga, kurā tas ir uzkrāts ⁴³.

Ietekmi uz OAC noritošiem procesiem var iedalīt dabīgā un antropogēnā (cilvēka izraisīts) ⁴⁴. Degšanu ierosinošie dabīgie apstākļi var iestāties, piem., temperatūras strauja lēciena vai ilgstošas paaugstinātās temperatūras iedarbības dēļ. Šādu apstākļu izraisīta degšana dabīgā veidā ietekmē OAC. Savukārt antropogēnie apstākļi var iestāties dabīgo apstākļu apdomātās vai neapdomātās ierosināšanas un kontroles rezultātā. Par vēsturiski pirmo notikumu, kad OAC tika ietekmēts antropogēnā veidā, var skaitīt seno ļaužu dabiski iekurinātā ugunsкура uzturēšanu ⁴⁵.

Mūsdienās aktuāls ir jautājums par antropogēnās ietekmes uz OAC palielinātās intensitātes pazemināšanas iespējām. Šāds jautājums iestāties, galvenokārt, dēļ identificētās ciešas korelācijas starp atmosfērā uzkrātā CO₂ koncentrāciju un Zemes virsmas vidējo temperatūru ⁴⁶. Vēsturiski pierādīts, ka šādas korelācijas dēļ izraisītās klimata pārmaiņas notika pasaulē arī agrāk, tomēr pēdējā gadsimta laikā CO₂ koncentrācijas pieaugums ir intensīvāks ⁴⁷, ko, nepārprotami, sasaista tieši ar antropogēno ietekmi ⁴⁸. Piem., neskatoties uz to, ka meža ugunsgrēks var būt ierosināts gan dabīgās, gan antropogēnās ietekmes rezultātā, tomēr statistiski pēdējo divu dekadžu laikā vairāk nekā 90 % no pasaulē piefiksētiem meža ugunsgrēkiem izraisīti antropogēno apstākļu dēļ (piem., nepietiekami atbildīga iekurinātā ugunsкура kontrole) ⁴⁹.

Par antropogēnās izcelsmes SEG tiek uzskatītas fluorētās gāzes un sēra heksafluorīds (SF₆) ^{50,51}. Neraugoties uz to zemo koncentrāciju, sākot ar 1950. gadiem tiek atzīmēts šādu SEG būtisks ietekmes kāpums uz klimata pārmaiņām ⁵². Tomēr pētnieki norādījuši, ka četras galvenās SEG, kas mūsdienās piesaista nopietnu globālu uzmanību, ir CO₂, CH₄, N₂O, kā arī sēra dioksīds (SO₂) ⁵³.

Neatkarīgi no ietekmes veida, jebkādu vielu, kas izdalās apkārtējā vidē un ietekmē to, sauc par emisijām vides zinātņu jomā. Tā augu putekšņu ceļšanos gaisā ziedēšanas perioda laikā arī sauc par emisijām, kas galvenokārt ietekmē personas ar attiecīgo alerģisko reakciju. SEG kontekstā tās, galvenokārt, ir emisijas gaisā ⁵⁴. Antropogēnās rīcības dēļ radītas emisijas ir

iespējams uzskaitīt un kontrolēt ar mērķi identificēt vājos punktus un īstenot uzlabošanas pasākumus. Mūsdienās uzņēmumos plaši pielieto starptautiski atzītu sistēmu, kas kopš 1998. gada tiek regulēta pēc “SEG protokola” (angļu val. *GHG Protocol*), kurā ietilpst vairāki standarti — primārais starp tiem ir ISO 14064-1 (angļu val. *Corporate Accounting and Reporting Standard*)⁵⁵. Standarts iedala SEG trijos “tvērumos” (angļu val. *Scopes*):

- 1. tvērums — tiešās SEG no avotiem, kurus uzņēmums kontrolē tieši;
- 2. tvērums — netiešās emisijas, kas saistītas ar enerģijas iepirkšanu un patēriņu;
- 3. tvērums — citas netiešās emisijas, kas rodas “vērtības ķēdē” (angļu val. *Value Chain*).⁵⁶

Savukārt Eiropas Savienībā (ES) kopš 2022. gada ir spēkā Direktīva 2022/2464 (angļu val. *Corporate Sustainability Reporting Directive*), kas paredz juridiski saistošu kārtību uzņēmumu vides, sociālās un pārvaldības informācijas atklāšanai. Direktīva ievieš ES ilgtspējas ziņošanas standartus, kuros SEG emisiju uzskaitē balstīta uz SEG protokola principiem. Ar direktīvu tiek paplašināts pārskatu tvērums, ietverot ne vien uzņēmuma tiešo klimata ietekmi, bet arī riskus, iespējas un pārejas pasākumus ceļā antropogēnās ietekmes uz OAC mazināšanu, tādējādi nodrošinot caurspīdīgāku un salīdzināmāku ilgtspējas informāciju ES.

1.1.2. Antropogēno apstākļu dēļ izraisītā degšana un kurināmā veidi

Antropogēno apstākļu dēļ izraisītā degšana cilvēces vēsturē spēlē nozīmīgu lomu jēdziena “tehnoloģija” rašanos un stāv vienā līmenī ar sociālās komunikācijas un akmens darbarīku izgudrošanu^{57,58}. Savukārt “tehnoloģija”, apkopojot pieejamās definīcijas⁵⁹, nozīmē noteiktu metožu un līdzekļu pielietošanu konkrētajā secībā paredzamā rezultāta sasniegšanai. Degšanas process ir daļa no plaša spektra tehnoloģijām, kuras tiek pielietotas gan ikdienišķām mājāsaimniecību vajadzībām (piem., pārtikas termiskā apstrāde, telpu apkure, ūdens uzsildīšana, pārvietošanās ar transportlīdzekļiem utt.)^{60,61}, gan astronomisko objektu (piem., planētu un zvaigžņu) detalizētai izpētei^{62,63}.

Degšanas procesa ierosināšanai un uzturēšanai, izņemot jau augstāk tekstā minēto, nepieciešams kurināmais (oglekļa avots), ko bieži sauc arī par energoresursu vai, atkarībā no veida, par energonesēju⁶⁴. Kurināmais var pastāvēt dažādos agregātstāvokļos: ciets^{65–67}, šķidr^{68,69}, gāzveida^{70,71}, kā arī plazma⁷². Jāmin, ka ne visi energoresursi ir uz oglekļa bāzes, piem., atomenerģētikā izmantojamie elementi un daļa no atjaunīgiem energoresursiem (AER), tādi kā vēja enerģija un hidroenerģija, līdz ar ko tos nevar saukt par kurināmo⁷³, kā arī par kurināmo neuztver energonesēju, kas ir šķidrums telpu apsildei vai vilces ražošanai^{74,75}.

Kurināmo, kurā ogleklis ir uzkrāts LC, pieņemts saukt par fosilo kurināmo jeb degizrakteniem (angļu val. *Fossil fuel*)⁷⁶. Savukārt visi oglekļa avoti, kuros tas tika uzkrāts ĀC, tiek vispārīgi saukti par biomasu^{77,78}. Fosilo kurināmo grupu veido galvenokārt akmeņogles (ciets), nafta (šķidr) un dabasgāze (gāzveida)^{79,80}. Biomasas un tās kurināmo produktu grupu veido pārsvarā koksnes un nekoksnes (atšķiras no koksnes lielākoties ar mazāku lignīna saturu un lielāku pelnu saturu^{81,82}) augi vai vielas, no dabīgām izejvielām iegūts šķidrās kurināmais uz spirta bāzes (piem., bioetanol^{83,84}) un dažāda veida blakusprodukti vai atkritumi^{85,86}. OAC ciklu procesi ir dabiski, tāpēc degizraksteņu un biomasas veidošanos ir tikai laika jautājums, gadījumā ja antropogēnais faktors netiek ņemts vērā. Tomēr, oglekļa tehnoloģiskā ieguve no

LC ir 40–50 reizes lielāka nekā dabiskās ģeoloģiskās plūsmas, un gandrīz 98 % oglekļa, kas pašlaik tiek pārvietots no ģeoloģiskajām krātuvēm, ir antropogēnās darbības rezultāts ⁸⁷.

Mūsdienās ietekmes uz OAC kontrolei plašu uzmanību pievērš kurināmā izvēlei un lielākoties ņem vērā oglekļa neitralitātes (angļu val. *Carbon Neutral*) pamatprincipus, kuri tika piedāvāti uzņēmumiem 2002. gadā ⁸⁸. Šī koncepta pamatā ir CO₂ emisiju balansēšana ar, piem., oglekļa piesaisti. Kombinācijā ar jau pieminēto SEG protokolu oglekļa neitralitātes nodrošināšana rada būtisku antropogēnās ietekmes mazināšanu uz OAC. Jāmin, ka oglekļa neitralitāte nenozīmē citu SEG emisiju balansēšanu vai pilnu izvairīšanos tām — šie principi ir ietverti nulles (angļu val. *Net Zero*) un absolūtās nulles (angļu val. *Absolute Zero*) emisiju konceptos, attiecīgi ^{89,90}. Par nulles emisiju koncepta alternatīvo nosaukumu bieži uzskata klimata neitralitāti (angļu val. *Climate Neutrality*), tomēr šie jēdzieni atšķiras ar ieviešamo risinājumu ilgtspējas pakāpi; nulles emisiju koncepta ietvaros ieviestie risinājumi ir ilgtspējīgāki, savukārt klimata neitralitātes iniciatīva veicina tūlītējo rīcību ⁹¹. Vēl jaunāks ir negatīvo emisiju (angļu val. *Negative Emissions*) koncepts, kas paredz esošo SEG koncentrāciju samazināšanu atmosfērā, t.i., no gaisa tiek izņemts vairāk oglekļa nekā tiek radīts (piem., ar bioenerģiju apvienotu oglekļa uztveršanu, tiešu gaisa uztveršanu vai mežu atjaunošanu) ⁹².

Uzskaitot oglekļa piesaistes potenciālu radīt negatīvas emisijas, parasti tiek pieņemts, ka biomasas ir oglekļa neitrāls energoresurss — to pašu CO₂ daudzumu, kas izdalās biomasas degšanas procesā, fotosintēzes ceļā absorbēs augi ⁹³, kā arī mūsdienās zinātnieki pēta iespējas mākslīgi realizēt kurināmā sintēzi izmantojot CO₂ kā pamata izejvielu ⁹⁴. Daļa zinātnieku ir skeptiski attiecībā pret biomasas oglekļa neitralitātes statusu, jo vairumam ar biomasas iegūšanu saistītiem apakšprocesiem (piem., mēslojuma iegūšana un zemes sagatave audzēšanas posmā) nepieciešama papildus primārā enerģija no fosiliem resursiem ⁹⁵.

Jebkurā gadījumā, energoresursa izvēle ir atkarīga no izmantojamās enerģijas pārveidošanas tehnoloģijas (angļu val. *Energy conversion technologies*) ⁹⁶. Šajā sakarā pastāv jēdziens energoresursu plūsma jeb enerģijas plūsma (angļu val. *Energy flow*) ^{97,98}, kas raksturo energoresursu iedalījumu četrās kategorijās atkarībā no tajos uzkrātās enerģijas veida, apstrādes pakāpes, pieejamības un pielietojuma:

- Primārā enerģija — energoresurss savā sākotnējā (dabā sastopamā) stāvoklī (energoresursu plūsmas sākums);
- Sekundārā enerģija — enerģijas vai energoresursa stāvoklis pēc apstrādes vai pārveides (var izpausties dažādās izcelsmes un kvalitātes pakāpēs);
- Galīgā enerģija – enerģija vai energoresurss lietošanai gatavā stāvoklī (tiešā un netiešā veidā pieejams gala lietotājam);
- Lietderīgā enerģija — enerģijas vai energoresursa patēriņš, kas gala lietotājam rezultējas enerģijas pārveidošanas iemesla pozitīvā iznākumā (pretstatā — enerģijas zudumi) (energoresursu plūsmas beigas). ^{99–101}

Pasaulē primārās enerģijas galvenie patērētāji ir enerģētikas nozare ¹⁰², ēkas (dzīvojamās un nedzīvojamās mājas (piem., komercietpas, biroji) ^{103–105}, rūpniecība (tai skaitā apstrādes) ^{106–108} un transports ¹⁰⁹, veidojot t. s. galapatēriņu (angļu val. *End-use consumption*). Siltumenerģijas izmantošanas sadalījumam starp iepriekš minētajām nozarēm, kā arī starp apakšnozarēm, ir tendence atšķirties atkarībā no klimatiskajiem apstākļiem ^{110–112}. Mērenā

klīmata valstīs, piem., Ziemeļeiropā un Austrumeiropā, lielākā daļa siltumenerģijas privātajā sektorā tiek tērēta apkurei (tostarp regulatīvās temperatūras uzturēšana telpās (noliktavas, biroji, dzīvojamās telpas utt.)^{113,114} un karstā ūdens sagatavošanai. Rūpniecībā siltumu ražošanā galvenokārt izmanto dažādiem tehnoloģiskiem mērķiem (piem., žāvēšana^{115,116}). Minētos pasaules reģionos (tostarp arī Latvijā) izplatīti trīs siltumapgādes veidi — centralizētā siltumapgāde (CSA) un to sistēmas (CSS)^{117–119}, lokālā jeb vietējā siltumapgāde (VSA) un to sistēmas (VSS)^{120,121} un individuālā siltumapgāde (ISA) un to sistēmas (ISS)^{122,123}. Galvenās atšķirības ir izmantotā kurināmā veidi, frakcijas un apjomi, sadedzināšanas iekārtu jauda un aptverto lietotāju skaits. CSA raksturo sistēmas, kurās siltumenerģija tiek ražota centralizētā siltumavotā un pa siltumtīkliem piegādāta vairākiem lietotājiem plašākā teritorijā. VSA attiecas uz siltumenerģijas ražošanu un izmantošanu viena objekta vai ierobežotas ēku grupas vajadzībām, parasti bez pieslēguma plašam centralizētās siltumapgādes tīklam. Savukārt ISA šajā darbā raksturo mazas jaudas apkures risinājumus atsevišķu māsasaimniecību vai individuālu ēku. VSA un ISA praksē dažkārt tiek lietoti līdzīgā nozīmē, jo abos gadījumos siltumenerģija tiek ražota tuvu patēriņa vietai. Neatkarīgi no sistēmas lieluma, tehnoloģiju izvēle ir plaša: katls¹²⁴ (elektriskais, gāzes vai biomasas), siltumsūkņi¹²⁵ (zemes, gaiss-ūdens vai gaiss-gaiss) un dažāda veida koģenerācijas iekārtas¹²⁶. Katls ir viens no dominējošajiem sadedzināšanas iekārtu veidiem pasaulē, it īpaši industriālajā līmenī.

1.1.3. Biomasas resursi, patēriņš un alternatīvās biomasas jēdziens

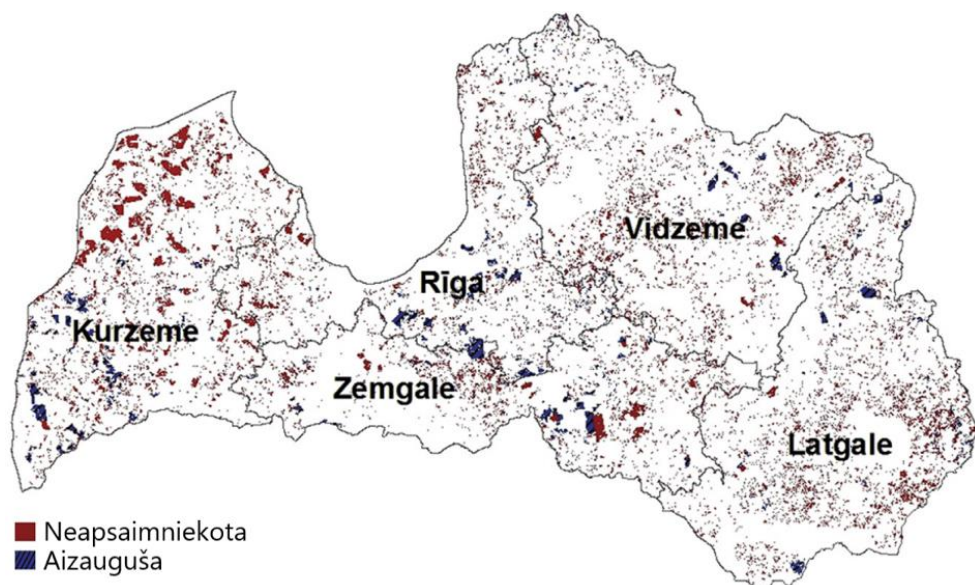
Pasaulē pastāv dažādi biomasas avoti — lielāko daļu (~ 80 %) veido augu izcelsmes biomasas, savukārt mikroorganismu (~ 17 %, ieskaitot sēnes) un dzīvnieku (~ 3 %) izcelsmes biomasas veido atlikušo¹²⁷. 86 % no visas biomasas tiek sastapta sauszemē (ieskaitot sauszemes ūdenstilpes). Neskatoties uz to, ka jūras un okeāni aizņem ~ 70 % no pasaules virsmas, tajos esoša biomasas (gan augi, gan dzīvnieki un mikroorganismi) sastāda tikai 1 % no kopējā daudzuma (masas izteiksmē). Vairāk nekā pusi no augu biomasas veido koksne^{128–130}. Kā tika pieminēts 1. nodaļas ievadā, heterotrofie (dzīvnieki, mikroorganismi) organismi patērē fotoautotrofus (augi) organismus un, atkarībā no barības ķēdes, citus heterotrofus organismus, līdz ar ko veidojas dabisks biomasas patēriņš. Sauszemē dabisks augu izcelsmes biomasas patēriņš ir niecīgs, kamēr jūrās un okeānos tās apjoms ir daudz mazāks, līdz ar ko ūdens vides iemītnieki pārsvarā barojas ar dzīvnieku un mikroorganismu izcelsmes biomasu.

Nekoksnes augu biomasas, ko audzē un savāc cilvēce, veido tikai ~ 2 % jeb 10 GtC/gadā (oglekļa ekvivalentā) no kopējā augu biomasas apjoma¹³¹. Tas ir primārais resurss, kurā ietilpst arī kultūraugi (piem., graudaugi, pākšaugi, eļļas augi, sakņaugi, augļu un ogu kultūras utt.) un to sastāvdaļas (tai skaitā ekonomiski vērtīga daļa jeb raža (piem., sēklas, augļi utt.)), kuru galvenais avots ir lauksaimniecība. Savukārt koksnes augu biomasas, ko pasaulē savāc galvenokārt mežu izciršanas rezultātā (mezsaimniecības nozare), sastāda ~ 1 GtC/gadā jeb ~ 0,4 % no kopējā koksnes apjoma, kas tiek vērtēts kā ~ 246 GtC¹²⁸. Mezsaimniecība ir tādu primāro resursu avots kā apaļkoka balķi (izmantoji citu produktu ražošanai) un malka (kurināmais)¹³². Vēsturiski, lauksaimniecības un mezsaimniecības rezultātā radīti blakusprodukti (piem., miza, spalī, lapas, skaidas utt.) izmanto kā sekundāro resursu citiem nolūkiem, piem., lopu barībai un pakaišiem¹³³, ēku elementu siltināšanai¹³⁴, mēbeļu ražošanai

¹³⁵ utt. Cits vēsturisks novērojums attiecas uz rakstāmpapīra izgudrošanu — tā pirmā iterācija tika taisīta no kaņepēm senajā Ķīnā 105 gadus pirms mūsu ēras ¹³⁶.

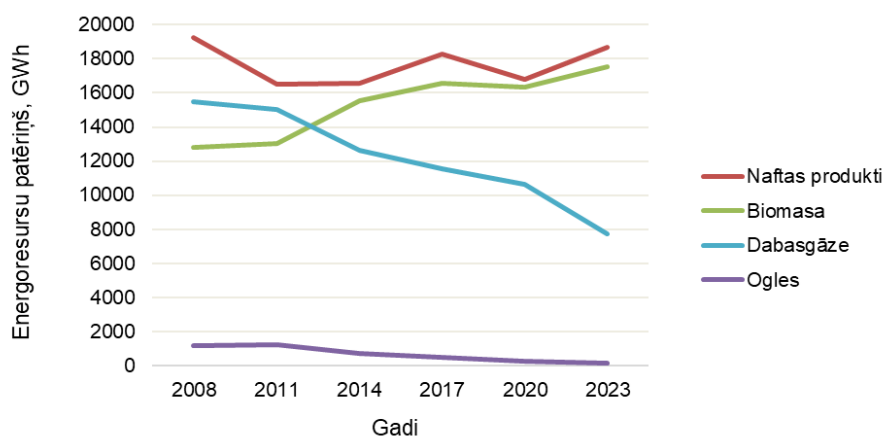
Koksnes meži aizņem ~ 30 % no kopējās pasaules sauszemes platības jeb ~ 4 mljrd. ha ¹³⁷. Mežu platības mainās nevienmērīgi dažādās pasaules valstīs — kamēr Ķīnā ir redzams ievērojams mežu platības pieaugums (~ 1,9 milj. ha/gadā), Brazīlijā novērojams platības samazinājums (~ 1,5 milj. ha/gadā). ES meži aizņem 159 milj. ha jeb ~ 40 % no kopējās ES sauszemes platības — no tiem ikgadēji iegūst ~ 350 milj. m³ industriālā apaļkoka un ~ 120 milj. m³ malkas un saražo ~ 100 milj. m³ zāģmateriālu, ~ 75 milj. t papīra un kartona un ~ 55 milj. m³ uz koksnes bāzes izgatavotas plātnes ¹³⁸. ES pastāv ievērojamas atšķirības kultivēto platību apjomā, audzēto kultūraugu sugās un to ražā ¹³⁹. Šīs atšķirības galvenokārt nosaka klimatiskie apstākļi, augsnes īpatnības un lauksaimniecības prakse, kas dažādās ES dalībvalstīs ir atšķirīga. Graudaugi un eļļas augu sēklas ir nozīmīgākie kultūraugi gan pēc kultivētās platības, gan pēc ražošanas apjoma. ES ievērojams daudzums lauksaimniecības atlieku rodas no augkopības, un daļa no tām pēc ražas novākšanas paliek uz lauka. Atlieku veidošanās ir atkarīga no vairākiem faktoriem, tostarp kultūraugu veida, augseka, kultūraugu maiņas un izmantotās lauksaimniecības prakses (piem., tradicionālā, bioloģiskā slāpekļa piesaiste ¹⁴⁰, reģeneratīvā ¹⁴¹). Atlieku pieejamība ir tieši atkarīga no ražas apjoma un kultivētās platības, taču to faktisko izmantojamību nosaka ilgtspējīgi izņemamā frakcija, kas nedrīkst pasliktināt augsnes auglību, kā arī konkurence ar citiem atlieku izmantošanas virzieniem lauksaimniecībā un rūpniecībā ¹⁴².

Latvijas meži veido ~ 2 % no ES mežiem jeb aizņem 3 milj. ha no Latvijas sauszemes platības (~ 55 %). Latvijā, kā citās ES valstīs, ne visi meži pieder valstij — īpatsvars starp valsts un citiem īpašniekiem piederošiem mežiem ir gandrīz vienāds ¹⁴³. Lielākie privātie meža īpašnieki ir dažādas fiziskās personas, tomēr vienai fiziskai personai vidēji pieder ~ 10 ha, savukārt juridiskām personām “Ingka Investments” (2026. gada 30. janvārī iegādājās “Sōdra Metsad OŪ” īpašumā esošo platību ¹⁴⁴), “MYRTILLUS, SIA” un “Rīgas meži, SIA” pieder ~ 115 tūkst. ha, ~ 60 tūkst. ha un ~ 50 tūkst. ha, attiecīgi ¹⁴⁵. Latvijā lauksaimniecībā izmantojamās zemes platība ir ~ 2000 tūkst. ha ¹⁴⁶, savukārt neapsaimniekotas un aizaugušas zemes platība sastāda ~ 262 tūkst. ha (sk. 1.2. att.), kur ~ 86 % ir neapsaimniekota (piem., pamesta teritorija) zeme un ~ 14 % aizauguša (piem., ar invazīviem augiem) zeme ¹⁴⁷.



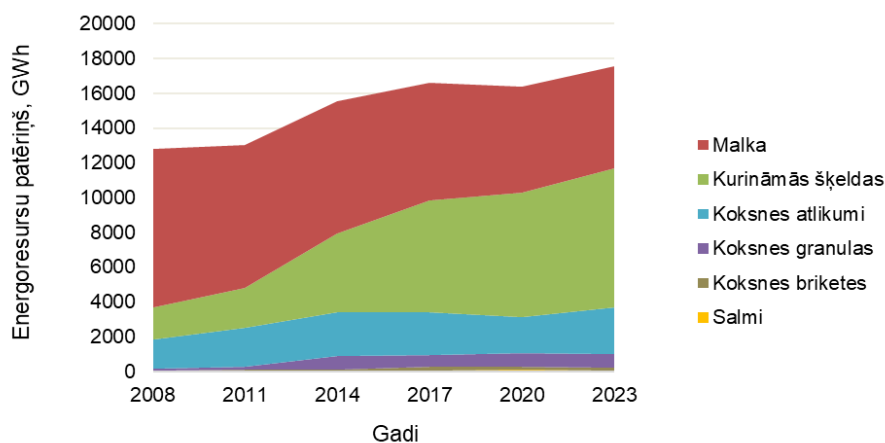
1.2. attēls. Neapsaimniekoto un aizaugušo lauksaimniecības teritoriju karte Latvijā
(reprodukcija no ¹⁴⁷)

Fosilo kurināmo patēriņš Latvijā, kas 21. gadsimtā tomēr samazinājās, joprojām ir augstā līmenī — 2008. gadā kopējais naftas produktu, dabasgāzes un ogļu patēriņš sastādīja ~ 66 % (35 925 GWh) no kopējā energoresursu patēriņa. Līdz 2023. gadam šis rādītājs samazinājās līdz 52 % (26 574 GWh), ņemot vērā kopējo energoresursu patēriņa samazinājumu. Savukārt biomasas energoresursu patēriņš ir pieaudzis — no 12 787 GWh 2008. gadā (~ 23 % no kopējā energoresursu patēriņa) līdz 17 547 GWh 2023. gadā (~ 34 % no kopējā energoresursu patēriņa) (sk. **Error! Reference source not found.** att.). ¹⁴⁸



1.3. attēls. Energoresursu patēriņš Latvijā

Vadoties pēc Centrālās statistikas pārvaldes (CSP) Oficiālā statistikas portāla (OSP) datiem ¹⁴⁸, par biomasas energoresursiem tiek uzskatīta malka, koksnes atlikumi, kurināmās šķeldas, koksnes briketes, koksnes granulas un salmi (sk. 1.4. att.). Malka, kas pārsvarā tiek izmantota malkas katlos un krāsnīs, joprojām paliek viens no aktuālākiem kurināmajiem — neskatoties uz to, ka tās patēriņš samazinājās par ~ 36 % laika posmā no 2008. līdz 2023. gadam (no 9082 GWh līdz 5835 GWh, attiecīgi), tas veido 33 % no kopējā biomasas kurināmā patēriņa. Ievērojami pieaudzis šķeldas patēriņš — 2008. gadā tas sastādīja tikai ~ 15 % (1852 GWh) no biomasas kurināmā patēriņa, kamēr 2023. gadā tas sasniedza jau ~ 46 % (8043 GWh). Citu koksnes atlikumu (piem., miza) patēriņš nenozīmīgi svārstījās un vidēji sastāda ~ 15 % no biomasas kurināmā patēriņa (ņemot vērā periodu no 2008. līdz 2023. gadam). Visstraujākais patēriņa pieaugums (~ 10 reizēs) ir koksnes granulām un salmiem (~ 15 reizēs) apskatāmajā periodā.

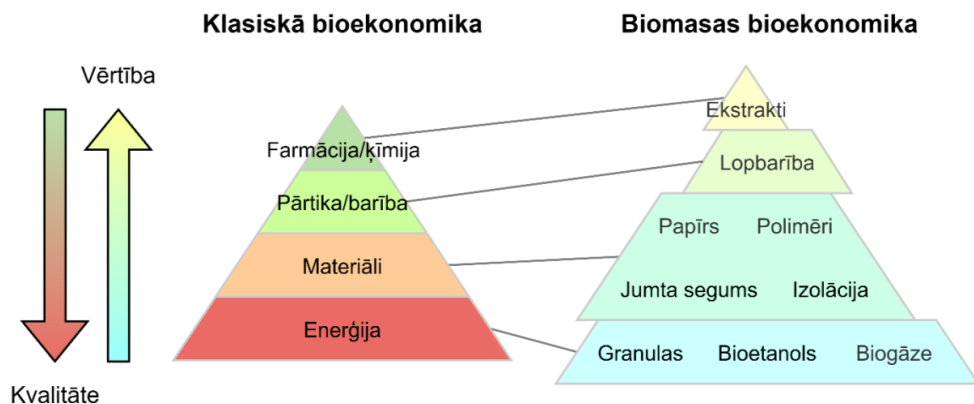


1.4. attēls. Koksnes kurināmo un salmu patēriņš Latvijā

Lai virzītos uz nākotni, kurā pastāv ne tikai ilgtspējīga nulles emisiju globālā ekonomika, bet arī tiek aktīvi attīstīti negatīvo emisiju risinājumi, ir nepieciešams pakāpeniski samazināt fosilo kurināmo ieguvu un izmantošanu, vienlaikus aktīvāk izmantojot biomasu. Šajā kontekstā termins “ilgtspēja” (angļu val. *Sustainability*) raksturo resursu izmantošanas principu, kurā pašreizējās vajadzības tiek apmierinātas, neapdraudot nākamo paaudžu iespējas apmierināt savas vajadzības ¹⁴⁹. Tādēļ biomasas izmantošana enerģētikā nav vērtējama tikai pēc tās atjaunojamās izcelsmes, bet arī pēc resursa izcelsmes, konkurences ar citiem izmantošanas virzieniem, apstrādes nepieciešamības, transportēšanas, emisijām un gala izmantošanas efektivitātes.

Vadoties pēc bioekonomikas pamatprincipiem, jebkuru resursu (tai skaitā biomasu) jāizmanto pēc iespējas vairāk produktu ar augstu pievienoto vērtību ražošanai ¹⁵⁰. 1.5. attēlā ir redzama klasiskā šo pamatprincipu vizualizācija — produktu pievienotās vērtības piramīda, kurās augšējā galā ir farmācija un pārtika/barība, un apakšējā daļā enerģētikas sektors. Par klasisku kļuvusi arī dilemma par resursa sadali piramīdas ietvaros — augstas pievienotās

vērtības produktu ražošanai nepieciešams atbilstoši augstas kvalitātes resurss, kura apjoms parasti ir mazāks nekā zemākas kvalitātes resursu apjoms. Tomēr atkarībā no konkrētā resursa augstas un zemas kvalitātes robeža ne vienmēr ir precīzi definējama. Tādējādi bioekonomikas kontekstā alternatīvs resurss vai alternatīva izejviela nav vienkārši jebkurš cits pieejams materiāls, bet tāda materiālu plūsma, kas konkrētajā nozarē nav tradicionālā pamatizejviela un kuras izmantošana kļūst pamatota tad, ja augstākas kvalitātes resursi ir novirzāmi augstākas pievienotās vērtības produktiem vai to pieejamību ierobežo cena, pieprasījums un konkurence ar citiem izmantošanas virzieniem. Šāda alternatīva plūsma var aizstāt vai papildināt dominējošo izejvielu tikai tad, ja ir nodrošināta tās pieejamība, tehniskā izmantojamība un atbilstība ilgtspējīgas resursu izmantošanas principiem.



1.5. attēls. Bioekonomikas vērtības hierarhija un biomasas izmantošanas piramīda

Par ilgtspējīgu tiek uzskatīts t.s. kaskādēšanas princips, kad priekšroka tiek dota jomām, kas ražo produktus ar augstāko pievienoto vērtību — pārpalikumi un blakusprodukti tiek virzīti uz nākamo jomu, kas piramīdā atrodas vienu soli zemāk ¹⁵¹. Kaskādēšana neizslēdz pārējo jomu pastāvīgu nodrošināšanu ar nepieciešamiem resursiem, bet drīzāk attiecas tikai uz augstas kvalitātes daļu, kā arī šis risinājums nav universāls (piem., atsevišķos gadījumos tas var būt kontrproduktīvs, jo princips paredz kavējumus resursu plūsmā ¹⁵²). Eiropas Komisijas (EK) vadlīnijās kaskādēšana tiek sasaistīta ar bioresursu efektīvāku izmantošanu aprites ekonomikas un bioekonomikas kontekstā ¹⁵³.

Biomassas kontekstā resursu sadale sastopas ar vairākiem konkurences izaicinājumiem, it īpaši starp pārtikas/barības jomu un enerģētiku ¹⁵⁴. Atkarībā no reģiona, aktuāls ir jautājums par alternatīvās biomasas utilizācijas metodes izvēli enerģētikā, piem., tiešā dedzināšana vai bioetanola ražošana ^{155,156}. Tāpēc pasaulē praktizē kurināmā sertificēšanu, kas ļauj klasificēt biomasu balstoties uz dažādiem kvalitātes rādītājiem. Tā, kurināmās šķeldas kvalitāti nosaka pēc ISO 17225-4 standarta, kas jau vairākus gadus ļauj šī kurināmā tiešajiem lietotājiem pieņemt lēmumus atkarībā no cenas un kvalitātes attiecības ¹⁵⁷. Ar šo standartu saistītie dokumenti kalpo par pamatu ENplus klasifikācijas un sertificēšanas sistēmai, kas tiek izmantota koksnes granulām ¹⁵⁸. Atsevišķas valstis ievieš vietējos reglamentus, kas regulē kurināmā

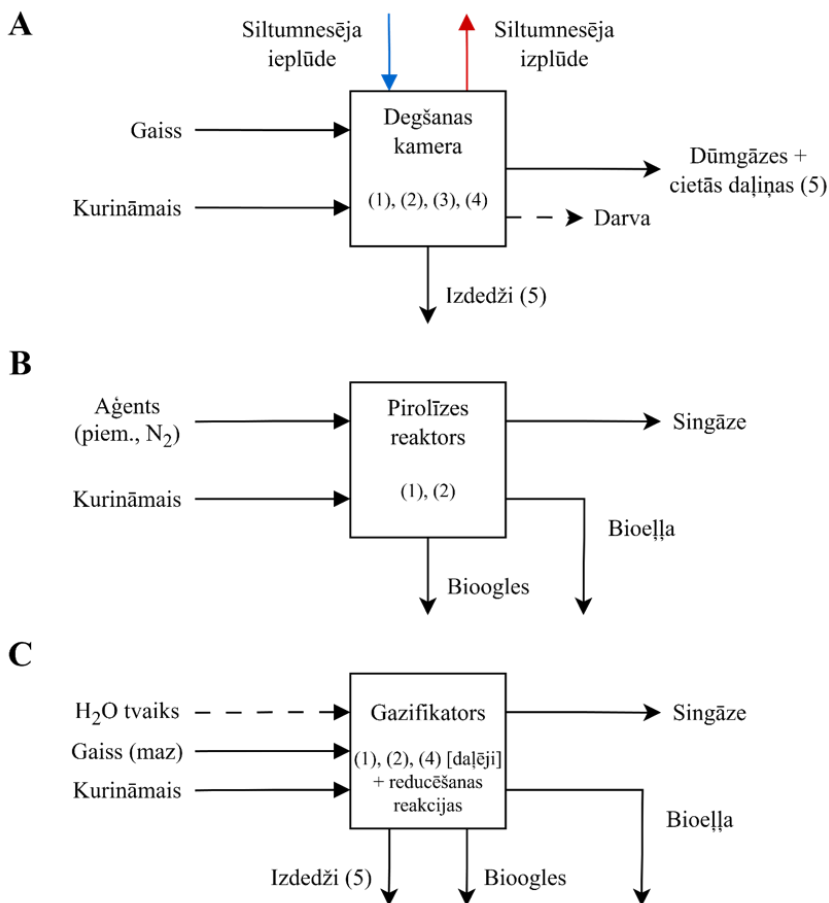
izmantošanu atkarībā no specifiskām kvalitātes prasībām, kas nav pretrunā ar jau pieminēto ISO standartu un ENplus sistēmu. Itālijā biomasas ar pelnu saturu $> 7\%$ izmantošana enerģētikā tiek uzskatīta par nelietderīgu, tāpēc to jāpielieto citur ¹⁵⁹. Drobniaik u. c. 2024. gadā veikuši pētījumu Polijā un noskaidrojuši, ka 70% no tirgū pieejamām granulām neatbilst vietējas sertifikācijas sistēmas PL-US BIO prasībām ¹⁶⁰. Šajā promocijas darbā ar terminu “alternatīvā biomasas” (angļu val. *Alternative biomass*) (termins sastopas literatūrā no 1993. gada ¹⁶¹) tiek saprastas biomasas plūsmas, kas nav tradicionālā koksnes granulā ražošanas pamatizejviela, bet kuras potenciāli var izmantot cietā biokurināmā ražošanai. Šajā grupā ietilpst nekoksnes augu biomasas, lauksaimniecības un pārtikas ražošanas atlikumi, invazīvu vai mazvērtīgi izmantotu augu biomasas, kā arī koksnes un nekoksnes biomasas maisījumi.

1.1.4. Biomasai raksturīgā degšanas procesa norises posmi un radītie produkti

Biomasas sadegšana ir daudzpakāpju process, kurā notiek gan gāzveida produktu homogēnā oksidācija, gan atlikušā oglekļa heterogēnā oksidācija. Degšanas norisi nosaka secīgas termiskās un ķīmiskās pārmaiņas, kas vienlaicīgi aptver vairākas fāzes un daļēji pārklājas laikā un telpā:

- Žāvēšana (1) — mitruma iztvaikošana no biomasas;
- Termiskā noārdīšanās (2) — organiskās struktūras sadalīšanās un gaistošo vielu izdalīšanās;
- Gaistošo vielu sadegšana (3) — gāzveida produktu oksidācija gāzu fāzē;
- Brīvā C (angļu val. *Char*) oksidācija (4) — cietās fāzes atlikuma heterogēna (neviendabīgā) oksidācija;
- Pelnu veidošanās (5) — nesadeģušās frakcijas nogulsnešanos vai klātbūtni gāzu plūsmā. ¹⁶²

Biomasas sadegšanas primārie produkti ir lietderīgais siltums, cietie produkti un gāzveida produkti. Atkarībā no kurināmā kvalitātes un sadedzināšanas iekārtas konstrukcijas iespējami arī kondensējamie organiskie savienojumi (darva jeb bioeļļa), kas izdalās nepilnīgas sadegšanas gadījumos. Atkarībā no termiskās konversijas tehnoloģijas (tiešā sadedzināšana (sk. 1.6. att. (A)), pirolīze (sk. 1.6. att. (B)), gazifikācija (sk. 1.6. att. (C))) produktu prioritātes var atšķirties.



1.6. attēls. Biomases termokīmiskās konversijas tehnoloģiju principiālās shēmas: tiešā sadedzināšana (A), pirolīze (B) un gazifikācija (C)

Tiešās sadedzināšanas gadījumā biomasas ķīmiskā enerģija tiek pārveidota siltumenerģijā, ko sadedzināšanas iekārtā caur siltummaini nodod siltumnesējam. Katlu iekārtās siltumnesējs visbiežāk ir ūdens, kas nodrošina siltumenerģijas pārvadi uz apkures vai tehnoloģisko patēriņa sistēmu. Pirolīzes un gazifikācijas gadījumos siltums veidojas kā sekundārs enerģijas produkts pēc gāzveida starpproduktu tālākas oksidācijas. Lietderīgā siltuma daudzumu ietekmē gan sadedzināšanas iekārtas uzbūve, gan kurināmā īpašības. No sadedzināšanas iekārtas uzbūves puses svarīgākais ir degšanas kameras ģeometrija un gaisa padeves organizācija. No kurināmā puses galvenie ietekmes faktori ir mitruma saturs, pelnu saturs un siltumspēja. Kurināmā viendabīgums palīdz uzturēt augstāku lietderību sadedzināšanas iekārtas darbināšanas laikā.¹⁶³

Sadedzināšanas cietie produkti atšķiras atkarībā no termiskās konversijas procesa; tiešās sadedzināšanas gadījumā cietie produkti ir pelni, bet singāzes un gazifikācijas procesos — gan pelni, gan brīvais C jeb bioogles, jo tā oksidācija šajos procesos nav paredzēta. Pelnus iedala

izdedžos (angļu val. *Bottom ash*) un lidojošajos pelnos (angļu val. *Fly ash*). Izdedži uzkrājas degšanas kameras apakšā (atkarībā no biomasas izcelsmes satur smiltis, kvarca un aluminosilikātu daļiņas), savukārt lidojošie pelni ir smalko daļiņu frakcija, kas tiek aiznesta ar dūmgāzēm (atkarībā no biomasas izcelsmes satur sārmu metālu hlorīdus, sulfātus un karbonātus) ¹⁶⁴. Paaugstināta smalko daļiņu koncentrācija gaisā negatīvi ietekmē cilvēka veselību ¹⁶⁵ un to emisijas būtu pēc iespējas jāsamazina, lai uzlabotu biomasas izplatību un veicinātu vietējo AER izmantošanu. Primārie pasākumi daļiņu veidošanās mazināšanai (kurināmā ar augstu kvalitātes līmeni izmantošana utt.) ne vienmēr spēj nodrošināt pietiekami zemu koncentrāciju dūmgāzēs, tāpēc jāveic sekundāri pasākumi (dūmgāzu attīrīšana utt.). Eksistē divas dūmgāzu attīrīšanas tehnoloģijas, kuras ir veiksmīgi integrētas mazas jaudas (līdz 70 kW) cietā kurināmā katlos: elektrostatiskie filtri un dūmgāzu kondensatori. Elektrostatiskie filtri ir bieži izmantojama tehnoloģija rūpniecības un enerģētikas sektoros. Tos galvenokārt pielieto gadījumos, lai apstrādātu emisijas, kuras rodas no ogļu un šķidrā kurināmā sadedzināšanas procesa, bet tie ir piemēroti arī cietā biokurināmā sadedzināšanas procesā radīto daļiņu atdalīšanai. Elektrostatisko filtru efektivitāte ir būtiski atkarīga no daļiņu sastāva un izmēra ¹⁶⁵. Parasti dūmgāzu kondensators ir slēgtā tipa sistēma, kurā karstas dūmgāzes kontaktē ar cauruli, kurā cirkulē aukstais ūdens ¹⁶⁶. Siltums no uzsildītā ūdens tiek atgūts ar siltummaiņa palīdzību. Dūmgāzu kondensācijas metodes izmantošanas dēļ iespējams paaugstināt kopējo sistēmas siltuma efektivitāti līdz vērtībai, kura pārsniedz 100 %. Cits dūmgāzu kondensācijas dizains, kas saucās mitrais skruberis, tas ir piemērots ne tikai siltuma atgūšanai, bet arī daļiņu atdalīšanai; atdalīšanas efektivitāte parasti ir zema ¹⁶⁷. Pastāv arī elektrostatiskā filtra un mitrā skrubera kombinācijas, ar kurām iespējas sasniegt atdalīšanas efektivitāti līdz 95 % ¹⁶⁸. Ilgtspējīgai pelnu apsaimniekošanai ir nepieciešama pilnvērtīga to raksturošana, nosakot elementāro sastāvu un kristāliskas fāzes ¹⁶⁹.

Dūmgāzes ir biomasas sadegšanas gāzveida produkts ¹⁶². To pamatsastāvu veido CO₂ un H₂O kā pilnīgas oksidācijas produkti, N₂ un to oksīdi, kā arī brīvais O₂ ¹⁷⁰. Nepilnīgas sadegšanas gadījumā pieaug CO un NO_x koncentrācijas (SO_x, ja kurināmais satur sēru). NO_x veidošanās ir atkarīga no kurināmā slāpekļa satura un temperatūras degšanas kamerā. Atšķirīgos apstākļos un sadedzināšanas iekārtās iegūto rezultātu salīdzināšanai parasti dūmgāzu koncentrācijas pārrēķina un izsaka mērvienībā mg/Nm³ pie noteiktas atsauces O₂ vērtības (piem., 6 % vai 10 %), kur "N" apzīmē normālapstākļus ¹⁷¹. Dūmgāzu sastāvs un daudzums ir tieši atkarīgs no gaisa pārpalikuma koeficienta, gaisa sadales pa primāro un sekundāro (ja paredzēts) padevi, no degkammeras ģeometrijas un turbulences līmeņa, kā arī no temperatūras un gāzu uzturēšanās laika. Pārmērīga gaisa padeve parasti samazina CO, bet palielina zudumus ar karstām dūmgāzēm un var veicināt NO_x veidošanos; nepietiekama gaisa padeve samazina NO_x, taču palielina CO un daļiņu īpatsvaru ¹⁷². Pirolīzē un gazifikācijā, atšķirībā no tiešās sadegšanas, process tiek vadīts tā, lai nodrošinātu nepilnu oksidāciju, kuras rezultāts ir singāzes iegūšana, nevis pilnīga sadegšana dūmgāzēs ^{173,174}.

Bioeļļa ir kondensējamā šķidrā frakcija, kas veidojas biomasas termiskās noārdīšanās fāzē. Tā spēj saglabāt ievērojamu daļu sākotnējās izejvielas ķīmiskās enerģijas — labvēlīgos degšanas apstākļos līdz 70–80 % ¹⁷⁵. Bioeļļa sastāvs ir daudzveidīgs, jo tā ir komplekss O₂ saturošu savienojumu maisījums, kurā ietilpst organiskās skābes, spirti, ketoni, fenolu

atvasinājumi utt. Šī ķīmiskā sarežģītība vienlaikus nosaka bioeļļas vērtību un tās praktiskos izaicinājumus — no vienas puses, tā ir daudzsološa izejviela ķīmisko vielu un degvielu ražošanai (piem., aviācijas degvielas ražošanai ¹⁷⁶), bet no otras puses, bioeļļai raksturīga skābuma pakāpe, nestabila uzglabāšanas uzvedība un korozivitāte, kas padara tās transportēšanu, glabāšanu un izmantošanu daudz sarežģītāku. Tirgus attīstības tendences liecina, ka bioeļļas nozare pašlaik piedzīvo ievērojamu izaugsmi ¹⁷⁷. Interese par šo produktu strauji pieaug gan enerģētikas, gan ķīmijas nozarēs, un to veicina gan virzība uz atjaunojamiem resursiem, gan bioeļļas plašās izmantošanas iespējas dažādos pārstrādes un ražošanas procesos. Rezultātā bioeļļa arvien biežāk tiek uzskatīta par perspektīvu izejvielu ar augstu komerciālo potenciālu.

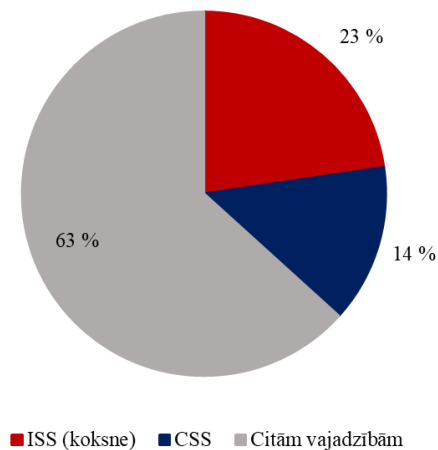
1.2. Tendences biomasas izmantošanā siltumenerģijas ražošanai

Šajā apakšnodaļā sniegts pārskats par biomasas izmantošanas tendencēm siltumenerģijas ražošanā, iezīmējot galvenos virzītājspēkus un pārmaiņas siltumapgādes sektorā. Tālāk secīgi aplūkota biomasas loma siltumapgādes sistēmās, granulu pielietojuma attīstība, regulējuma un atbalsta instrumentu ietekme, kā arī alternatīvās biomasas potenciāls un lēmumu pieņēmēju uzskati. Apakšnodaļa kalpo kā konteksta ietvars turpmākajai alternatīvu izvērtēšanai, akcentējot ilgtspējas aspektu nozīmi tehnoloģiju un kurināmā izvēlē.

1.2.1. Biomasas loma siltumapgādes sistēmās

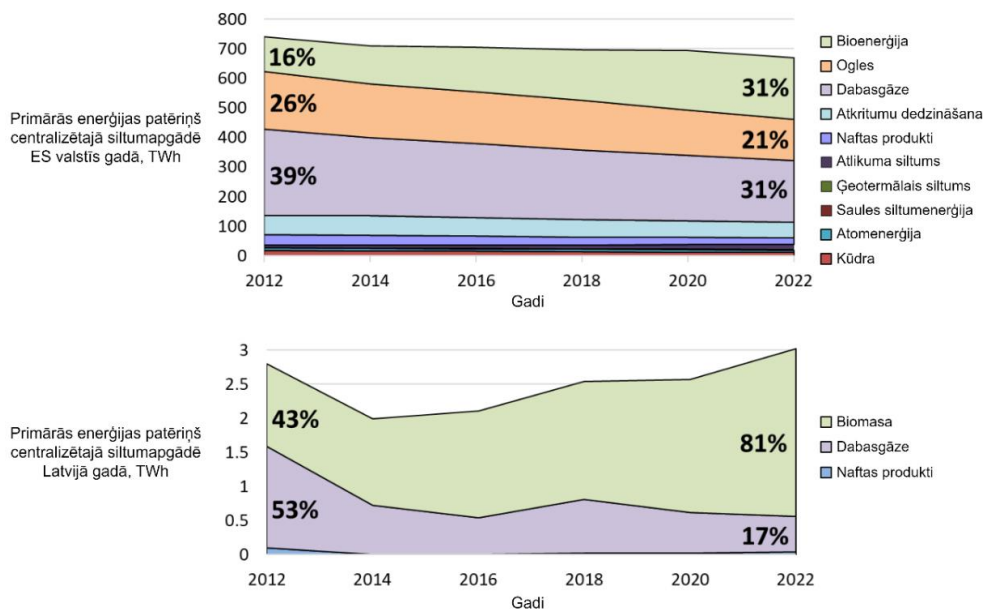
Siltumenerģija ir resurss, ko cilvēce izmanto dažādos tehnoloģiskajos procesos jau kopš industriālās revolūcijas sākuma ^{178–180}, tostarp elektroenerģijas ražošanā elektrostacijās ^{181,182}. Pašreizējās plaši izmantotās siltumenerģijas transformācijas tehnoloģijas nenoliedzami rada ietekmi uz vidi, jo pārsvarā balstās uz cauruļu gala pieejām, kas novērš piesārņojumu tikai procesa beigās, nevis novērš tā rašanos avotā ^{183–185}. Tiek ieviestas citas pieejas, kas galvenokārt vērstas uz energoefektivitātes paaugstināšanu, izmantojot uzvedības maiņu veicinošas aktivitātes (piem., informatīvi semināri, vizuālie materiāli, podkāsti u. tml.) vai pārdomājot sistēmas darbības principus ^{186–188}. Viens no mūsdienās aktīvi ieviešamiem risinājumiem ir atlikumsiltuma (angļu val. *Waste heat*) atgūšana un lietderīga izmantošana (iespējamie atlikumsiltuma avoti ir notekūdeņi ^{189,190}, iekārtas ¹⁹¹ un tehnoloģiskās sistēmas (piem., datu centru serveri ^{192,193})). Neraugoties uz šādiem piemēriem, cietā kurināmā patēriņš saglabājas ievērojams, un biomasas izmantošana turpina pieaugt, jo tā tiek uzlūkota kā galvenā alternatīva fosilajiem energoresursiem, turklāt prognozes liecina par šīs tendences saglabāšanos līdz pat 2050. gadam ¹⁹⁴. Papildu spiedienu uz vietējo energoresursu izmantošanu rada arī globālās enerģētiskās nestabilitātes riski, kas saistīti ar militārajiem konfliktiem Ukrainā ¹⁹⁵ un Irānā ¹⁹⁶, mudinot valstis pastiprināti meklēt risinājumus enerģētiskās neatkarības palielināšanai. Enerģijas tirgus svārstīguma apstākļos arvien būtiskāka kļūst energoresursu diversifikācija un alternatīvu koksnes un nekoksnes kurināmā veidu pieejamība ^{197–199}.

CSS ir nozīmīga platforma AER siltumenerģijas integrācijai; globāli CSS nodrošina ~ 9 % no siltuma pieprasījuma ēkās un rūpniecībā ²⁰⁰ (ES starpā vidēji ~ 10 % ²⁰¹). Latvijā šis rādītājs ir 14 %, savukārt ISS veido 23 % no kopējā energoresursu patēriņa (sk. 1.7. att.) ¹⁴⁸.



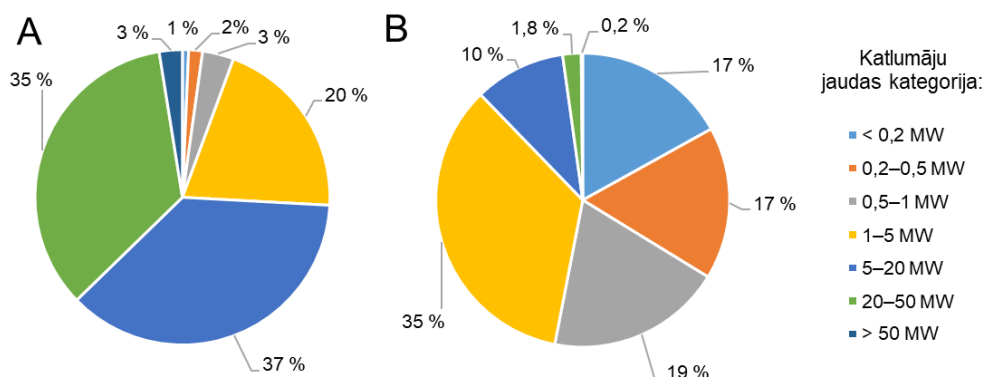
1.7. attēls. Energoresursu patēriņa sadalījums pēc enerģijas pielietojuma veida Latvijā

Pēdējo 15 gadu laikā izmantotā kurināmā sadalījums CSS katlumājās krasi mainījies — ES ietvaros bioenerģijas (pārsvērā biomasas) izmantošana pieauga no 16 % 2012. gadā līdz 31 % 2022. gadā, savukārt ogļu un dabasgāzes patēriņš samazinājies, ņemot vērā kopējo primārās enerģijas patēriņa samazinājumu (sk. 1.8. att.)²⁰². Latvijā biomasas izmantošana CSS katlumājās pieauga no 43 % 2012. gadā līdz 81 % 2022. gadā, savukārt dabasgāzes patēriņš samazinājies no 53 % 2012. gadā līdz 17 % 2022. gadā²⁰³.



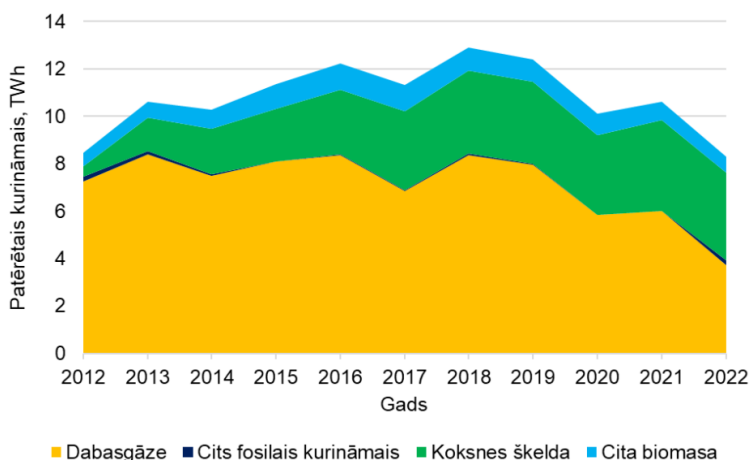
1.8. attēls. Primārās enerģijas patēriņš CSS katlumājās ES starpā (augšā) un Latvijā (apakšā)

CSS katlumājas iedalās vairākās kategorijās atkarībā no uzstādītās katlu siltumenerģijas jaudas un patērētāju siltumenerģijas patēriņa atbilstoši MK noteikumiem Nr. 17 — sākot no < 0,2 MW līdz > 50 MW ²⁰⁴. Latvijā visbiežāk sastopamā uzstādītā jauda CSS katlumājām ir diapazonā 1–5 MW (34 % no kopējā CSS katlu skaita), savukārt vismazāk sastopami > 50 MW katli (0,2 % no kopējā CSS katlu skaita) (sk. 1.9. att. (A)). Kopējā CSS katlumāju saražotā siltumenerģijas sadalījumā lielāko daļu veido katli ar jaudu diapazonā 5–20 MW (37 %) un 20–50 MW (35 %) (sk. 1.9. att. (B)). ²⁰⁵



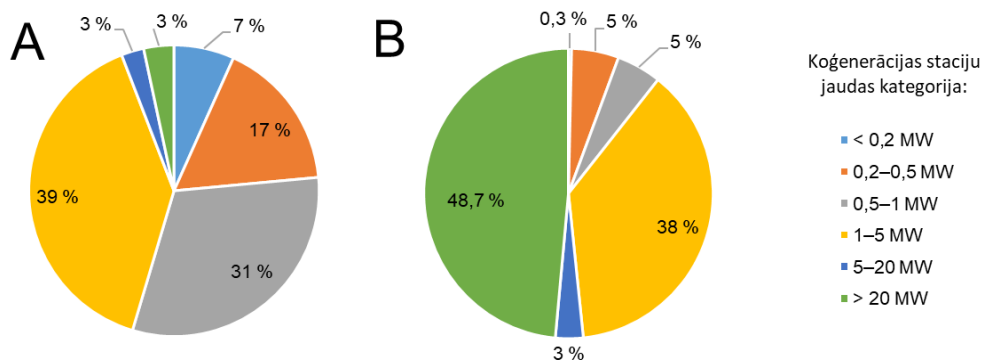
1.9. attēls. CSS katlu sadalījums (A) un to saražotās siltumenerģijas īpatsvars (B) Latvijā

Būtisku daļu no CSS nodotās siltumenerģijas Latvijā veido koģenerācijā jeb kombinētajā siltumenerģijas un elektroenerģijas ražošanā (angļu val. *Combined Heat and Power*) — 2022. gadā CSS katlumājas pavisam saražoja 2920 GWh siltumenerģijas, savukārt koģenerācija saražoja pavisam 4807 GWh siltumenerģijas un 2016 GWh elektroenerģijas ^{205,206}. Līdzīgi kā CSS katlumāju gadījumā, koģenerācijā izmantoto kurināmo īpatsvars arī ir mainījies — dabasgāzes patēriņa īpatsvars no ~ 80 % 2012. gadā samazinājies līdz 41 % 2022. gadā, savukārt biomasas (tai skaitā šķeldas) patēriņa īpatsvars pieaudzis no ~ 11 % 2012. gadā līdz ~ 47 % 2022. gadā (sk. 1.10. att.) ²⁰⁶.



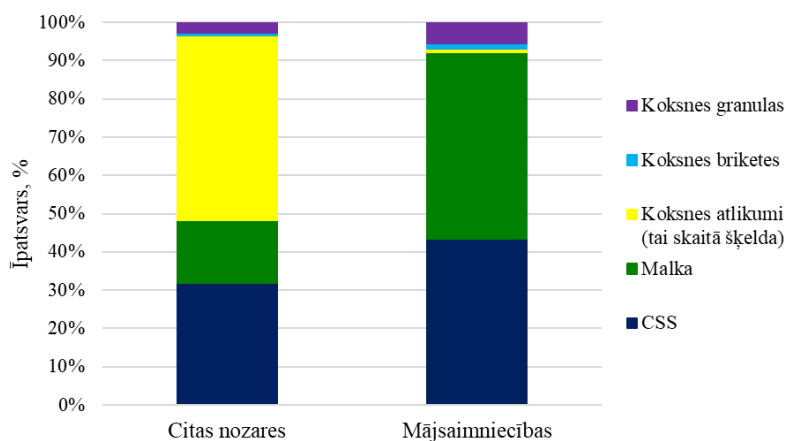
1.10. attēls. Kurināmā patēriņš koģenerācijā Latvijā

Koģenerācijas stacijas Latvijā tiek iedalītas jaudas kategorijās atbilstoši uzstādītajai elektriskajai jaudai. Latvijā visbiežāk sastopamās ir 1–5 MW koģenerācijas iekārtas, kas veido 39 % no kopējā koģenerācijas staciju skaita, bet otrs lielākais īpatsvars ir koģenerācijas stacijām 0,5–1 MW jaudas diapazonā (31 %) (sk. 1.11. att. (A)). Siltumenerģijas ražošanas struktūrā dominē > 20 MW jaudas koģenerācijas stacijas, kas nodrošina 48,7 % no kopējā koģenerācijā saražotā siltuma apjoma (sk. 1.11. att. (B)), kaut to skaits sastāda tikai 3 % no kopējā koģenerācijas staciju skaita. Nozīmīgu daļu veido arī 1–5 MW stacijas (38 %), kamēr visas mazjaudas kategorijas (< 1 MW) kopā sastāda ~ 10 % no saražotā siltumenerģijas īpatsvara.²⁰⁶



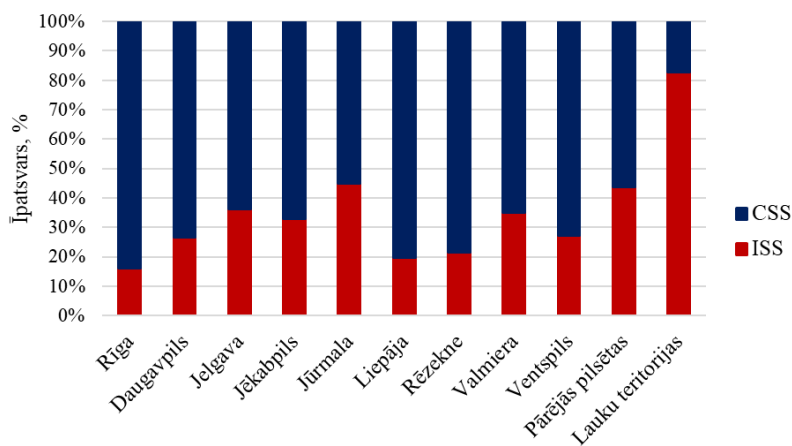
1.11. attēls. Koģenerācijas staciju sadalījums (A) un to saražotās siltumenerģijas īpatsvars (B) Latvijā

Latvijā no CSS saņemtais un ar koksnes kurināmo saražotās siltumenerģijas īpatsvars dažādās nozarēs atšķiras — mājāsaimniecībā CSS un malkai ir līdzīgs īpatsvars, kam seko krietni mazāks koksnes granulu patēriņš, savukārt citās nozarēs dominē koksnes atlikumu (tai skaitā šķeldas) izmantošana (sk. 1.12. att.)¹⁴⁸.



1.12. attēls. CSS un koksnes kurināmā īpatsvars mājsaimniecībās un citās nozarēs

Mājsaimniecības veido dzīvojamās mājas (24 %) un dzīvokļi (76 %) ²⁰⁷; dzīvojamās mājās parasti nav pieslēgtas CSS, tomēr dzīvokļi ne vienmēr saņem siltumenerģiju apkures un karstā ūdens vajadzībām no CSS. Latvijas kontekstā CSS un ISS sadalījums mājsaimniecībās atšķirās no apdzīvotās vietas tipa — kā redzams 1.13. attēlā, pilsētās dominē CSS (piem., Rīgā īpatsvars ir ~ 82 %), savukārt lauku teritorijās biežāk sastopamas ISS (CSS vidēji sastāda tikai ~ 18 %) ^{208,209}.

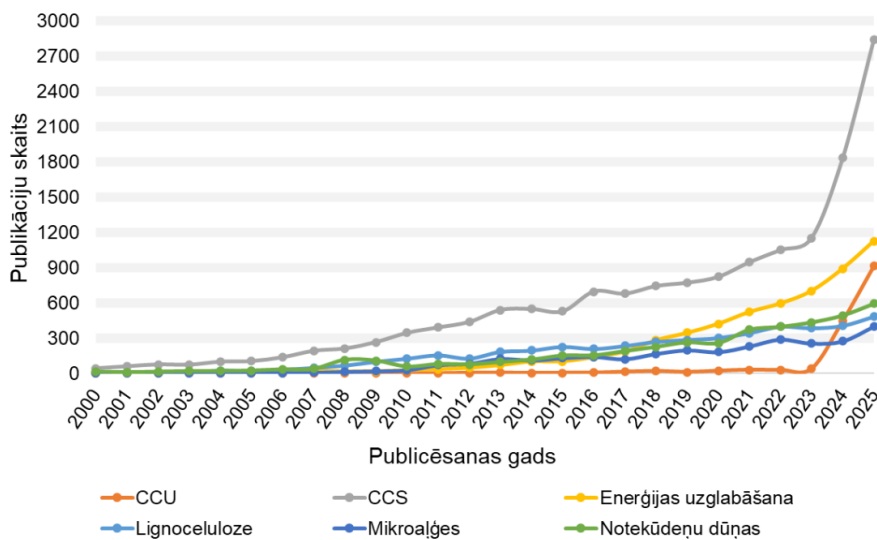


1.13. attēls. CSS un ISS īpatsvars apdzīvotās vietās Latvijā

1.2.2. Biomases pielietojums enerģētikā un granulu loma siltumenerģijas ražošanā

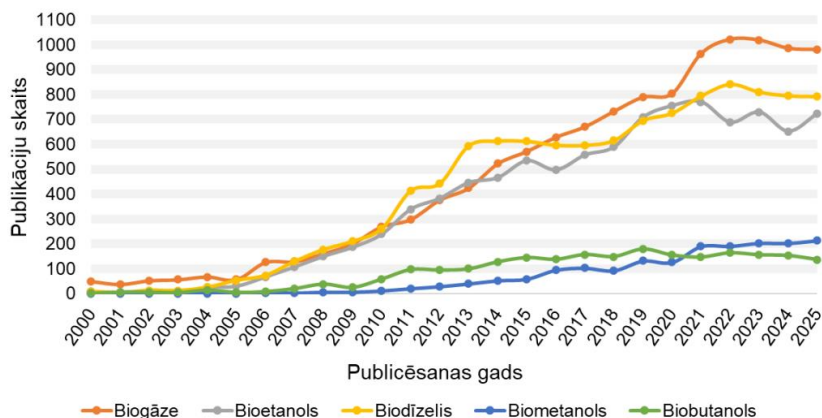
Pēc “Scopus” zinātniskās literatūras datubāzes datiem (sk. izmantotās metodes aprakstu 2.2.1. apakšnodaļā), kopš 21. gadsimta sākuma līdz 2026. gadam tika nopublicēti 550 119 zinātniskie izdevumi, kuros vismaz vienu reizi minēts vārds “biomass”. No tiem 116 186 zinātniskos izdevumos sastopas vārds “energy”, ar kuru saistīti 5 dažādi izpētes virzieni (sk.

1.14. att.): ilgtspējīga izmantošana un aprites cikla novērtēšana (sarkanais klasteris), enerģijas uzkrāšana un oglekļa uztveršana un uzglabāšana (angļu val. *Carbon sequestration* jeb *Carbon Capture and Storage* (CCS)) vai izmantošana (angļu val. *Carbon Capture and Utilization* (CCU)) (zilais klasteris), termiskās konversijas tehnoloģijas un to izpēte (zaļais klasteris), biomasas struktūra un sastāvs (dzeltenais klasteris) un biosistēmu tehnoloģijas (violetais klasteris). Atslēgvārdu struktūra parāda, ka biomasas enerģētikas pētniecībā tehnoloģiskais kodols ir veidojies ap kurināmā pārveidošanas procesiem un to vadību. To iezīmē tādi atslēgvārdi kā “*combustion*”, “*pyrolysis*”, “*gasification*”, “*temperature*”, “*kinetics*”, “*catalyst*”, “*oxygen*”, “*nitrogen*”, “*lignin*”, “*cellulose*” un “*lignocellulosic biomass*”, kas raksturo biomasu kā termiski pārveidojamu kurināmo un izejvielu. Šie virzieni ir saistīti ar jautājumiem, kas biomasas enerģētikā kļuva aktuāli vispirms: kā efektīvi pārveidot biomasu enerģijā, kā stabilizēt procesu, kā palielināt iznākumu un kā pielāgot tehnoloģiju konkrētai izejvielai. Līdzīgu tendenci norāda arī bibliometriskie pētījumi par bioenerģiju, kuros termiskās konversijas virzieni, īpaši pirolīze un gazifikācija, identificēti kā ilgstoši un intensīvi pētīti tehnoloģiskie virzieni, turklāt pirolīzes un gazifikācijas publikāciju skaita pieaugums īpaši izceļas pēc 2011. gada ²¹⁰. Savukārt atslēgvārdi “*sustainable development*”, “*sustainability*”, “*life cycle*”, “*environmental impact*”, “*circular economy*”, “*renewable energy*” un “*climate change*” iezīmē citu pētniecības slāni — biomasas izmantošanas vērtēšanu ne tikai pēc tehnoloģiskās iespējamības, bet arī pēc ietekmes uz vidi, resursu aprites un atbilstības klimata mērķiem. Šī tematika kļūst izteiktāka vēlāk, kad biomasas kā atjaunīga resursa izmantošanu vairs nepietiek pamatot tikai ar fosilā kurināmā aizvietošanu; nepieciešams pierādīt arī aprites cikla ieguvumu, emisiju samazinājumu un resursa izmantošanas ilgtspēju. To apstiprina Ferrari u. c. bibliometriskā analīze par biomasu bioenerģijas kontekstā, kurā konstatēts, ka bioenerģijas publikāciju skaits pieauga no 91 publikācijas 2000. gadā līdz 773 publikācijām 2019. gadā, vienlaikus pieaugot ar vides aspektiem saistīto pētījumu īpatsvaram no 7,3 % līdz 11,8 % ²¹¹.



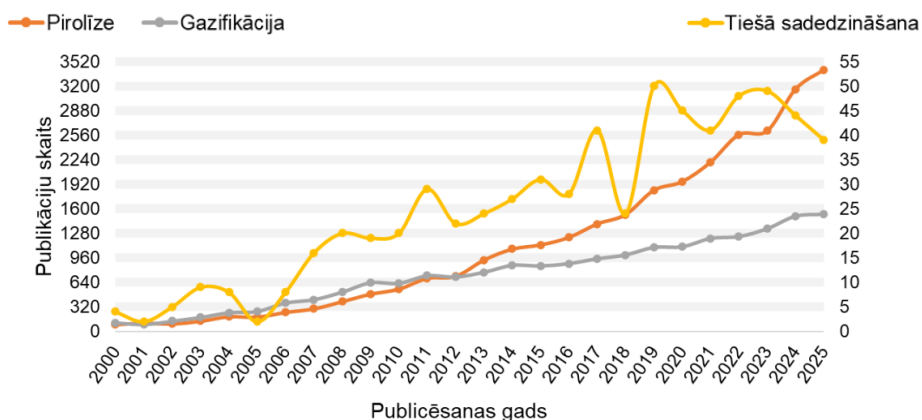
1.15. attēls. Ar biomasas tematiku saistīto publikāciju skaita pieaugums

Ilgspējīgas biomasas izmantošanas un aprites cikla novērtēšanas kontekstā biodeģvīelas ir viens no visbiežāk sastopamajiem pētījumu virzieniem. 1.16. attēlā redzams, ka biogāzes, bioetanola un biodīzeļa publikāciju skaits strauji pieaug, sākot aptuveni ar 2005.–2007. gadu, pēc tam sasniedzot augstu līmeni līdz 2021.–2022. gadam. Biogāzes tematika pieaug no 50 publikācijām 2000. gadā līdz 1021 publikācijai 2022. gadā un 980 publikācijām 2025. gadā, bioetanols sasniedz maksimumu 2021. gadā (770 publikācijas) un 2025. gadā ir 723, savukārt biodīzelis sasniedz maksimumu 2022. gadā (841 publikācijas) un 2025. gadā ir 792. Šo agrīno kāpumu var skaidrot ar tolaik dominējošo uzsvāru uz pirmās paaudzes biodeģvīelām kā praktiski pieejamu fosilā kurināmā aizvietošanu, kamēr stabilizāciju pēc 2022. gada loģiski pamato vairāku faktoru kopums: tradicionālās biodeģvīelas ir tehnoloģiski nobriedušas un to ilgtspējas ierobežojumi ir plaši dokumentēti, līdz ar to samazinās "jaunu" pētījumu pieplūdums tieši par bāzes ražošanas ķēdēm; vienlaikus politikas un finansējuma fokuss ES un citur pasaulē pakāpeniski pārorientējas uz uzlabotajām biodeģvīelām un zemu emisiju tehnoloģijām; turklāt straujā transporta elektrifikācija un zaļā ūdeņraža tehnoloģiju attīstība samazina biodīzeļa un bioetanola relatīvo lomu transporta dekarbonizācijā. Atšķirīga ir biometanola un biobutanola līkne: šo virzienu publikāciju skaits aug ar zemāku intensitāti, bet bez izteikta pīķa, kas norāda uz šaurāku industrijas ieviešanas bāzi un sarežģītāku tehnoloģisko ceļu, vienlaikus saglabājot pētniecības aktualitāti kā otrās/trešās paaudzes biodeģvīelu virzieniem ar potenciālu integrācijai biorafinērijū koncepcijā. Tādējādi perspektīvākie virzieni ir biometanols un biobutanols, kamēr biogāzes, bioetanola un biodīzeļa pētniecība pāriet no straujas izplešanās fāzes uz optimizācijas, ilgtspējas pierādīšanas un nišas pielietojumu jautājumiem.



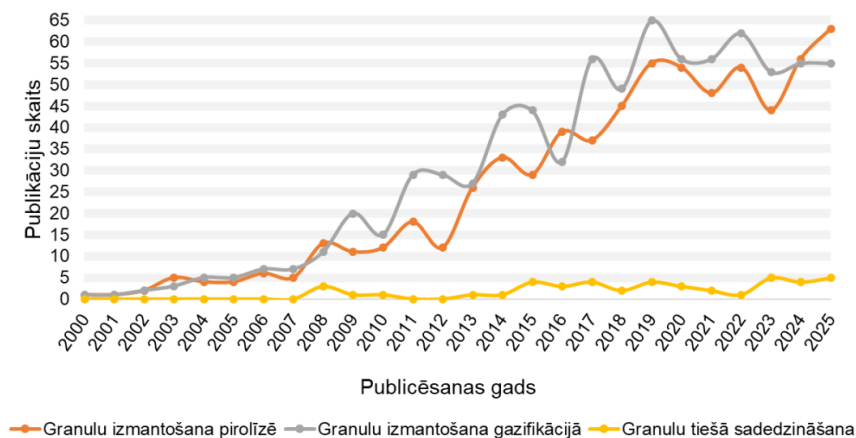
1.16. attēls. Ar biodegvielu saistīto publikāciju skaita pieaugums

Ar biomasu saistīto pētījumu skaits termiskās konversijas tehnoloģiju kontekstā pieaug (sk. 1.17. att.). Publikāciju skaits par pirolīzi pieaug visstraujāk un 2025. gadā sasniedz 3412, kamēr gazifikācija 2025. gadā sasniedz 1525, bet tiešā sadedzināšana saglabājas salīdzinoši zemā līmenī. Pirolīzes tematika no 88 publikācijām 2000. gadā aug līdz vairāk nekā 1000 publikācijām pēc 2014. gada un pēc 2018.–2020. gada pāriet straujā izaugsmes režīmā, kas norāda uz šīs tehnoloģijas nozīmes pieaugumu ne tikai enerģijas ieguvē, bet arī augstākas pievienotās vērtības produktu kontekstā. Gazifikācijas pieaugums ir vienmērīgāks, atspoguļojot tās pozīciju kā singāzes un turpmāko degvielu/ķīmisko produktu ceļu platformai. Tiešās sadedzināšanas publikāciju apjoms ir mazāks un ar nelielām svārstībām, kas ir saskanīgi ar tehnoloģijas briedumu un salīdzinoši zemāku inovācijas potenciālu, ja pētījums aprobežojas ar klasisku sadegšanas pielietojumu. Tendences norāda uz šo virzienu perspektīvu attīstību — dominējošas ir pirolīze un gazifikācija, savukārt tiešā sadedzināšana vairāk saglabā nozīmi kā inženiertehniskās optimizācijas un emisiju kontroles temats.



1.17. attēls. Ar biomasas sadedzināšanu, pirolīzi un gazifikāciju saistīto publikāciju skaita pieaugums

Termiskās konversijas tehnoloģijās biomasas visbiežāk tiek izmantota nepārstrādātā formā, ņemot vērā, ka tās visbiežāk izpaužas lielas jaudas iekārtās ar augstu veiktspēju un ātrāku kurināmā patēriņu. Savukārt mazas jaudas iekārtās biežāk biomasu pielieto granulu veidā. Publikāciju skaits par granulu izmantošanu pirolīzē un gazifikācijā kopš 2007.–2010. gada būtiski pieaug (sk. 1.18. att.). Tajā pašā laikā granulu tiešā sadedzināšana visā periodā saglabājas ar ļoti zemu publikāciju skaitu, t.i., būtiski atpaliek no pirolīzes un gazifikācijas virzieniem. Šī pretruna ir būtiska: praktiskajā siltumapgādē granulas ir plaši izmantots kurināmais, tomēr tiešās sadedzināšanas pētījumu skaits bibliometriskajā griezumā ir mazs, kas norāda uz diviem faktoriem: tiešā sadedzināšana kā tehnoloģija ir nobriedusi un pētījumu jauninājumi bieži tiek publicēti citās atslēgvārdu kombinācijās, un pētniecības fokuss granulu kontekstā arvien vairāk virzās uz konversijas tehnoloģijām, kur granulu forma ir priekšrocība izejvielu homogenizācijai, dozēšanai un procesa stabilitātei. Granulu tiešās sadedzināšanas kontekstā perspektīva pētniecības niša ir tieši alternatīvo granulu integrācija, jo tieši šeit praksē pastāv liels pielietojuma mērogs, bet zinātniskā aktivitāte pēc publikāciju skaita ir nesamērīgi zema.



1.18. attēls. Ar biomasas granulu sadedzināšanu, pirolīzi un gazifikāciju saistīto publikāciju skaita pieaugums

Koksnes granulu nozare pēdējo divu desmitgadu laikā ir piedzīvojusi strauju izaugsmi: 2000. gadā pasaulē tika saražoti tikai ap 2 Mt biomasas granulu ²¹², 2015. gadā ražošanas apjoms pārsniedza 25 Mt ²¹³, bet 2020. gadā tas jau bija virs 40 Mt ²¹⁴. Vienlaikus granulu tirgus struktūru būtiski ietekmē valstu atšķirīgās ražošanas un patēriņa proporcijas. Latvijā līdz 90 % saražoto granulu tiek eksportētas, bet tikai ap 10 % tiek patērētas lokālajā tirgū ²¹⁵. Pretēja situācija ir Apvienotajā Karalistē, kur ap 95 % nepieciešamo granulu tiek importētas, bet vietējā ražošana veido tikai ap 5 % ²¹⁶. Nozares paplašināšanās gaitā tirgū salīdzinoši īsā laikā ienāk arī jauni ražotāji, demonstrējot konkurētspējīgas piegādes ķēdes; kā piemēru var minēt Brazīliju, kur pēdējos gados ir bijis būtisks biomasas granulu ražošanas pieaugums ²¹⁷. Koksnes

granulas ražo no mežrūpniecības atlikumiem (~ 63 %), stumbra koksnes (~ 34 %) un mežsaimniecības atlikumiem (~ 3 %) ²¹⁸.

Latvijā pēdējo 20 gadu laikā koksnes granulu ražošana ir augusi īpaši strauji un valsts ir kļuvusi par otru lielāko granulu ražotāju Eiropā aiz Vācijas ²¹⁶. 2020. gadā Latvijā saražoja 2264 kt koksnes granulu ²¹⁹, tomēr 2022. gadā bija vērojams būtisks importa un ražošanas kritums. Paralēli ražošanai pieaudzis arī lokālais patēriņš: 2008. gadā Latvijā tika patērēti 16 kt koksnes granulu, savukārt 2022. gadā patēriņš sasniedza 194 kt. Visizteiktākais pieaugums sākās 2012. gadā (136 kt), kad patēriņš palielinājās vairāk nekā 4 reizes salīdzinājumā ar 2011. gadu. Turpmākajos gados, izņemot 2013. gadu (96 kt), patēriņš svārstījās, bet saglabājās relatīvi stabilā diapazonā 138-194 kt, kas liecina par noturīgu pieprasījumu pēc šī energoresursa Latvijā. 2022. gadā no kopējā granulu patēriņa lielākais īpatsvars bija māsaimniecībām (56 %), kam sekoja komerciālais un publiskais sektors (26 %), bet atlikusī daļa tika izmantota rūpniecībā, būvniecībā, transformācijas sektorā un citās nozarēs. ²²⁰

Salīdzinājumā ar koksnes granulām alternatīvās biomasas granulu piedāvājums un pieejamie apjomi Latvijā ir būtiski mazāki. Mazumtirdzniecībā atsevišķos gadījumos ir pieejamas granulas no lauksaimniecības atlikumiem, piemēram, no saulespuķu sēnalām (imports no Ukrainas), griķu sēnalām un salmiem, kā arī maistījumi, piemēram, kūdras un koksnes granulas vai 100 % kūdras granulas. Šo produktu cenu diapazons ir aptuveni 136-200 EUR/t, kas ir zemāks nekā koksnes granulu cenu līmenis, kurš parasti ir 200-300 EUR/t. Latvijas tirgū granulu sertifikācija ir brīvprātīga; pieejamie dati rāda, ka Latvijā ir 16 sertificēti granulu ražotāji (2024. gada dati) ²²¹. Vienlaikus jāņem vērā, ka daļu no Latvijā patērētajām granulām veido imports. Iepriekšējā desmitgadē nozīmīgākie importa partneri bija Baltkrievija, Krievijas Federācija un Lietuva, taču 2022. gadā imports no Baltkrievijas un Krievijas Federācijas būtiski samazinājās un 2023. gada janvāris-jūlijs periodā imports no Baltkrievijas un Krievijas Federācijas tika apturēts ^{222,223}. Latvijas granulu tirgū dominē koksnes granulas, kas ražotas no skujkoku un lapkoku zāģskaidām (kokapstrādes blakusprodukts), tomēr daļa ražotāju izmanto arī mazvērtīgu apaļkoksni vai koksnes šķeldu. Pārsvārā tiek ražotas ENplus A1 kvalitātes granulas, kas paredzētas māsaimniecībām, savukārt lielāki uzņēmumi ražo arī ENplus A2 kvalitātes granulas industriālajam sektoram.

Energoresursu cenu dinamika Latvijā 2012–2021 periodā kopumā bija svārstīga ²²⁴, bet 2022. gadā gandrīz visiem kurināmajiem bija vērojams straujš cenu pieaugums, īpaši dabasgāzei. 2022. gadā dabasgāzes cena pieauga par 207 % un sasniedza 108,1 EUR/MWh (salīdzinājumā ar 35,1 EUR/MWh 2021. gadā). Koksnes atlieku cena pieauga par 140 % (no 13,4 līdz 32,2 EUR/MWh), savukārt malkas un koksnes šķeldas cenas pieauga par 119 % un 100 %, attiecīgi. Koksnes granulu cena pieauga par 35 %: 2021. gadā 1 MWh cena bija 27,2 EUR, bet 2022. gadā 36,8 EUR. Salmu granulu cena 2019. gadā bija 21,7 EUR/MWh, bet 2022. gadā tā pieauga par 231 %, sasniedzot 71,99 EUR/MWh, kas pamatojam ar tirgus pielāgošanos pieprasījumam, nevis ar strauju kvalitātes kāpumu. 2022. gada cenu šoks, īpaši dabasgāzes straujais sadārdzinājums, parādīja, kāpēc koksnes granulas Latvijas apstākļos ir perspektīvs kurināmais. Vienlaikus alternatīvo granulu plašāku integrēšanu tirgū ierobežo ne tik daudz to pieejamība vai cena, cik kvalitātes stabilitāte un atbilstības pierādīšana. Šos tehniskos ierobežojumus pastiprina sertificēšanas faktors. Tādējādi granulu kurināmais kopumā saglabā

augstu potenciālu kā lokāli pieejams un tehnoloģiski vadāms AER risinājums, bet alternatīvo granulu izplatību nosaka spēja nodrošināt reproducējamu kvalitāti un sertificējamu atbilstību.

1.2.3. Likumdošanas aspekti biomasas pielietošanā siltumenerģijas ražošanai

ES kopš 21. gadsimta sākuma ir būtiski paplašinājusi normatīvo bāzi, ieviešot tiesību aktus, kuru mērķis ir mazināt cilvēka darbības radīto ietekmi uz vidi. Šie akti aptver plašu loku — no dabas resursu aizsardzības līdz piesārņojuma un citu antropogēno slodžu mazināšanai. ES mērķi un prasības parasti tiek noteikti divos galvenajos normatīvo aktu veidos — direktīvās un regulās²²⁵. Direktīva nosaka sasniedzamos mērķus, bet dalībvalstis pašas izstrādā nacionālos normatīvos aktus šo mērķu īstenošanai. Regula ir tieši piemērojams un obligāts tiesību akts visās dalībvalstīs; tā parasti precizē izpildes kārtību, nosaka metodiku vai vienotus kritērijus, tādējādi papildinot direktīvu noteikumus.

Galvenais politikas dokuments, kas nosaka virzību uz ilgtspējīgu nākotni, ir Eiropas zaļais kurss (angļu val. *European Green Deal*)²²⁶. Tas apstiprināts 2020. gadā un nosaka virsmērķi — padarīt ES klimatneitrālu līdz 2050. gadam; mērķis nostiprināts saistošajā “*European Climate Law*”²²⁷. EGD iekļauts Arites ekonomikas rīcības plāns (angļu val. *Circular Economy Action Plan*)²²⁸ — tā galvenais mērķis ir paaugstināt arites ekonomikas principu izplatīšanu un pielietošanu dažādās nozarēs. Arites ekonomika ir domāšanas veids, kas ir izveidots kā lineārās ekonomikas aizstājējs, kur visi atkritumi tiek uzskatīti par blakusproduktiem un tos ir iespējams izmantot kā izejvielas produktu ar augstu pievienoto vērtību ražošanai^{229–231}. Tas veicinās ekonomisko izaugsmi un paaugstinās labklājības līmeni²³². Līdz 2030. gadam plānots par 50 % samazināt augu barības vielu zudumus, vienlaikus nesamazinot augsnes auglību, kas nozīmē vismaz par 20 % mazināt minerālmēslu izmantošanu. Ņemot vērā lielo fosilās enerģijas patēriņu mēslošanas līdzekļu ražošanā, EK ir noteikusi mērķi par 30 % samazināt neatjaunojamo resursu izmantošanu šajā ražošanā, tādēļ tiek veicināta barības vielu aizstāšana minerālmēslos ar barības vielām no atkritumproduktiem. Īpaša uzmanība jāpievērš tam, lai šie blakusprodukti tiktu atgriezti kultūraugu audzēšanas ciklā, laukos, no kuriem barības vielas iepriekš tika iznestas ar ražu.

Atjaunojamo energoresursu direktīva (angļu val. *Renewable Energy Directive (RED)*) (Direktīva (ES) 2018/2001) noteica sākotnējo 2030. gada AER mērķi (vismaz 32 % no ES bruto galapatēriņa) un kalpoja par regulatīvo pamatu atjaunojamās enerģijas attīstībai ES. “Fit for 55” un REPowerEU ietvara dēļ RED II tika pārskatīta, lai saskaņotu enerģētikas politiku ar vismaz 55 % SEG samazinājumu līdz 2030. gadam un paātrinātu atkarības no Krievijas Federācijas fosilo resursu mazināšanu; jaunā RED III (Direktīva (ES) 2023/2413) paaugstina kopējo mērķi līdz vismaz 42,5 %, ievieš paātrinātas atļauju procedūras un skaidrus sektoru apakšmērķus²³³. RED III pastiprina prasības transportam (dalībvalstis izvēlas: vismaz 29 % AER gala patēriņā vai 14,5 % SEG intensitātes samazinājumu līdz 2030. gadam, kā arī kombinēts apakšmērķis 5,5 % apjomā biodegvielām un atjaunojamam ūdeņradim, tādējādi paplašinot šo degvielu lomu un izsekojamību. Tiek ierobežota atbalsta un uzskaites piemērošana noteiktām koksnes plūsmām (industriālajam apaļkokam, celmiem un saknēm) un tieši aizliegta elektroenerģijas ražošanas atbalstīšana nekoģenerācijas iekārtās²³⁴. RED III arī nosaka stingras “no-go” teritorijas, aizliedzot izmantot biomasu no primārajiem, veciem un bioloģiski daudzveidīgiem

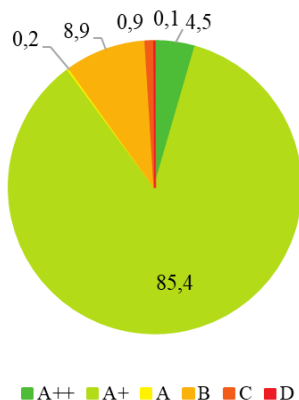
mežiem, kā arī no mitrājiem un kūdrājiem ²³⁵. RED III nostiprina kaskādēšanas principu, nosakot, ka meža biomasu enerģijā drīkst izmantot tikai gadījumos, kad nav iespējamas augstvērtīgākas materiālās izmantošanas iespējas ²³⁶. Svarīgi piebilst, ka RED II un RED III turpina pastāvēt kā aktīvas direktīvas, tāpēc ar ilgtspēju saistītos pētījumos biežāk atsaučās uz RED II, jo tā sniedz padziļinātu metodoloģisko bāzi par biokurināmā un biodegvielu novērtējumu.

Prasības ISA un CSA izmantojamiem katliem

ISA parasti izmanto mazas jaudas apkures katlus, tādēļ šādu iekārtu ieviešanu un tirgošanu ES regulē ekodizaina un energomarķējuma prasības. Direktīva 2009/125/EK veido vispārējo ekodizaina ietvaru enerģiju patērējošām un ražojošām iekārtām, savukārt Regula (ES) 2015/1189 nosaka konkrētas prasības cietā kurināmā katliem, tostarp energoefektivitātes un emisiju robežvērtības. Papildus tam Regula (ES) 2017/1369 un Komisijas Regula (ES) 2015/1187 nosaka energomarķējuma prasības, kas nodrošina standartizētu informāciju galalietotājiem par katlu energoefektivitāti. ^{237,238}

Gan ekodizaina, gan energomarķējuma prasības attiecas uz gadījumiem, kad iekārta darbojas ar ražotāja norādīto ieteicamo kurināmo. Granulu katlu gadījumā tas parasti ir kokskaidu granulas. Regula neattiecas uz nekoksnes biomasas katliem, koģenerācijas katliem līdz 50 kW, gaisa uzsildes katliem un dzeramā vai saimnieciskā ūdens uzsildes katliem. Tomēr, ja ražotājs norāda, ka katlā iespējams izmantot arī citu kurināmo, uz šādu kurināmo attiecas tās pašas efektivitātes un emisiju prasības. Tas ir būtisks ierobežojums alternatīvā kurināmā izmantošanai mazas jaudas katlos, jo arī zemākas kvalitātes vai nekoksnes granulu gadījumā jānodrošina atbilstība ekodizaina regulā noteiktajām robežvērtībām.

Kopš 2022. gada maija ES darbojas centralizēta datubāze (Eiropas energoefektivitātes marķējuma reģistrs (angļu val. *European Product Registry for Energy Labelling* (EPREL)), kurā apkopota informācija par dažāda veida enerģiju ražojošām un patērējošām iekārtām un kura izveidota lai kontrolētu Regulas (ES) 2017/1369 prasības ²³⁹. Datubāzē ir reģistrēti vairāk nekā 3000 katlu modeļu, kas atbilst energomarķējuma regulā noteiktajām prasībām, taču faktiski ES tirgū pieejami aptuveni 2200 modeļu ²⁴⁰. Saskaņā ar datubāzes statistiku (sk. 1.19. att.), šobrīd ES tirgū nav neviena cietā kurināmā katla ar augstāko energoefektivitātes klasi A⁺⁺⁺, savukārt A⁺ klases katli veido lielāko daļu tirgus (85,4 %). Datubāzē iekļauti katli ar nominālo jaudu līdz 70 kW. EPREL sadaļai, kurā atrodama informācija par mazas jaudas cietā kurināmā katliem, ir divi būtiski trūkumi. Pirmkārt, datubāzē nav meklēšanas rīka katlu atlasei pēc izcelsmes valsts. Tas var apgrūtināt patērētājam izvēli, tomēr katla informācijas lapā ir norādīta ražotāja juridiskā adrese. Otrkārt, visi cietā kurināmā katli tiek apkopoti vienā kategorijā, bez detalizētas kurināmā veida klasifikācijas. Tā rezultātā patērētājam bieži pašam jānoskaidro, kāds kurināmais ir piemērots konkrētajam katlam — informācija jāpieprasa no ražotāja vai jāmeklē garantijas noteikumos. Ja būtu iespējams atlasīt katlus pēc izmantotā kurināmā tipa, patērētāji varētu labāk plānot nepieciešamo kurināmo, ņemot vērā tā pieejamību konkrētajā valstī.



1.19. attēls. Cietā kurināmā katlu sadalījums ES tirgū pa energoefektivitātes klasēm (2025. gadā)

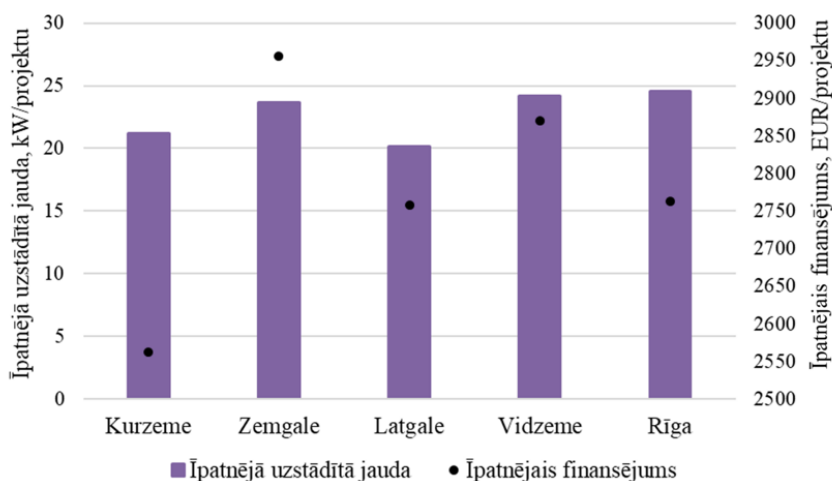
CSA parasti izmanto lielākas jaudas sadedzināšanas iekārtas, kuru radītais gaisa piesārņojums tiek regulēts citā normatīvajā ietvarā. ES līmenī vidējas jaudas sadedzināšanas iekārtām piemērojama Direktīva (ES) 2015/2193 par noteiktu piesārņojošo vielu emisiju ierobežošanu gaisā no vidējas jaudas sadedzināšanas iekārtām. Latvijā šīs prasības ieviestas ar MK noteikumiem Nr. 17 “Noteikumi par gaisa piesārņojuma ierobežošanu no sadedzināšanas iekārtām”²⁰⁴. Noteikumi nosaka kārtību, kādā novērš, ierobežo un kontrolē sadedzināšanas iekārtu radītās emisijas, nosaka īpašas vides prasības, monitoringa un ziņošanas kārtību, kā arī sabiedrības informēšanas nosacījumus. Noteikumi nosaka emisiju ierobežošanas, kontroles, monitoringa un ziņošanas kārtību, kā arī īpašas vides prasības sadedzināšanas iekārtām. Prasības ir atkarīgas no iekārtas jaudas, izmantotā kurināmā un iekārtas statusa. Sadedzināšanas iekārtas iedala mazas, vidējas un lielas jaudas grupās, bet vidējas jaudas iekārtām piemērojamās robežvērtības pakāpeniski kļūst stingrākas. Cietā kurināmā iekārtām ar jaudu 5–50 MW stingrākas prasības piemērojamas no 2025. gada, savukārt 1–5 MW iekārtām — no 2030. gada. Ja emisiju robežvērtības netiek izpildītas, operatoram jānodrošina atbilstība ar kurināmā kvalitātes kontroli, iekārtas darbības režīma uzlabošanu, dūmgāzu attīrīšanas risinājumiem vai citiem tehniskiem pasākumiem; pretējā gadījumā iekārtas darbība var neatbilst piesārņojošās darbības atļaujas nosacījumiem.

Biomases izmantošanas nosacījumi un atbalsta mehānismi Latvijā

Pašlaik Latvijā novērojams būtisks potenciālais pieaugums koksnes biomasas izmantošanā siltumenerģijas sektorā, kas vienlaikus rada arī politisku nepieciešamību pēc risinājumiem, kuri veicinātu racionālāku koksnes izmantošanu. Mērķis ir stiprināt sadarbību starp meža resursu īpašniekiem, siltumenerģijas ražošanas jaudu turētājiem un lielāko patēriņa jaudu lietotājiem, veidojot pilnu enerģijas ciklu un attīstot mazas un vidējas jaudas koģenerācijas stacijas centrālajās siltumapgādes sistēmās lielajās pilsētās.

Latvijas Bioekonomikas stratēģijā ^{241,242} uzsvērts, ka nozīmīga uzmanība jāpievērš augstas efektivitātes iekārtu un tehnoloģiju izmantošanai, kas samazina gaisa piesārņojumu un ļauj lietot dažādu veidu biomasas kurināmo. Tā kā šobrīd noteikts, ka biomasas izmantošana enerģijas ražošanā jāveicina saskaņā ar kaskādēšanas principu, par prioritāri izmantojamiem resursiem kļūst tie lauksaimniecības un mežsaimniecības produkti, kas vairs nav nepieciešami ražošanā un kurus nav iespējams izmantot augstas pievienotās vērtības produktu veidošanai (atkritumi un blakusprodukti). Stratēģijā uzsvērts, ka svarīgi biomasas izmantošanu plānot vietās, kur lauksaimniecības zemes nav piemērotas citu augstas pievienotās vērtības kultūru audzēšanai. Lai mazinātu biomasas transportēšanas izmaksas, nepieciešama sadarbība ar tuvākajām pašvaldībām, nodrošinot iespēju izmantot vietējos biomasas resursus enerģijas ražošanai.

Latvijā tiek īstenotas vairākas programmas, kuru mērķis galvenokārt ir veicināt energoefektivitāti privātajā sektorā. Visas programmas tiek finansētas no valsts budžeta dotācijām, un to īstenošanā iesaistītas trīs institūcijas — Viedās administrācijas un reģionālās attīstības ministrija (VARAM), Ekonomikas ministrija (EM) un Klimata un enerģētikas ministrija (KEM). Populārākā un aktīvākā valsts atbalsta programma šobrīd ir Emisijas kvotu izsolišanas instruments (EKII) ²⁴³. EKII regulāri izsludina projektu konkursus, kuros maksimālais atbalsta apjoms sasniedz 15 000 EUR. Šīs programmas ietvaros māsaimniecībās tiek uzstādīti daudzi koksnes biomasas katli (galvenokārt granulu katli) ar jaudu līdz 50 kW. EKII finansējums tiek nodrošināts, izsolot Latvijai piederošās ES emisijas kvotas tirdzniecības sistēmā, pamatojoties uz Regulu (ES) 2023/2830 ²⁴⁴. EKII darbību regulē spēkā esošie normatīvie akti, tostarp likums “Par piesārņojumu” ²⁴⁵ un MK noteikumi Nr. 657 ²⁴⁶, kas nosaka Latvijai piešķirto kvotu izsolišanas kārtību. 1.20. attēlā parādīta EKII finansējuma sadale biomasas katlu uzstādīšanas projektiem pa Latvijas reģioniem.



1.20. attēls. Infografika par Latvijā īstenotiem mazas jaudas granulu katlu projektu finansējuma atbalstu

Programmu ietvaros mājāsaimniecībās visbiežāk tiek uzstādīti katli ar nominālo jaudu no 20 līdz 25 kW. Finansējuma apjoms vienam projektam dažādos reģionos atšķiras. Viszemākais vidējais atbalsts ir Kurzēmē — mazāk nekā 2550 EUR par projektu, savukārt Zemgalē tas ir vislielākais — aptuveni 2950 EUR par projektu.

Zaļā iepirkuma ietekme uz siltumenerģijas transformācijas tehnoloģijas izvēli

ES dalībvalstīs pastāv sistēma, kurā publiskās institūcijas (piem., izglītības iestādes, muzeji, pašvaldības u. c.) var iegādāties aprīkojumu, materiālus un pakalpojumus, saskaņojot to ar attiecīgo iestādi vai struktūrvienību. Ja paredzamā iepirkuma summa pārsniedz noteiktu sliekšni, ir jāveic publiskais iepirkums ²⁴⁷. Šāds iepirkuma mehānisms nodrošina tirgus konkurenci un palīdz izvēlēties tehniski un ekonomiski piemērotāko risinājumu. Iepirkuma nolikumos var iekļaut dažādus kritērijus, kas aptver gan tehniskos, gan vides, gan ekonomiskos aspektus. 2022. gadā ES Padome uzsvērusi publisko iepirkumu būtisko lomu ilgtspējīgas attīstības mērķu īstenošanā un nepieciešamību integrēt šos mērķus publiskajā pārvaldībā ²⁴⁸. Viens no instrumentiem, kas ļauj publiskām institūcijām sasniegt vides mērķus, ir Zaļais publiskais iepirkums (ZPI) ^{247,249}. Tas ir iepirkuma veids, kurā tiek izvēlēti produkti vai pakalpojumi ar mazāku ietekmi uz vidi to aprites cikla laikā. ZPI uzskatāms par inovācijas iepirkuma formu un uz rezultātu orientēto instrumentu, kas veicina videi draudzīgu tehnoloģiju ienākšanu tirgū. Praktiski tas nozīmē, iepirkumos iekļaujot brīvprātīgos standartus un ekomarķējumus, kuri veicina konkurenci starp piegādātājiem un atbalsta videi draudzīgāko risinājumu izplatību. ZPI, tostarp katlu iepirkums pašvaldību vajadzībām, šobrīd nav obligāts, taču tas ir efektīvs rīks alternatīvu izvērtēšanai un ļauj iegādāties nevis lētāko, bet videi draudzīgāko aprīkojumu.

VARAM tīmekļvietnē norādīts, ka publiskais iepirkums veido aptuveni 17 % no Latvijas IKP (salīdzinot ar vidēji 19 % ES), kas nozīmē ievērojamu ietekmi uz preču un pakalpojumu tirgu ²⁵⁰. Šī iemesla dēļ pieņemti MK noteikumi Nr. 353 ²⁵¹, kas nosaka ZPI kritērijus un preču un pakalpojumu grupas, kurās šie kritēriji ir obligāti vai piemērojami brīvprātīgi. MK noteikumi Nr. 353 paredz prasības biomasas katliem, kas, galvenokārt, ir integrēti no ekodizaina un energomarķējuma regulām. ZPI veicināšanai VARAM ir izstrādājusi ZPI aprites cikla izmaksu kalkulatoru, kas palīdz salīdzināt dažādu enerģiju patērējošu iekārtu izmaksas ekspluatācijas laikā ²⁵². Tomēr kalkulatorā nav iekļauta sadaļa par biomasas katliem, kas apgrūtina ilgtspējīga produkta izvēli iepirkuma procesā.

1.2.4. Alternatīvās biomasas ilgtspēja

Mūsdienās aktīvi notiek stratēģiju izstrāde un ieviešana attiecībā uz iespējām samazināt nepārstrādājamo atkritumu daudzumu vai vispār izvairīties no atkritumu veidošanas, piem., ieviešot “zero waste” pieeju ²⁵³. Šādās aktivitātēs iesaistās ne tikai vairāku valsts valdības pārstāvji, bet arī pasaulē atpazīstamie konglomerāti ²⁵⁴. Tādēļ kurināmajam, papildus tehniski-ekonomiskiem parametriem, vērā ņemta arī ilgtspēja.

Biomasas ilgtspēja ES tiesiskajā ietvarā netiek pieņemta automātiski, jo tās izmantošana enerģētikā ir saistīta ne tikai ar atjaunojamības faktu, bet arī ar prasību pierādīt, ka konkrētais

kurināmais sniedz reālu ieguldījumu klimata un vides mērķu sasniegšanā. Tieši šā iemesla dēļ RED II un tās grozījumi RED III nosaka juridisko ietvaru, pēc kura vērtē, vai meža biomasas un cietās biomasas kurināmie drīkst tikt ieskaitīti atjaunojamās enerģijas mērķu izpildē, izmantoti atbilstības pierādīšanai un saņemt publisku atbalstu. Direktīvas centrālā loģika paredz, ka biomasas tiek uzskatīta par ilgtspējīgu tikai tad, ja ir izpildīti gan ilgtspējas kritēriji attiecībā uz izejvielu izcelsmi un ieguvu, gan siltumnīcefekta gāzu emisiju ietaupījuma kritēriji visā attiecīgajā aprites ciklā. Vērtējums balstās uz diviem pamatprincipiem. Pirmkārt, jānodrošina pierādāms SEG emisiju samazinājums salīdzinājumā ar atbilstošu fosilo etalonu, aprēķinot emisijas aprites ciklā; samazinājumu rēķina pret 80 gCO_{2ekv}/MJ, kas, atbilstoši RED II Pielikumam VI ²⁵⁵, attiecas tikai uz lietderīgās enerģijas (siltuma vai aukstuma) ražošanu stacionārās iekārtās. Jaunām iekārtām, kas sāk darbu no 2021. gada, ir jānodrošina vismaz 70 % SEG ietaupījums, savukārt no 2026. gada — vismaz 80 % ietaupījums. Otrkārt, izejvielu izcelsmei jāatbilst vides aizsardzības prasībām: meža biomasas nedrīkst nākt no primāriem vai veciem mežiem, bioloģiski augstvērtīgām teritorijām, mitrājiem un kūdrājiem, kā arī no zemēm ar augstiem oglekļa krājumiem, un mežsaimniecībai jāatbilst nacionālajiem noteikumiem un “Zemes, zemes izmantošanas maiņas un mežsaimniecības saistību” prasībām. ES dalībvalstis drīkst ieviest stingrākus nacionālos ierobežojumus (piem., noteiktām koku sugām/koksnes veidiem vai atbalsta nosacījumiem).

Praksē RED II un RED III ilgtspējas un SEG ietaupījumu kritēriju izpildi visbiežāk pierāda ar EK atzītām brīvprātīgajām sertifikācijas shēmām, kuras auditē visu piegādes ķēdi un tādējādi nodrošina, ka biomasas kurināmie var tikt ieskaitīti mērķos un atbalsta mehānismos tikai tad, ja tie atbilst direktīvas prasībām ²⁵⁶. Viena no šādām shēmām ir Ilgtspējīgu resursu verifikācijas shēma (angļu val. *Sustainable Resources Verification Scheme* (SURE)), kas ir izveidota, lai apliecinātu atbilstību RED II 29. panta ilgtspējas nosacījumiem cietajiem un gāzveida biomasas kurināmajiem, aptverot lauksaimniecības un mežsaimniecības biomasu, kā arī biomasas atkritumus un atlikumus, un organizējot trešās puses auditus visā ķēdē no izcelsmes līdz izmantošanai elektroenerģijas, siltuma un aukstuma ražošanā ²⁵⁷. Paralēli SURE būtiska loma industriālās koksnes biomasas tirgū ir Ilgtspējīgas biomasas programma (angļu val. *Sustainable Biomass Program* (SBP)), kura oficiāli atzīta ar Komisijas Īstenošanas lēmumu (ES) 2024/3191 kā brīvprātīgā shēma atbilstības pierādīšanai biomasas kurināmajiem RED II ietvarā, kas nodrošina tiesisku pamatu tās izmantošanai atbilstības demonstrēšanā (t. sk. SEG ietaupījumu prasībām) ²⁵⁸. SBP metodiskā pieeja balstās uz izsekojamību un atbildīgas iegūšanas prasībām. Shēmu praktisko izplatību ilustrē SBP publicētie nozares apkopojumi: 2025. gadā SBP-sertificētās biomasas saražotais un pārdotais apjoms sasniedza 22,80 Mt (no tiem 15,90 Mt granulas un 6,90 Mt šķelda), sertifikātu turētāju skaits pieauga no 340 līdz 405 organizācijām, un SBP-sertificētā biomasas veidoja 89,1 % Eiropas industriālo granulu patēriņa, kas norāda uz shēmas de facto dominanci tieši industriālajā segmentā ²⁵⁹.

Ilgtspējas pierādīšanas kontekstā papildus RED prasībām būtisku nozīmi iegūst arī ES Taksonomijas regula ²⁶⁰, kas izveido vienotu ietvaru tam, kā noteikt vai saimnieciskā darbība ir uzskatāma par vides ziņā ilgtspējīgu. Regula paredz, ka saimnieciskā darbība ir uzskatāma par ilgtspējīgu, ja tā (1) būtiski sekmē vismaz vienu no sešiem vides mērķiem, (2) nerada būtisku kaitējumu pārējiem vides mērķiem, (3) atbilst minimālajām sociālajām garantijām

(piem., darba aizsardzība un cilvēktiesības) un (4) izpilda tehniskās pārbaudes kritērijus (technical screening criteria), kas konkretizēti deleģētajos aktos. Mežsaimniecības kontekstā tas nozīmē, ka “Meža apsaimniekošana” vai citas saistītās darbības ilgtspēja netiek pieņemta automātiski — tā ir jāpamato ar pierādījumiem par būtisku ieguldījumu vides mērķos un vienlaikus par kaitējuma neesamību citās dimensijās. Praksē (1)–(3) kritēriji biežāk tiek pierādīti ar kvalitatīviem dokumentiem un vadības sistēmām, bet (4) kritērijs parasti prasa kvantitatīvi pārbaudāmus rādītājus un atbilstību konkrēti definētām robežvērtībām. Vienlaikus jāatzīmē, ka Taksonomijas regulējums neparedz vienotu, universālu metodiku visu kritēriju izpildei visos gadījumos — saimnieciskās darbības veicējs ir atbildīgs par datu kvalitāti, izsekojamību un pierādījumu pietiekamību, lai atbilstību varētu pārbaudīt audita vai uzraudzības ietvarā.

Papildus normatīvajai atbilstībai kurināmo savstarpējai izvērtēšanai literatūrā plaši tiek izmantotas salīdzināšanas pieejas, kas ļauj analizēt tehniskos, ekonomiskos, vides un sociālos aspektus. Aprites cikla analīze tiek lietota ar kurināmo saistīto ietekmes uz ar vidi saistītiem kritērijiem novērtēšanai. Šī pieeja ir piemērota gan granulu, gan šķeldas plūsmu novērtēšanai, jo sistēmas robežās var iekļaut izejvielu sagatavošanu, pārstrādi un transportu, identificējot dominējošos ietekmes posmus (piem., šķeldas ķēdē būtisku ieguldījumu var dot šķeldošana un mehanizētā savākšana, un rezultāti ir jūtīgi pret transporta attālumu) ^{261,262}. Aprites cikla analīzi var papildināt ar ekonomisko un sociālo novērtējumu, tomēr kompleksai novērtēšanai pētniecībā arvien biežāk tiek izmantota daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas analīze, kas ļauj prioritizēt alternatīvas atbilstoši izvēlētiem kritērijiem ²⁶³. Šīs pieejas ir izmantotas arī koksnes biomasas enerģētikas kontekstā: publicēti pētījumi, kuros daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas analīze tiek kombinēta ar aprites cikla analīzi, lai salīdzinātu kurināmo alternatīvas pēc efektivitātes, izmaksām un ietekmes rādītājiem, tostarp izvērtējot koksnes granulas līdzās citām koksnes kurināmā formām māsasaimniecību siltumapgādē ^{264,265}. Atsevišķi pētījumi ir veltīti tieši granulu savstarpējai salīdzināšanai, kas metodoloģiski parāda, ka pat vienas produktu grupas ietvaros “labākais” risinājums nav viennozīmīgs un ir atkarīgs no kritēriju kopas un lēmumu pieņēmēju (ekspertu un lietotāju) viedokļa ²⁶⁶.

1.3. Literatūras analīzes kopsavilkums

Pirmajā nodaļā pamatota alternatīvās biomasas kurināmo izpētes aktualitāte siltumenerģijas ražošanas kontekstā. Biomasas izmantošana sākotnēji aplūkota oglekļa aprites cikla, siltumnīcefekta un antropogēno emisiju kontekstā, uzsverot, ka kurināmā izvēle ir saistīta ne tikai ar enerģijas ieguvu, bet arī ar siltumnīcefekta gāzu emisiju mazināšanu. Lai gan biomasas atšķiras no fosilajiem kurināmajiem ar oglekļa iesaisti īsākā aprites ciklā, tās ilgtspēja nav pieņemama automātiski, jo to nosaka izejvielu izcelsme, apstrāde, transportēšana, siltumenerģijas transformācijas 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. Latvijā biomasas izmantošanu veicina vietējo energoresursu pieejamība, fosilo kurināmo cenu svārstības, nepieciešamība mazināt importēto energoresursu īpatsvaru un fosilo CO₂ emisiju samazināšana siltumenerģijas ražošanā. Vienlaikus bioekonomikas un kaskādēšanas princips nosaka, ka enerģētikā prioritāri

izmantojamas zemākas pievienotās vērtības biomasas plūsmas, atlikumi un blakusprodukti, ja tiem nav pamatota augstvērtīgāka pielietojuma. Biomasas kā kurināmā praktisko piemērotību sadedzināšanai un izmantošanai siltumapgādē nosaka ne tikai zemākais sadegšanas siltums, bet arī mitruma saturs, pelnu saturs, viendabīgums, emisiju profils, pelnu kušanas uzvedība un sadedzināšanas iekārtas darbības apstākļi. Tādēļ alternatīvo granulu un šķeldas maisījumu izvērtēšanā būtiski vienlaikus aplūkot kurināmā kvalitāti, sadedzināšanas testos iegūtos efektivitātes un emisiju rādītājus, kā arī pelnu īpašības un to potenciālo apsaimniekošanu.

Bibliometriskās analīzes rezultāti liecina, ka biomasas enerģētikas pētniecībā vēsturiski dominējuši tehnoloģiski virzieni, kas saistīti ar biomasas struktūru, sadedzināšanu, pirolīzi, gāzifikāciju, reakciju apstākļiem un konversijas efektivitāti. Savukārt ar ilgtspēju, aprites cikla novērtējumu, vides ietekmi un klimata mērķiem saistītie virzieni kļuvuši izteiktāki vēlāk, biomasas izmantošanai pārejot no tehnoloģiskas iespējamības pierādīšanas uz sistēmisku ietekmes un ilgtspējas pamatojumu. Līdzīga tendence konstatēta arī citos bioenerģijas bibliometriskajos pētījumos, kuros norādīts publikāciju skaita pieaugums pēc 2000. gada, vides aspektu nozīmes palielināšanās un termiskās konversijas tehnoloģiju pastāvīga aktualitāte. Normatīvā ietvara analīze parāda, ka alternatīvās biomasas ieviešanu nosaka ne tikai resursu pieejamība un cena, bet arī kvalitātes, emisiju, ekodizaina un ilgtspējas prasības. RED II biomasas ilgtspēju sasaista ar pārbaudāmiem izejvielu izcelsmes un siltumnīcefekta gāzu emisiju ietaupījuma kritērijiem, savukārt mazas jaudas katlu ekodizaina prasības alternatīvo granulu izmantošanu ierobežo netieši — caur prasībām katla efektivitātei un emisiju robežvērtībām konkrētā degšanas režīmā. Tādējādi alternatīvās biomasas kurināmo ieviešana ir tehnoloģiski, vides un normatīvi nosacīts process.

Esošie pētījumi sniedz būtisku pamatu alternatīvo biomasas kurināmo izvērtēšanai, tomēr tie bieži aptver tikai atsevišķas novērtējuma dimensijas. Daļa pētījumu koncentrējas uz granulu kvalitāti un tās uzlabošanu, analizējot, kā izejvielas īpašības ietekmē iegūtā kurināmā mitruma saturu, pelnu saturu, mehānisko izturību, tilpumblīvumu un citus kvalitātes rādītājus ²⁶⁷. Cita pētījumu grupa vērtē granulu sadedzināšanu, katla efektivitāti un emisijas mazas jaudas iekārtās, tomēr šādos darbos parasti netiek veikts pilns aprites cikla, ilgtspējas un lēmumu pieņemšanas kritēriju izvērtējums ^{268,269}. Savukārt aprites cikla novērtējuma pētījumi nodrošina plašāku vides ietekmes skatījumu, taču to rezultāti būtiski ir atkarīgi no sistēmas robežām, funkcionālās vienības, biogēnā oglekļa uzskaites, transportēšanas pieņēmumiem un izmantotajām datubāzēm. Pārskati par biomasas granulu aprites cikla pētījumiem norāda uz lielu rezultātu izkliedi metodoloģisko izvēļu dēļ, bet daļa pētījumu balstās uz modelētām piegādes ķēdēm, literatūras datiem un attiecīgām datubāzēm, nevis uz vienlaikus iegūtiem eksperimentāliem kurināmā kvalitātes, sadedzināšanas un emisiju datiem ^{270–272}.

Tāpēc alternatīvās biomasas potenciāla pilnvērtīgai izvērtēšanai nepieciešama integrēta pieeja, kas vienā metodoloģiskā ietvarā sasaista biomasas pieejamību, kurināmā kvalitāti, sadedzināšanas testos iegūtos efektivitātes un emisiju rādītājus, pelnu īpašības, aprites cikla novērtējumu, ilgtspējas kritērijus un daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas analīzi. Šāda pieeja ļauj alternatīvo biomasu vērtēt ne tikai kā teorētiski pieejamu resursu, bet kā praktiski, normatīvi un vides ziņā pamatotu kurināmo siltumenerģijas ražošanai.

2. METODOLOĢIJA

Šajā nodaļā aprakstīta pētījumā izstrādātā un pielietotā metodoloģija. Promocijas darbā izmantoto izejvielu izvēle balstījās uz priekšizpēti, kas tika veikta kā sagatavošanās process pirms izstrādātās metodoloģijas pilnvērtīgas pielietošanas. Priekšizpēte nav interpretējama kā atsevišķa promocijas darba rezultātu daļa, bet kā praktisks atlases posms, kura mērķis bija noteikt pētījumam piemērotas biomasas plūsmas. Par galveno sākotnējās atlases kritēriju tika noteikta faktiskā izejvielu pieejamība Latvijas apstākļos. Šāds kritērijs bija būtisks, jo literatūrā sastopami pētījumi arī par tādu biomasas veidu izmantošanu granulu ražošanai, kas teorētiski var būt piemēroti cietā biokurināmā iegūšanai, bet neatbilst Latvijas reģionālajam resursu kontekstam, piem., kokosriekstu biomasas atlikumi.

Latvijas kontekstā alternatīvās biomasas izmantošanas pamatojumu veido iepriekš veikti pētījumi par zālaugu, lauksaimniecības un rūpniecības blakusproduktu pieejamību cietā biokurināmā ražošanai. Kubules u. c. pētījumā ir vērtēti tādi Latvijā potenciāli pieejami resursi kā salmi, niedres, graudu sēnalas, rapšu putekļi, griķu sēnalas, alus darītavas graudu atlikumi, kartupeļu pulpa un invazīvo augu biomasas, kā uzsvērts, ka šādu resursu izmantošanai nepieciešama padziļināta to tehniskās piemērotības, sadedzināšanas īpašību un emisiju kontroles izpēte, jo zālaugu un nekoksnes biomasas ķīmiskais sastāvs ir atšķirīgāks nekā koksnes biomasai ²⁷³.

Pēc faktiskās pieejamības izvērtēšanas tika definēti papildu atlases kritēriji: izejvielas sākotnējā kvalitāte, frakcijas izmērs, praktiskā sagatavojamība un granulu gadījumā — iegūtā produkta mehāniskā izturība. Sākotnējā kvalitāte tika vērtēta kvalitatīvi, ņemot vērā vizuāli konstatējamu piesārņojumu ar smiltīm, sadzīves vai iepakojuma atkritumiem, materiāla nevienmērīgumu, nepatīkamu smaku un bioloģiskās degradācijas pazīmes. Šādi kritēriji ļāva agrīnā stadijā izslēgt izejvielas, kuru izmantošana laboratorijas mēroga granulu veidošanā vai sadedzināšanas testos nebūtu tehniski pamatota vai reproducējama. Promocijas darba turpmākajā izpētē tika iekļauta tikai daļa no sākotnēji pārbaudītajiem paraugiem — reprezentatīva paraugu kopa, ar kuru bija iespējams pārbaudīt izstrādāto metodoloģiju dažādos biomasas izmantošanas kontekstos.

2.1. Izejvielu apraksts un to veidošanas process

Granulu paraugu atlase tika veikta ISA kontekstā. Šajā gadījumā īpaša nozīme ir kurināmā viendabīgumam, mehāniskajai izturībai, stabilai padevei, emisiju kontrolei un piemērotībai mazas jaudas granulu katlam. Tādēļ granulu daļā tika iekļauti paraugi, kas pārstāv vairākas biomasas grupas: tradicionālo kurināmo, lauksaimniecības atlikumus, pārtikas rūpniecības atlikumus, kā arī mazvērtīgi izmantotu vai apsaimniekošanas ziņā problemātisku biomasu, tostarp invazīvo augu biomasu. Promocijas darbā granulu veidošanai tika atlasītas šādas biomasas: koksne, niedres, salmi, kaņepes, griķu sēklu čaumalas, saulespuķu sēklu čaumalas, alus darītavas izspaidas jeb drabiņas, Kanādas zeltslotiņa, koku lapas un zāle.

Sākotnējie granulēšanas mēģinājumi tika veikti laboratorijas mērogā, jo šī darba mērķis bija pārbaudīt dažādu alternatīvās biomasas izejvielu piemērotību granulu veidošanai un turpmākai sadedzināšanas testēšanai kontrolētos apstākļos.

Par primāro praktisko atlasē kritēriju tika noteikta granulu mehāniskā integritāte kvalitatīvā novērtējumā, t. i., spēja pēc presēšanas un atdzišanas saglabāt ģeometrisku formu un strukturālo noturību bez izteiktas fragmentācijas. No turpmākas izpētes tika izslēgtas izejvielas, kurām veidojās drupanas un mehāniski nestabīlas granulas, savukārt detalizētai testēšanai tika atlasītas izejvielas, kurām granulas veidojās ar salīdzinoši augstāku mehānisko noturību un vizuāli viendabīgu struktūru. Granulu mehāniskās izturības mērķvērtība tika noteikta vismaz 90 %. Sākotnējie mēģinājumi parādīja, ka daļai zālaugu un citu nekoksnes izejvielu granulēšanas procesā ir nepietiekama pašsaistīšanās spēja, kas ierobežo starpdaļiņu saķeri un cieto tiltu veidošanos presēšanas slodžu ietekmē. Šo ierobežojumu tipiski nosaka zemāks lignīna saturs salīdzinājumā ar koksnes izejvielām, kā arī atšķirīgs virsmas ekstraktu un viegli šķīstošu komponentu sastāvs, kas var mazināt daļiņu saķeri. Lignīns darbojas kā dabīgs saistītājs, kura plastiskums palielinās, izejvielai presēšanas laikā uzsilstot. Līdz ar to presēšanas temperatūra un izejvielas mitruma saturs ir būtiski parametri, kas ietekmē granulu blīvumu un mehānisko izturību.

Ņemot vērā minēto un lai nodrošinātu reproducējamu granulu kvalitāti, atsevišķiem alternatīvās biomasas veidiem tika izmantota kopgranulēšana, izejvielu maisījumā iekļaujot 50 % koksnes zāgskaidu. Šāda pieeja palielināja dabīgās saistvielas pieejamību maisījumā, uzlaboja granulu mehānisko izturību un nodrošināja stabilāku sadedzināšanas testu norisi.

Alternatīvās biomasas veidi būtiski atšķiras pēc pieejamības, savākšanas un transportēšanas apstākļiem. Piem., Kanādas zeltslotiņa ir invazīva suga, kas aug pļāvās, meža izcirtumos un ceļmalu grāvjos un vietām ir sastopama lielos daudzumos. Tomēr stabīlas ikgadējas biomasas piegādes nodrošināšanai būtu nepieciešama mērķtiecīga pļaušana, savākšana un loģistikas organizēšana. Alus darītavas graudu izspaidas jeb drabiņas ir alus ražošanas blakusprodukts, ko var izmantot granulu ražošanai, tomēr šai izejvielai ir divi būtiski ierobežojumi. Pirmkārt, drabiņas plaši izmanto lopbarībā un biogāzes ražošanā, tādēļ tās ir konkurējošs resurss. Otrkārt, pēc alus ražošanas tām ir augsts mitruma saturs, kas palielina transportējamo masu uz vienu enerģijas vienību un būtiski palielina žāvēšanai nepieciešamo enerģijas patēriņu. Līdz ar to biomasas izvēli būtiski ietekmē ne tikai tās pieejamība, bet arī fizikālās īpašības, kas nosaka sagatavošanas un granulēšanas procesa prasības.

Tehnoloģiski būtisks parametrs ir biomasas mitruma saturs savākšanas vai iegūšanas brīdī. Mitras biomasas, kuru mitruma saturs ir 15 % un vairāk, granulēšana ir sarežģītāka, jo materiāls parasti nav tieši piemērots presēšanai un prasa papildu žāvēšanu. Savukārt sausas biomasas ar mitruma saturu līdz 15 % apstrāde ir vienkāršāka, un daudzos gadījumos tā ir tieši granulējama vai granulējama pēc mitruma stabilizēšanas. Pirms granulēšanas biomasa tika sagatavota, nodrošinot vienmērīgāku daļiņu frakciju; sagatavošana ietvēra izmēra samazināšanu līdz < 1-5 mm, īpaši augiem ar izteiktu stiebru struktūru, piem., niedrēm, kaņepēm un sienam.

Žāvēšanas vai mitrināšanas nepieciešamība bija atkarīga no konkrētās biomasas fizikālajām īpašībām. Mitrināšana tika veikta gadījumos, kad pārāk sauss materiāls presēšanas laikā neveidoja pietiekami noturīgas granulas; tās mērķis bija uzlabot daļiņu saķeri un sasniegt augstāku mehānisko izturību. Optimālais mitruma saturs pirms presēšanas vairumam izejvielu tika noteikts 15-20 % robežās, tomēr atsevišķām izejvielām bija nepieciešama individuāla

pielāgošana. Piem., niedrēm ūdens uzsūkšanās bija lēnāka, tādēļ 5 kg niedru biomasas tika vienmērīgi apsmidzināti ar 350 mL ūdens un turēti hermētiskā konteinerā vismaz 12 h. Nākamajā dienā biomasas mitruma saturs sasniedza aptuveni 25 %, kas šai izejvielai nodrošināja labāku presēšanas rezultātu. Pārmērīgs mitrums, savukārt, izraisīja materiāla iziešanu cauri matricai bez efektīvas sablīvēšanās.

Šajā pētījumā granulu ražošana tika veikta ar D tipa *ZLSP 200B* granulu presi ar aptuveni 80-120 kg/h produktivitāti (sk. 2.1. att.). Praktiskie novērojumi un dažādu izejvielu granulēšanas mēģinājumi parādīja, ka piemērotas matricas izvēle ir būtiska stabilai granulu veidošanai. Tika pārbaudītas matricas ar 6 mm, 8 mm un 10 mm poru diametru. Granulēšanas laikā berzes ietekmē matrica uzsila līdz aptuveni 105 °C, vienlaikus nodrošinot materiāla papildu žāvēšanu un granulu mitruma samazināšanos līdz 6-13 %.



2.1. attēls. Pētījumā izmantotais granulators

Balstoties uz iepriekšējiem testiem ar niedrēm un drabiņām, tika konstatēts, ka vairākkārtēja presēšana uzlabo granulu mehānisko izturību. Tādēļ daļai paraugu biomasas maisījums tika presēts caur 6 mm matricu trīs reizes, manuāli regulējot veltņu spiedienu. Svarīgi pieminēt, ka presēšanai un citām darbībām, kuru ietvaros tika izmantotas elektroenerģiju patērējošās iekārtas, šis patēriņš tika piefiksēts un izteikts īpatnējās vienībās turpmākiem aprēķiniem.

Promocijas darba ietvaros tika testētas gan no atsevišķas biomasas veidotas granulas, gan biomasas un koksnes zāģskaidu maisījuma granulas. Granulu ražošana laboratorijas mērogā tika veikta tādā apjomā, lai nodrošinātu kvalitātes analīzi un 3 h sadedzināšanas testu granulu katlā stabilos degšanas apstākļos. Vienam testam bija nepieciešami aptuveni 5 kg granulu

stundā, turklāt papildu granulu daudzums bija nepieciešams katla uzsildīšanai, kopējam patēriņam sasniedzot aptuveni 20 kg uz vienu granulu veidu (sk. 2.2. att.).



2.2. attēls. Veidoto granulu paraugs (drabiņu un kokskaidu maisījuma granulas)

Šķeldas paraugu un maisījumu izvēle tika veikta centralizētās siltumapgādes kontekstā. Šajā pētījuma daļā galvenais mērķis bija novērtēt iespējamu situāciju, kurā katla operators nākotnē daļu tradicionālās šķeldas aizstāj vai papildina ar citām biomasas plūsmām atkarībā no biokurināmā pieejamības, cenas un piegādes apstākļiem. Atšķirībā no granulu paraugiem, šķeldas gadījumā atlase nebija vērsta uz izejvielu izslēgšanu pēc granulēšanas piemērotības, bet uz dažādas izcelsmes un frakcijas šķeldas plūsmu salīdzināšanu un hipotētisku maisījumu izveidi. Faktiskā šķeldas izcelsme promocijas darbā netiek atklāta CSA ietvaros izmantotās katlumājas pārvaldnieka komerciālās konfidencialitātes apsvērumu dēļ, tomēr paraugi tika izvēlēti tā, lai tie reprezentētu praksē sastopamus šķeldas kvalitātes un izcelsmes scenārijus.

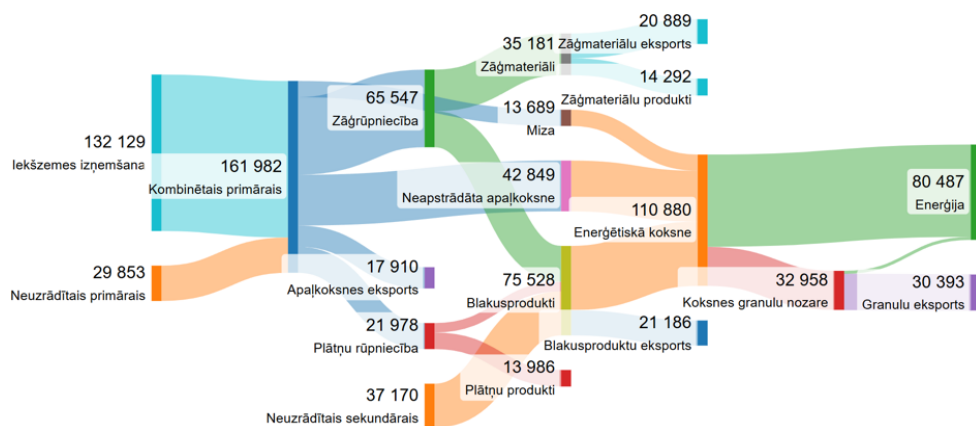
Šķeldas paraugu un maisījumu novērtējumā īpaša uzmanība tika pievērsta mitruma saturam, daļiņu izmēru sadalījumam un padeves vienmērīgumam, jo šie faktori būtiski ietekmē āru katla darbību, oksidācijas pilnīgumu un emisiju veidošanos. Tādējādi šķeldas paraugu daļa papildināja granulu izpēti, ļaujot pārbaudīt alternatīvās biomasas izmantošanas potenciālu CSA.

Atsevišķiem biomasas veidiem tika veikta materiālu plūsmas analīze (sk. 2.2.2. apakšnodaļu), kuras rezultāti atspoguļoti attiecīgajās apakšnodaļās zemāk.

2.1.1. Koksne (W)

Koksnes (angļu val. *Wood* (W)) materiālu veidu un izmantošanas iespēju enerģētikā konteksts ir aprakstīts 1. nodaļā. 2.3. attēlā parādīta W materiālu plūsma Latvijā, kas balstīta uz ES līmeņa W biomasas plūsmu pārskatiem un nacionālajām statistikas datubāzēm; sistēmas robeža sākas ar apaļkoksnes ieplūdi no mežiem un turpinās līdz galvenajiem produktiem, enerģijas un eksporta virzieniem. Attēlā iekļautas publiski pieejamajos statistikas avotos un nozares plūsmu pārskatos identificējamās galvenās W plūsmas, tāpēc tas nav interpretējams kā visu fizikāli iespējamo koksnes apakšplūsmu pilna masas bilance, bet gan kā statistiski pamatots

plūsmu struktūras kopsavilkums. Plūsmu bilances nodrošināšanai atsevišķi izdalītas arī “neuzrādītās” primārās un sekundārās plūsmas, kas raksturo statistikas datus tieši neatšifrēto, bet materiālu plūsmas saglabāšanai nepieciešamo apjomu. Iekšzemes izņemšana kopā ar papildu ieplūdēm, kas identificētas kā “neuzrādītais primārais”, veido kombinēto primāro plūsmu, kas tālāk sadalās pārstrādē un eksportā: nozīmīgas daļas nonāk zāgrūpniecībā un plātņu rūpniecībā, kā arī apaļkoksnes eksportā un neapstrādātā apaļkoksnē. Zāgrūpniecības posmā plūsmas sadalās zāģmateriālos ar tālākiem atzariem uz zāģmateriālu eksportu un zāģmateriālu produktiem, bet otra nozīmīga daļa veidojas kā blakusprodukti, kas kopā ar plātņu rūpniecības blakusproduktiem un “neuzrādīto sekundāro” plūsmu ieplūst enerģētiskās koksnes segmentā. Enerģētiskā W ir centrālais materiālu pielietojanas mezgls, kas galvenokārt veido enerģijas ražošanu, vienlaikus nodrošinot izejvielu W granulu nozarei. W granulu nozares iznākums pārsvarā ir eksports, kamēr vietējais izmantojums enerģijai ir salīdzinoši neliels, kas saskan ar 1.2.2. apakšnodaļā aprakstīto. Atsevišķi izdalīta arī miza, kas kopā ar blakusproduktiem un neapstrādātu apaļkoksni papildina enerģētiskās W plūsmu, tādējādi uzsverot, ka enerģijas sektorā būtisku daļu nodrošina tieši kokrūpniecības blakusprodukti, kamēr apaļkoksnes izmantojums enerģijai rada spriedzi ar alternatīvo izmantošanu; pieņemot kopējo apaļkoksnes enerģētisko ieplūdi 162 PJ un vidējo zemas kvalitātes apaļkoksnes īpatsvaru 16 %, tiek identificēta daļa no apaļkoksnes, kas enerģētikas bilanci faktiski aizstājama ar alternatīviem biomasas kurināmajiem (16,9 PJ).²⁷⁴



2.3. attēls. W materiālu plūsmas analīzes rezultāts (mērvienība: TJ/gadā)

W biomasas zāģskaidu formā (reprezentē mežrūpniecības atlikumus) promocijas darba vajadzībām tika iegādāta no uzņēmuma SIA “Vēvers” (sk. 2.4. att.). Zāģskaidu mitrums pēc piegādes bija nevienmērīgs, līdz ar ko tās tika žāvētas laboratorijas telpā pie dabiskās ventilācijas. Papildus malšana zāģskaidām netika veikta.

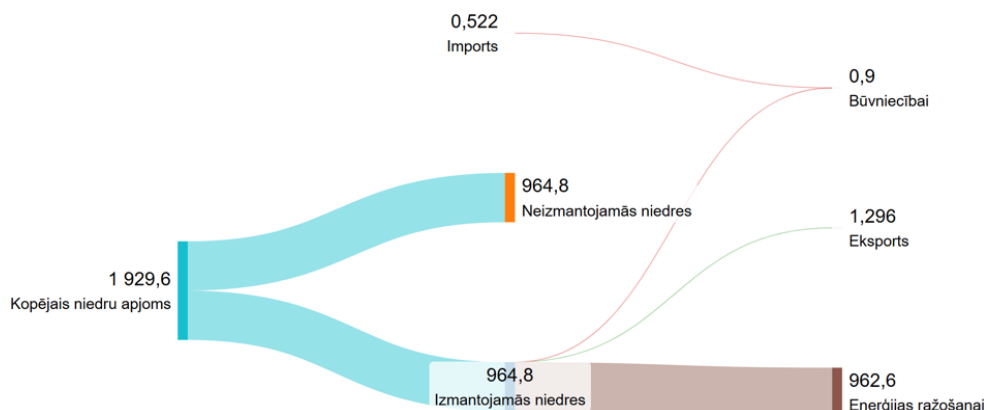


2.4. attēls. Iegādāto zāgskaidu vizuālais izskats

2.1.2. Niedres (R)

Niedres (angļu val. *Reeds* (R)) (*Phragmites Australis*) ir viens no visplašāk izplatītajiem mitrāju lakstaugiem pasaulē, un būtiski daudzumi veidojas mitrājos, ezeros, piekrastes seklūdeņos, aizaugušajos kanālos un applūstošās pļavās ²⁷⁵. R biomasa tradicionāli tiek iegūta ekosistēmu apsaimniekošanas mērķiem (piem., ūdens tilpnes krastu atbrīvošana), kā arī izmantošanai būvmateriālu, pakaišu, amatniecības un enerģētikas sektoros ²⁷⁶. R ir perspektīvs lignocelulozes resurss ar augstu sausas ražību un salīdzinoši zemu audzēšanas izmaksu slodzi, jo tās nav jāaudzē lauksaimniecības zemēs ²⁷⁷. Latvijā R vāc un izmantoja jumta segumiem. R biomasas potenciāls daudzums, ko iespējams savākt Latvijas robežās, ir ~ 60 tūkst. t/gadā (lielākoties Kurzemē un Latgalē) ^{278,279}.

2.5. attēlā parādīta R materiālu plūsma, nodalot kopējo apjomu izmantojamajās un neizmantojamajās R frakcijās un tālāk sadalot izmantojamās niedres galvenajos pielietojumos. Praktiski izmantojamā daļa galvenokārt tiek novirzīta enerģijas ražošanai, kamēr salīdzinoši neliela plūsmas daļa nonāk būvniecības vajadzībām un eksportā; papildus būvniecības virzienu daļēji papildina imports. Šāds sadalījums ir loģiski skaidrojams ar R fizikāli ķīmiskajām īpašībām un to sezonālo mainību. Vienlaikus ievērojama enerģētiskā plūsma norāda uz R potenciālu kā lokāli pieejamu biomasas resursu, kas var papildināt kurināmā tirgu, taču tirgus integrācijā praksē noteicoši ir ne tikai teorētiska pieejamība, bet arī izejvielu kvalitātes šķirošana, sagatavošanas ķēde un stabilas kvalitātes nodrošināšana gala lietojumam. Neizmantojamā daļa ir tā, kas, galvenokārt, nav praktiski sasniedzama dabisko šķēršļu dēļ (piem., nesasalušais ezers). ²⁷⁴



2.5. attēls. R materiālu plūsmas analīzes rezultāts (mērvienība: TJ/gadā)

R biomasa promocijas darba vajadzībām tika iegūta no divām vietām: daļa materiāla tika savākta Rīgā, Zunda kanālā pretī Zunda krastmalai, savukārt otra daļa iegādāta no uzņēmuma SIA “ROYAL REED”. Žāvēšana notika laboratorijas telpā apkārtējās vides temperatūrā. Kad R bija pietiekami izžuvušas, tās tika iepakotas vairākos plastmasas maisos un slēgtos konteineros uzglabāšanai. 2.6. attēlā parādītas R pirms to griešanas un sasmalcināšanas procesa. Pirms granulēšanas R tika saīsinātas, pielietojot manuālu griešanu ar šķērēm, un pēc tam vairākas reizes sasmalcinātas MEKA smalcinātājā, lai atvieglotu tālāko apstrādi. Gala frakcijas iegūšanai tika izmantotas Vibrotehnik PM120 asmeņu dzirnavas.



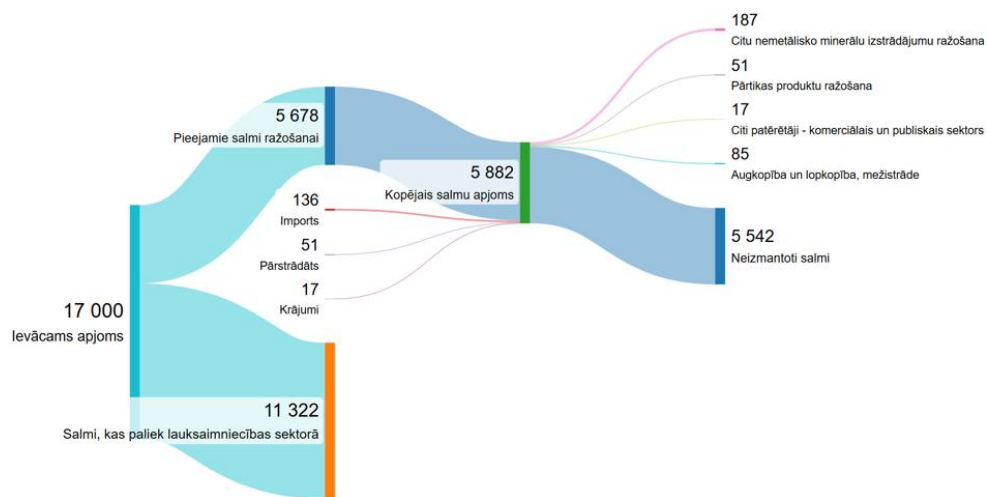
2.6. attēls. Granulu ražošanai izmantots R materiāls

2.1.3. Salmi (S)

Kviešu un citu kultūraugu salmi (angļu val. *Straw* (S)) tiek uzskatīti par nepietiekami izmantotu biomasas resursu — ES to potenciālais apjoms sasniedz aptuveni 140 milj. t/gadā,

tostarp Latvijā ap 0,7 milj. t, ko iespējams novirzīt pakaišiem, substrātiem, rūpniecībai vai enerģētikai ²⁸⁰. 2.7. attēlā ir redzama S ikgadējā materiālu plūsma Latvijā TJ ekvivalentā — no kopējā ievācamā apjoma (17 000 TJ/gadā) lielāka daļa paliek lauksaimniecības sektorā (11 322 TJ/gadā) un tikai 5542 TJ/gadā potenciāli ir pieejami izmantošanai enerģētikā, bet paliek neizmantoti.

Latvijā S izmantošanas iespējas ir daudzveidīgas — tie tiek izmantoti gan tradicionālām vajadzībām, gan inovatīvos produktos, piem., S datorpelēs ²⁸¹. Efektīvai biomasas izmantošanai būtisks ir mitrums. Latvijas klimatā graudu kulšana notiek augusta sākumā, vidēji 15 dienas pirms lietainā perioda sākuma, tādēļ S novākšanai ir īss logs, lai izvairītos no to savākšanas mitrā stāvoklī un nepieciešamības veikt mākslīgu žāvēšanu ²⁸⁰.

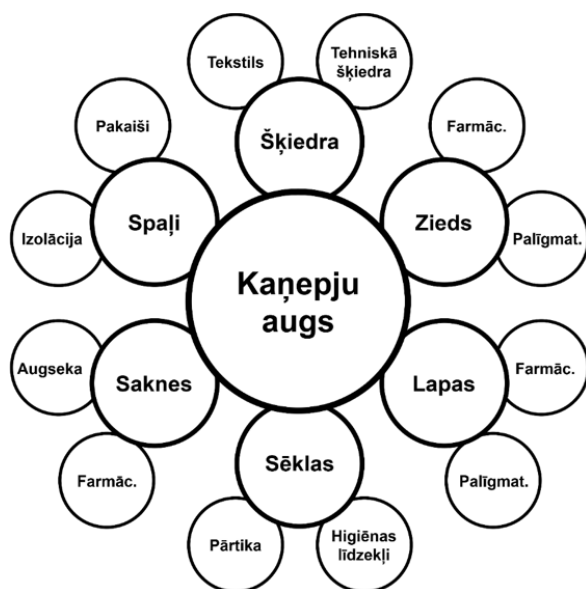


2.7. attēls. S materiālu plūsmas analīzes rezultāts (mērvienība: TJ/gadā)

Promocijas darba ietvaros izmantotie kviešu S tika ņemti no RTU VASSI krājumiem jau izžāvētā veidā (iepriekš izmantoti citā projektā siltumizolācijas materiāla izstrādei). Pirms granulēšanas salmi tika manuāli sagriezti īsākos gabalos un vairākkārt sasmalcināti *MEKA* smalcinātājā, lai atvieglotu turpmāko malšanas procesu. Gala frakcijas iegūšanai tika izmantotas *Vibrotehnik PM120* asmeņu dzirnavas.

2.1.4. Kaņepes (H)

Kaņepju (angļu val. *Hemp* (H)) (*Cannabis sativa* L.) biomasu veidojas kā lauksaimniecības un šķiedraugu kultūras blakusprodukts, galvenokārt stublāju, lapu un sakņu formā ²⁸². H ir augsta potenciāla lignocelulozes resurss, ko plaši izmanto papīra, šķiedru, tekstila, būvniecības un kompozītmateriālu industrijās, kā arī enerģētikā ^{283–285}. 2022. gadā ES ietvaros tika saražots 180 tūkst. t H, no kura 60 % tika saražoti Francijā ²⁸⁶. 2.8. attēlā var redzēt dažādu H auga sastāvdaļu izmantošanas iespējas.



2.8. attēls. H auga sastāvdaļu izmantošanas iespējas (reprodukcija no ²⁸²)

Saskaņā ar Narkotisko un psihotropo vielu un zāļu, kā arī prekursoru likumīgās aprites likuma 3. nodaļas 6. pantu ²⁸⁷, LR rūpnieciskām vajadzībām ir atļauts audzēt tikai sējas H šķirnes, kas ir iekļautas ES kopējā augu šķirņu katalogā un ir sertificētas, un tikai atklātā laukā. Latvijā pastāv vismaz 15 uzņēmumi (2023. gada dati), kas ir saistīti ar H audzēšanu vai rūpniecisko apstrādi (sk. 2.1. tabulu).

Tabula 2.1.

Latvijas uzņēmumi, kas audzē H vai izmanto tās rūpnieciskajā procesā

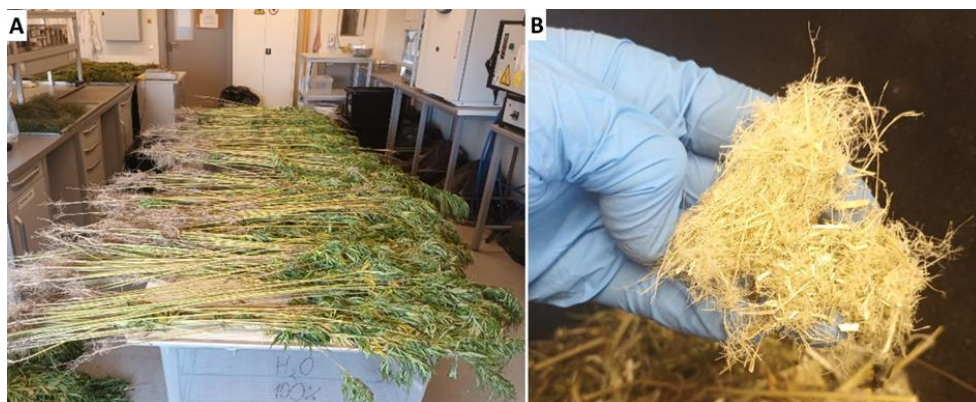
Nosaukums	Darbības veids	Izvietojums
SIA “Raff Kaņepes”	Pārtikas ražošana	Jelgavas novads
SIA “Spelta”	Pārtikas ražošana	Valmieras novads
SIA “Transhemp”	Pārtikas ražošana	Rīga
Zemnieku saimniecība “Virši”	Pārtikas ražošana	Bauskas novads
SIA “Industrial Hemp Latvia”	Dažādi produkti	Ādažu novads
SIA “Naftiber”	Šķiedras un spaļu ieguve	Krāslavas novads
SIA “Zalers”	Šķiedras un spaļu ieguve	Krāslavas novads
Biedrība “Kaņepju vēstniecība”	Interesu aizstāvēšana	Rīga
Latvijas Industriālo kaņepju asociācija	Interesu aizstāvēšana	Rīga
SIA “Hemp Eco Systems Latvia”	Celtniecība/būvmateriāli	Ogres novads
SIA “Adore My Hemp”	Tekstilizstrādājumi	Līvānu novads
IK “Obelisk Farm”	Tūrisms/audzēšana/pārtika	Rēzeknes novads
Zemnieku saimniecība “Adzelvieši”	Tūrisms/audzēšana/pārtika	Valmieras novads
Zemnieku saimniecība “Viesūnēni”	Tūrisms/audzēšana/pārtika	Madonas novads
SIA “Lapka Hemp”	Tūrisms/audzēšana/pārtika	Dienvidkurzemes novads

H tika iegūtas no divām vietām: IK “Obelisk Farm” (paraugi ar lapām un sēklām) un ZS “Adzelveši” (paraugi bez lapām un sēklām). Sākotnējais H mitruma saturs bija aptuveni 50 %. Tā kā H tika novāktas, izvelkot tās no augsnes, to saknes bija stipri piesārņotas ar smiltīm (sk. 2.9. att.).



2.9. attēls. H savākšana pie IK “Obelisk Farm”

H žāvēšana notika laboratorijas telpās (sk. 2.10. att. (A)). Saknes tika manuāli nogrieztas un utilizētas. Stumbru apstrādes process tika apgrūtināts dēļ H dabiskām īpašībām; H šķiedras ir garākas nekā lielākajai daļai citu lauksaimniecības biomasu, tādēļ mehāniskās slodzes ietekmē tās nevis lūzt, bet liecas un tinās ap smalcināšanas ierīču rotējošajiem elementiem. Lai atvieglotu stumbru pirmsapstrādi, tika iesaistīts uzņēmums SIA “ŠRĒDEREJA” un tai piederoša portatīvā smalcināšanas iekārta *MDS-LINE* — izvēle pamatojama ar to, ka laboratorijā pieejamais *MEKA* smalcinātājs nespēja produktīvi nodrošināt veselu stumbru smalcināšanu, jo paredzēts mazu apjomu apstrādei. Daļās sadalīti stumbri tika sasmalcināti ar *MEKA* smalcinātāju. Gala frakcijas iegūšanai tika izmantotas *Vibrotehnik PM120* asmeņu dzirnavas (sk. 2.10. att. (B)).



2.10. attēls. H žāvēšanas process (A) un sasmalcinātā frakcija (B)

2.1.5. Griķu čaumalas (BH)

Griķu čaumalas (angļu val. *Buckwheat husk* (BH)) ir griķu graudu apstrādes blakusprodukts, kas veidojas graudu lobīšanas procesā. Pasaulē BH rodas galvenokārt tajos reģionos, kuros vēsturiski attīstīta griķu audzēšana — Ķīnā, Krievijā, Ukrainā, Polijā un Baltijas valstīs. Ķīna ir lielākais griķu audzētājs pasaulē, saražojot ap 1,5–2,0 milj. t/gadā griķu, savukārt Krievijas Federācija, Polija un Ukraina kopā ražo ap 400–600 tūkst. t griķu ²⁸⁸. Literatūras dati norāda, ka BH var veidot līdz 30 % no grauda masas, līdz ar to pasaulē ik gadu rodas ap 0,5 milj. t griķu čaumalu ²⁸⁹. Latvijā griķu audzēšana ir salīdzinoši izplatīta nišas lauksaimniecības nozare. Pēc “Eurostat” un Latvijas Lauksaimniecības datu centra informācijas, griķu kopražā Latvijā svārstās 19–25 tūkst. t/gadā ²⁹⁰, atkarībā no sezonas, kas atbilst aptuveni 6–7,5 tūkst. t/gadā griķu čaumalu kā blakusprodukts. BH rodas graudu pārstrādes uzņēmumos, tajā skaitā zemnieku saimniecībās un mazās graudu pārstrādes ražotnēs.

Promocijas darbā izmantotais BH materiāls tika iegādāts no zemnieku saimniecības, kas izvēlējās palikt anonīma. Saņemtie BH paraugi jau bija pilnībā izžāvēti un smalkā frakcijā, kas atbilst granulēšanai nepieciešamajām prasībām, tādēļ papildu priekšapstrāde netika veikta.

2.1.6. Saulespuķu sēklu čaumalas (SH)

Saulespuķu sēklu čaumalas (angļu val. *Sunflower husk* (SH)) ir saulespuķu sēklu pārstrādes blakusprodukts, kas veidojas graudu atlobīšanas procesā pirms eļļas ekstrakcijas. SH veidojas galvenokārt tajos pasaules reģionos, kur saulespuķu audzēšana ir attīstīta lielos apjomos — Ukrainā, Krievijā, Turcijā, Argentīnā un ES, īpaši Rumānijā, Bulgārijā un Ungārijā. ES saulespuķu sēklu kopražā sasniedz vairāk nekā 37 milj. t gadā ²⁹¹. Saulespuķu sēklas satur aptuveni 20–30 % SH (vidēji 25 %), kas parasti tiek noņemtas atlobīšanas procesā ²⁹², tāpēc ikgadēji ES veidojas ~ 9 milj. t SH kā blakusprodukts.

Promocijas darbā izmantotais SH materiāls tika iegādāts no mazumtirgotāja, kas izvēlējās palikt anonīms. Saņemtie SH paraugi jau bija pilnībā izžāvēti un smalkā frakcijā, kas atbilst granulēšanai nepieciešamajām prasībām, tādēļ papildu priekšapstrāde netika veikta.

2.1.7. Drabiņas (BSG)

Drabiņas (angļu val. *Brewer's spent grain* (BSG)) ir alus ražošanas blakusprodukts, ko Latvijā un pasaulē galvenokārt izmanto kā dzīvnieku barību ²⁹³ vai kā izejvielu anaerobās fermentācijas un biogāzes ražošanas procesiem ²⁹⁴. Tirgū sastopami arī dažādi pārtikas produkti ar pievienotām BSG, piem., cepumi un citi grauzdējumi ^{295,296}. Atkarībā no izmantotajiem graudiem BSG sastāvs ievērojami atšķiras, tomēr pieņemts, ka 0,2 kg BSG rodas uz katru saražoto litru alus ²⁹⁷; kopējais pasaules BSG apjoms sasniedz aptuveni 37,2 milj. t gadā ²⁹⁸.

Balstoties uz Latvijas alus darītavu interneta resursiem un “Lursoft” datubāzē veikto uzņēmumu atlasī konstatēts, ka Latvijā šobrīd ir reģistrēti 75 alus ražotāji ²⁹⁹. Šis skaits ietver gan lielos nozares uzņēmumus, gan mazās un vidējās alus darītavas, kas darbojas dažādos Latvijas reģionos. Informācija par katras alus darītavas saražoto BSG apjomu un to faktiskajiem izmantošanas veidiem tika apkopota tiešā komunikācijā ar uzņēmumu pārstāvjiem, izmantojot

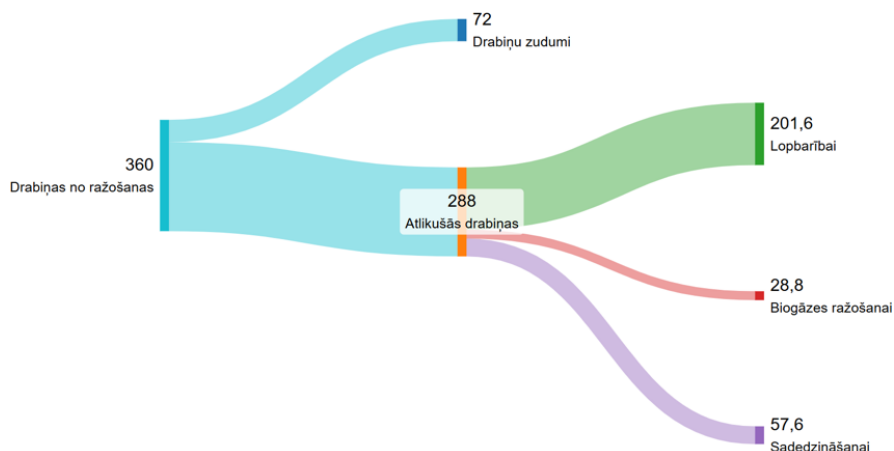
telefonintervijas un pieejamos dokumentus. Ne visas alus darītavas bija sasniedzamas vai vēlējās sniegt detalizētus datus (sk. 2.2. tabulu).

Tabula 2.2.

Latvijā esošo pazīstamāko alus darītavu BSG apjomi un esošie izmantošanas veidi

Uzņēmums	BSG apjoms	Izmantošanas veids
AS Cēsu Alus	~ 9500 t/gadā (avots: telefonintervija)	visa biomasa nodota vietējiem zemniekiem lopbarībai
AS Aldaris	~270 t/gadā (avots: telefonintervija)	viss apjoms nodots biogāzes ieguvei
AS Tērvetes AL	~1000 t/gadā (avots: telefonintervija)	visa biomasa nodota vietējiem zemniekiem lopbarībai
SIA Bauskas alus	~2320 t/gadā (avots: telefonintervija)	visa biomasa nodota vietējiem zemniekiem lopbarībai
SIA Užavas alus	apjoms netiek uzskaitīts (avots: telefonintervija)	visa biomasa nodota vietējiem zemniekiem lopbarībai
SIA Piebalgas alus	~1600 t/gadā (avots: telefonintervija)	visa biomasa nodota vietējiem zemniekiem lopbarībai
SIA Labietis	~270 t/gadā (avots: telefonintervija)	visa biomasa nodota vietējiem zemniekiem lopbarībai
SIA Jaunpils alus	apjoms netiek uzskaitīts (avots: telefonintervija)	visa biomasa nodota vietējiem zemniekiem lopbarībai
SIA Saldalus	~20 t/gadā (avots: telefonintervija)	visa biomasa nodota vietējiem zemniekiem lopbarībai

2.11. attēlā parādīta BSG materiālu plūsma no ražošanas līdz galvenajiem izmantošanas virzieniem. No kopējā BSG apjoma daļa tiek uzskatīta par zudumiem, piem., pelējuma dēļ, bet atlikusī daļa tiek sadalīta trīs galvenajās plūsmās: vislielākā daļa tiek novirzīta lopbarībai, mazāka daļa novirzīta biogāzes ražošanai, bet atlikusī daļa izmantota tiešai sadedzināšanai enerģijas ieguvei.²⁷⁴



2.11. attēls. BSG materiālu plūsmas analīzes rezultāts (mērvienība: TJ/gadā)

Promocijas darba vajadzībām BSG tika iegūtas no AS “Aldaris” ražotnes Rīgā. No ražotnes BSG tika transportētas uz RTU vairākās kastēs un mucās (sk. 2.12. att.). Laboratorijā BSG tika saņemtas ar salīdzinoši augstu mitrumu. Pēc saņemšanas tās tika izklātas plānā (5 cm biezā) kārtā uz horizontālām virsmām, lai veiktu žāvēšanu apkārtējās vides apstākļos. Žāvēšanas procesa paātrināšanai tika izmantoti ventilatori, kas nodrošināja intensīvāku gaisa apmaiņu, kā arī izklātā masa tika manuāli maisīta.



2.12. attēls. BSG savākšanas process no uzņēmuma

Daļa BSG, kas atradās laboratorijas telpā ar paaugstinātu gaisa temperatūru un tiešu saules starojumu, sāka pelēt un šie paraugi tika izslēgti no turpmākās apstrādes un testēšanas (sk. 2.13. att.). Atlikusī biomasa tika izžāvēta līdz sausnas stāvoklim un uzglabāta atvērtā kastē laboratorijas telpā līdz granulu ražošanas posmam. Vērtējot BSG daļiņu izmēru un balstoties uz līdzīgu pētījumu³⁰⁰, tika secināts, ka frakcijas izmērs ir piemērots granulu ražošanai bez papildu mehāniskās apstrādes.

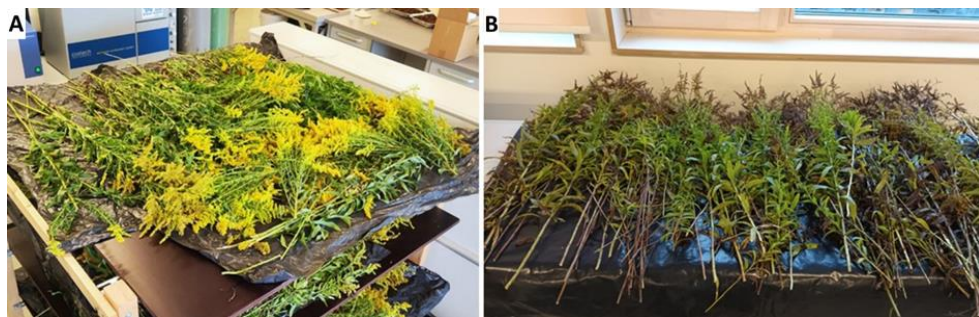


2.13. attēls. BSG ar pelējumu

2.1.8. Zeltslotiņa (CG)

Kanādas zeltslotiņa (angļu val. *Canada Goldenrod* (CG)) (*Solidago canadensis* L.) ir daudzgadīgs, rizomatozs (veido pazemes sakneņus), intensīvi veģetatīvi augošs lakstaugs, kas Eiropā un Āzijā tiek uzskatīts par vienu no agresīvākajām invazīvajām sugām, pateicoties spējai veidot blīvas monodominantas audzes (aizņem līdz 80 % platības; veido blīvas audzes ar 0,7–2,1 m augstiem stublājiem un ļoti lielu virszemes biomasu, kuras apjoms pieaug proporcionāli invāzijas intensitātei ³⁰¹) un alelopātiski nomākt vietējās sugas (CG izdala ķīmiskās vielas augsnē, kas ir agresīvas pret citu sugu augiem) ³⁰². Latvijā CG ir plaši izplatīta un tiek fiksēta visos reģionos, pārsvarā cilvēka radītos vai traucētos biotopos ^{303–305}.

CG tika ievākta divos laika posmos: vasarā, ziedēšanas perioda sākumā (sk. 2.14. att. (A)), un rudenī, kas atbilst ziedēšanas perioda beigām (sk. 2.14. att. (B)). Žāvēšana notika laboratorijas telpā apkārtējās vides temperatūrā.



2.14. attēls. CG paraugi, kas savākti ziedēšanas perioda sākumā (A) un beigās (B)

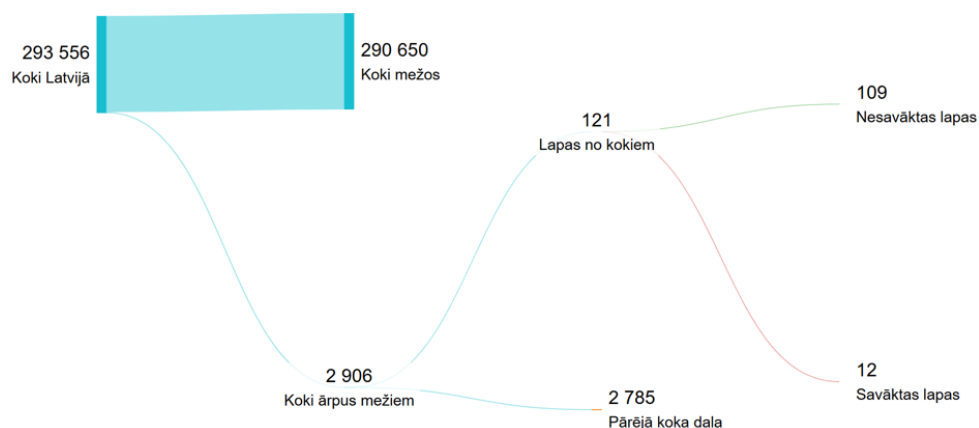
Lai atvieglotu CG sasmalcināšanu, augu stublāji vispirms tika sagriezti aptuveni 20 cm garos gabalos, izmantojot dārza šķēres. Pēc tam smalcināšana tika veikta *Vibrotechnik PM120* asmeņu dzirnavās, kur biomasu tika samalta līdz granulēšanai nepieciešamai frakcijai. Tā kā pēc sākotnējās materiāla testēšanas netika novērotas būtiskas atšķirības starp abiem ievākšanas laika paraugiem, abi paraugi tika sajaukti kopā un izmantoti granulu ražošanas procesā kā viens kopīgs maisījums.

2.1.9. Lapas (L)

Koku lapas (angļu val. *Leaves* (L)) ir sezonāls, pilsētvidē un saimnieciskajās teritorijās rudenī veidojošs lignocelulozes biomasas resurss, ko pašvaldības tradicionāli savāc ielu, parku un publisko zonu uzturēšanas vajadzībām, izmantojot slaucīšanas vai vakuuma tehniku, kas nodrošina lielu L daudzumu nonākšanu atkritumu plūsmā ³⁰⁶. Atbilstoši ES normatīvajai praksei, savāktās L tiek klasificētas kā atkritumi, uz kuriem piemērojama atkritumu hierarhija (Direktīva 2008/98/EK) un tiek apsaimniekotas kā bioloģiski noārdāmi atkritumi. Latvijā pilsētvides L apsaimniekošana tiek veikta kā daļa no bioloģiski noārdāmo sadzīves atkritumu plūsmas, kas nozīmē, ka lapas netiek uzskaitītas kā atsevišķa kategorija, bet apvienotas “zaļo atkritumu” un “bioatkritumu” grupās. Pilsētvidē savāktu lapu apjoms ir ievērojams, lai gan precīzi apjomi nav zināmi, jo datu uzskaitē netiek veikta atsevišķi ³⁰⁷. Latvijas dārzos un mežos

bieži sastopamie koki, piem., bērzs, apse un kļava, no viena vidēji pieauguša koka rudenī spēj dot ap 2 līdz 5 kg sausu L, kas neapstrādātā veidā aizņem aptuveni vienu līdz divus 100 L dārza maisus ³⁰⁸.

2.15. attēlā parādīta koku biomasu Latvijā un potenciāli savācamo L plūsma ārpus mežiem, izdalot mežos esošo koku daļu un koku daļu ārpus mežiem, kā arī L frakcijas tālāku sadalījumu savāktajās un nesavāktajās L. Diagramma uzsver, ka ārpus mežiem esošo koku apjoms ir neliels salīdzinājumā ar kopējo koku resursu valstī, un līdz ar to arī L kā atsevišķas biomasas plūsmas pieejamība enerģētiskai izmantošanai ir ierobežota. No koku ārpus mežiem plūsmas tikai daļa veido L, un no L plūsmas dominē nesavāktās L, kamēr savāktā daļa ir ievērojami mazāka, kas atspoguļo reālistisku pieņēmumu par L savākšanas praktiskajiem ierobežojumiem (lielākā daļa L tiek atstāta uz vietas, iestrādāta augsnē vai nonāk bioloģisko atkritumu apsaimniekošanā, nevis tiek mērķtiecīgi savākta enerģijas ražošanai). ²⁷⁴



2.15. attēls. L materiālu plūsmas analīzes rezultāts (mērvienība: TJ/gadā)

2024. gada rudenī nokritušās L tika savāktas vairākās zaļajās zonās Rīgas Tehniskās universitātes tuvumā un Latvijas Universitātes Botāniskajā dārzā. Savāktās L bija vairāku koku sugu L maisījums, sadalījums netika pētīts. Pēc nogādāšanas laboratorijā L tika izklātas uz dažādām virsmām žāvēšanai, līdz tās sasniedza mitruma saturu, kas ļāva veikt turpmāko apstrādi (sk. 2.16. att.). Izklāta masa tika pārmaisīta vismaz reizi dienā 5 darbadienu laikā, lai nodrošinātu vienmērīgu žūšanu.



2.16. attēls. L žāvēšanas procesā

Vizuāli novērtējot materiālu, tika konstatēts, ka lapās ir ievērojams smilšu un citu piesārņojuma piejaukums. Lai samazinātu granulu pelnu saturu, frakcija $< 0.5 \text{ mm}$ tika atdalīta, izmantojot *Retsch AS 400* sietu vibrācijas iekārtu (sk. 2.17. att.).



2.17. attēls. L sijāšanas process un izsijātais materiāls

No L masas tika manuāli atdalīti liela izmēra piejaukumi, piem., plastmasas gabali, saplēsts stikls, akmeņi, papīra fragmenti, stieples gabali, kā arī priežu čiekuri un valrieksti (sk. 2.18. att.).



2.18. attēls. L masā atrasto piejaukumu vizuālais izskats

Sausas L tika sasmalcinātas mazākos gabalos *MEKA* smalcinātājā (sk. 2.19. att.). Izmantojot *Vibrotehnik PM120* asmeņu dzirnavas L tika samaltas līdz granulēšanai atbilstošai frakcijai.



2.19. attēls. L pirms un pēc smalcināšanas ar *MEKA* smalcinātāju

2.1.10. Zāle (G)

Zāle (angļu val. *Grass* (G)) ir viens no izplatītākajiem sezonālajiem biomasas resursiem pilsētvides un lauksaimniecības apsaimniekotajās teritorijās, kas veidojas regulāras pļaušanas rezultātā. ES pļautā G tiek savākta no parkiem, ceļmalām un citiem publiskajiem zālieniem, kur tā tradicionāli tiek uzskatīta par zaļo atkritumu plūsmas sastāvdaļu, kurus praksē parasti atstāj mulčēšanai/kompostēšanai vai nogādā bioloģiski noārdāmo atkritumu plūsmā ³⁰⁹. ES arvien vairāk tiek attīstītas iniciatīvas, kas paredz publisko zaļo zonu pļautās G izmantošanu bioekonomikā, piem., biogāzes ³¹⁰ un biokompozītu ražošanā ³¹¹. Latvijā pļautā G tiek

uzskaitīta kā daļa no bioloģiski noārdāmo atkritumu vai zaļo atkritumu plūsmas, un tā netiek izdalīta kā atsevišķa kategorija. G faktiskie savākšanas apjomi ir atkarīgi no zaļo zonu (zālienu vai mauriņu) uzturēšanas intensitātes un plaušanas biežuma, taču publikācijas parāda ievērojamu potenciālo biomasas daudzumu, īpaši intensīvi apsaimniekotās teritorijās; vidējā G sausnas ražība ir ~ 10 t/ha gadā (~ 16 t/ha gadā ar augstu nokrišņu daudzumu) ³¹².

G tika savākta divas reizes — svaigi plauta G no privātā dārza un plauta zāle no pašvaldības uzturētā zāliena. Paraugi no privātā dārza bija salīdzinoši sausi un bez papildu piemaisījumiem, savukārt paraugi no pašvaldības uzturētā zāliena bija mitrāki un ar vizuāli atšķiramiem piemaisījumiem. Sausāka G tika žāvēta telpas apstākļos, savukārt mitrāka G tika žāvēta papildus iedarbinot ventilatoru ātrākai gaisa cirkulācijai (sk. 2.20. att.).



2.20. attēls. G žāvēšanas process

Žāvētas G apstrāde bija līdzīga L gadījumam — manuāli tika atdalīti lieli piejaukumu gabali (piem., plētais stikls) un veikta mehāniskā sijāšana ar *Retsch AS 400* smilts atdalīšanai. Smalcināšana G masai nebija nepieciešama. Izmantojot *Vibrotechnik PM120* asmeņu dzirnavas, G tika samalta līdz granulēšanai atbilstošai frakcijai (sk. 2.21. att.).



2.21. attēls. G pirms un pēc malšanas

2.1.11. Šķeldas maisījumi (WC, WR, WM)

Šķeldas paraugu un to maisījumu sagatavošana tika veikta CSA kontekstā, izmantojot biokurināmo un katlu, kas atradās SIA “BALTENKO” katlumājas teritorijā Attekas ielā 43, Ādažos. Katlumāja primāri paredzēta lapu koku kokapstrādes atlikumu vai malkas kurināmā šķeldas sadedzināšanai ar mitruma saturu 20-50 %, pelnu saturu līdz 3 % un noteiktām frakcijas prasībām, vienlaikus nepieļaujot svešķermeņu, zaļās biomasas un ķīmiski apstrādātu kokapstrādes atkritumu piejaukumu.

Šķeldas paraugi tika atlasīti, lai raksturotu atšķirīgas izcelsmes un kvalitātes biokurināmā plūsmas, kas praksē var nonākt centralizētās siltumapgādes katlumājā. Pētījumā tika iekļauta šķelda no augstas kvalitātes apaļkoksnes, zemas kvalitātes apaļkoksnes, mežizstrādes atlikumiem ar zaru piejaukumu, kā arī mežrūpniecības šķelda ar atšķirīgu frakcijas izmēru. Faktiskā šķeldas izcelsme netiek atklāta, tomēr paraugu izvēle ļāva salīdzināt tādas kurināmā īpašības kā mitruma saturs, daļiņu izmēru sadalījums un padeves vienmērīgums ārdū katlā.

Papildus katlumājas teritorijā esošajai šķeldai tika piegādātas alternatīvās biomasas granulas, kas izmantotas maisījumu sagatavošanai. Maisījumi tika veidoti kā hipotētiski kurināmā scenāriji, kuros katla operators, atkarībā no biokurināmā pieejamības, cenas un piegādes apstākļiem, daļu tradicionālās šķeldas aizstāj vai papildina ar citu biomasas plūsmu. Šajā kontekstā tika sagatavoti maisījumi ar niedru granulām, saulespuķu sēnalu un koksnes maisījuma granulām, mizas piejaukumu un mežrūpniecības zāģskaidām.

Pētījumā šķeldas paraugi tika apzīmēti kā WC1, WC2, WC3, WR1 un WR2, savukārt šķeldas maisījumi — kā WM1, WM2, WM3 un WM4 (skaidrojums sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”). WC grupas paraugi raksturoja dažādas apaļkoksnes un mežizstrādes izcelsmes šķeldas plūsmas, WR grupa — koksnes atlikumus no mežrūpniecības un mežizstrādes, bet WM grupa — šķeldas maisījumus ar alternatīvās biomasas vai zemākas kvalitātes koksnes plūsmām. Šāda paraugu struktūra ļāva novērtēt ne tikai atsevišķu šķeldas veidu piemērotību, bet arī praktiski iespējamu kurināmā sajaukšanas scenāriju ietekmi uz sadedzināšanas procesu, emisijām un katla darbības stabilitāti centralizētās siltumapgādes apstākļos.

2.2. Pētījumā izmantoto zinātnisko metožu apraksts

Promocijas darba pētnieciskā daļa strukturēta pēc pielietotām eksperimentālām un datu analīzes metodēm, pakāpeniski iegūstot datus ar mērķi novērtēt biomasas potenciālu siltumenerģijas ražošanai.

Balstoties uz 1. nodaļā veikto literatūras analīzi, promocijas darbā tika lemts iekļaut biomasas pielietojuma izpēti gan ISA, gan CSA, bet galveno fokusu vērst uz alternatīvās biomasas granulām izmantošanu ISA. Pētījuma sākumā tika veikta priekšnosacījumu vērtēšana, kas paskaidro gan izpēti robu (angļu val. *Research gap*) attiecībā uz pētījumu trūkumu par alternatīvās biomasas granulām potenciālu ne tikai no tehniskiem aspektiem, bet arī sociāliem un vides (rezultāti integrēti 1.2.2. apakšnodaļā), kā arī veido priekšstatu par noteiktu alternatīvo biomasu pieejamību (rezultāti integrēti 2.1. apakšnodaļā). Priekšnosacījumu vērtēšana veikta pielietojot bibliometrisku analīzi (sk. 2.2.1. apakšnodaļu) un materiālu plūsmas analīzi (sk. 2.1.2. apakšnodaļu). Promocijas darba autors aprobē minēto metožu pielietojumu zinātniskajos

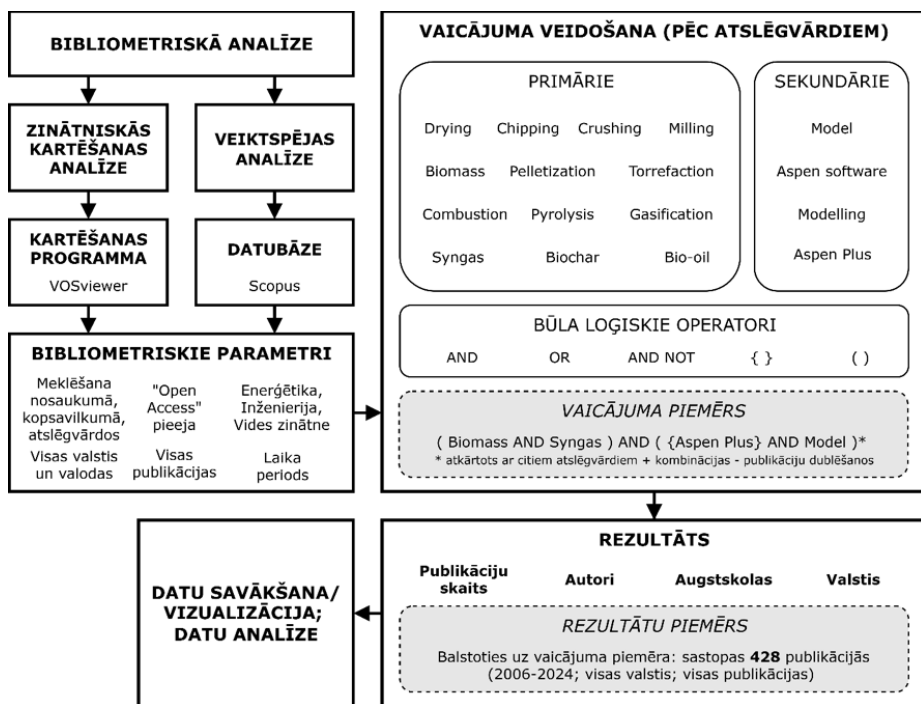
rakstos “A Bibliometric and Literature-Based Overview of Biomass Pre-treatment and Conversion Technologies Modelling with Aspen Software” un “Sankey-Based Material Flow Analysis of Residual Biomass for Combustion: A Case Study of Latvia”.

Atlasot noteiktos alternatīvās biomasas veidus granulu veidošanai un turpmākai sadedzināšanas mazas jaudas granulu katlā ISA kontekstā, kā arī saplānojot gadījuma izpēti par dažādas kvalitātes šķeldas un to maisījumu sadedzināšanu katlumājā CSA kontekstā, veidots eksperimenta plāns, kas iekļauj biomasas kvalitātes izpēti (sk. 2.2.3. apakšnodaļu) un degšanas procesa izpēti (sk. 2.2.4. apakšnodaļu). Šis pētniecības posms ietver pilna spektra pētāmo kurināmo analīzi — sākot ar kvalitātes rādītājiem (mitruma saturs, pelnu saturs, sadegšanas siltums utt.) un beidzot ar sadedzināšanas testos iegūto pelnu ķīmisko un fāžu (kristālisko struktūru) analīzi. Iegūto datu statistiskai analīzei tika pielietota regresijas analīze (sk. 2.2.5. apakšnodaļu). Promocijas darba autors aprobē minēto metožu pielietojumu zinātniskajos rakstos “Empirical Model for Predicting the Combustion Performance of Low-Quality Biomass Pellets Based on Experimental Data” un “Biomass Diversification for District Heating: Trade-Off Between Biomass Sustainability and Heat Production Efficiency”.

Alternatīvās biomasas granulu potenciāla novērtēšanai pielietotas trīs metodes — daudzkritēriju lēmumu analīze (sk. 2.2.6. apakšnodaļu), aprites cikla analīze (sk. 2.2.7. apakšnodaļu) un ilgtspējas novērtēšana (sk. 2.2.8. apakšnodaļu). Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas analīze pielietota lai apvienotu tehniski-sociālos kritērijus vienotā novērtējumā. Aprites cikla analīzē vērtēta granulu pilna aprites cikla (sākot no resursu savākšanas un beidzot ar sadedzināšanā iegūto pelnu utilizāciju) ietekme uz vidi, savukārt ilgtspējas novērtēšana balstās uz aprites cikla analīzei iegūtiem izejas datiem. Promocijas darba autors aprobē minēto metožu pielietojumu zinātniskajos rakstos “Comparative cradle-to-grave life cycle assessment of wood and alternative biomass pellet feedstocks for decentralized heating using experimental data” un “Prioritization of alternative biomass pellets for heat production using multi-criteria ranking and greenhouse gas savings assessment”.

2.2.1. Bibliometriskā analīze

Bibliometrija ³¹³ ir zinātniskā pieeja bibliogrāfisko datu izpētei ³¹⁴. Bibliogrāfiskie dati, savukārt, ir informācija par jebkāda veida publikācijām (visbiežāk zinātniskām) — klasiski tas ir autora vārds un uzvārds, publikācijas nosaukums, publikācijas gads un atslēgvārdi ³¹⁵. Mūsdienās zinātniskās publikācijas ir atrodamas elektroniskajās bibliogrāfiskās datubāzēs, kurās glabājas daudz plašāks bibliogrāfisko datu klāsts ³¹⁶. Šādas informācijas specifiska analīze ļauj noskaidrot tendences, atrast sakarības starp dažādām tematikām un meklēt jaunus pētījumu virzienus. Bibliometriskā analīze (BA) bieži pielietojama tai skaitā arī vides inženierijā ^{211,317,318}. Visbiežāk sastopamās metodes ir veikspējas analīze (VA) (angļu val. *Performance analysis*) un zinātniskās kartēšanas jeb tīkla analīze (TA) (angļu val. *Scientific mapping analysis*) ^{319,320}. BA veikšanas algoritms promocijas darba ietvaros ir redzams 2.22. attēlā.



2.22. attēls. BA algoritms

VA bibliometriskajos pētījumos galvenokārt atspoguļo vēsturisko un aktuālo atsevišķa temata popularitātes attīstību (raksturo publikāciju skaits) un ieinteresētību no citu zinātnieku puses (raksturo citēšanas intensitāte), kā arī atsevišķu zinātnisko institūciju un žurnālu ieguldījumu ^{321,322}. TA izmanto lai atbildētu uz trīs vispārīgiem pētniecības jautājumiem:

- Kāds ir temata vai pētniecības jomas zināšanu kopējais krājums un tā struktūra ³²³;
- Kāds ir temata vai pētniecības jomas virzītājspēks (institūcijas/autori, kas attīsta to) ³²⁴ un fundamentālā literatūra ³²⁵;
- Kādas ir ar tematu vai pētniecības jomu saistītas zinātnieku kopienas un potenciālie sadarbības partneri (piem., mobilitātes nolūkos) ³²⁶.

BA parasti tiek īstenota kā secīgs process, kurā vispirms tiek precizēta pētāmā problēma, pēc tam izvēlēta atbilstoša bibliogrāfiskā datubāze un definēti bibliometriskie rādītāji; tikai tad seko datu iegūšana, sakārtošana, analīze, vizualizācija un rezultātu interpretācija. Lai BA sniegtu padziļinātu priekšstatu par jomas centrālajām tēmām un to savstarpējām saiknēm, izšķiroša ir korekta atslēgvārdu un terminu sistēmas izveide: parasti nepieciešams atlasīt vairākus atslēgvārdus, kas aptver būtiskākos pētniecības virzienus konkrētajā tematikā ³²⁷. Vienlaikus šī atlase praksē nereti ir sarežģīta, jo autori bieži izmanto sinonīmus, dažādas vārdu formas un terminoloģiskas variācijas arī šķietami vienkāršiem, bieži lietotiem jēdzieniem ³²⁸. BA sākumposmā netiek veikta atslēgvārdu piemērotības pārbaude un netiek sagatavots pietiekami pilnīgs sinonīmu saraksts, analīze var būt fragmentāra vai metodiski sagrozīta. Īpaši

būtiski ir nepieļaut situāciju, kur sinonīmi tiek uzskatīti par atsevišķiem atslēgvārdiem, jo tas var mākslīgi sadrumstalot tematisko struktūru un izkropļot terminu biežuma sadalījumu.

BA balstās uz vairākām zinātniskās literatūras indeksēšanas datubāzēm ³²⁹, kuras specializējas noteiktās zinātnes jomās. Zinātniskajā vidē tiek izmantotas vairākas indeksējošās datubāzes (galvenokārt “*Web of Science*” (“WoS”) un “*Scopus*”), tostarp vides inženierzinātnēs (sk. 2.3. tabulu) ³³⁰. Katrai no tām ir savas priekšrocības un ierobežojumi BA vajadzībām. Piemēram, “WoS” datubāze ļauj eksportēt līdz 1000 ierakstiem, savukārt “*Scopus*” — līdz 2000 ierakstiem ³³¹. Citi publiski pieejamie tiešsaistes rīki (“*ScienceDirect*” vai “*MDPI*” mājaslapas) primāri kalpo kā meklēšanas rīki un neparedz tiešas BA funkcijas. Promocijas darba ietvaros izvēle tika izdarīta par labu “*Scopus*”, jo tā nodrošina kvalitatīvus bibliogrāfiskos ierakstus un ļauj eksportēt salīdzinoši lielāku datu apjomu, kas ir būtiski turpmākai analīzei.

Tabula 2.3.

Datubāžu raksturojums inženierzinātņu jomā (reprodukcija no ³³²)

Datubāze	Pieejamība	Datu lejupielāde	Ierakstu eksporta limits	API*	Formāts
<i>Scopus</i>	Maksas	Ir	Pirmie 2000 ieraksti	Ir	“Plain text”, RIS, BibTeX, CSV
<i>WoS</i>	Maksas	Ir	500 vai 1000 ieraksti, atkarīgs no iekļaujamās informācijas	Ir	“Plain text”
<i>Dimensions</i>	Bezmaksas	Ir	500 vai 2500 ieraksti, atkarībā no eksporta formāta	Ir	RIS, BibTeX, CSV, XLSX
<i>MA</i>	Bezmaksas	Izmantojot API	—	Ir	—
<i>GS</i>	Bezmaksas	Nav	—	Nav	—

* — Lietojumprogrammas saskarne (angļu val. *Application Programming Interface* (API))

Pirms datubāžu izmantošanas tiek sagatavoti strukturēti meklēšanas vaicājumi. Nepieciešamības gadījumā tiek pielietoti loģiskie operatori, kas balstās uz Būla algebru un pieejami lielākajā daļā datubāžu ³³³. *Scopus* meklētājā pieejamie loģiskie operatori ir:

- AND — atrod dokumentus, kas satur visus vaicājumā norādītos terminus;
- OR — atrod dokumentus, kas satur jebkuru no terminiem;
- AND NOT — izslēdz dokumentus, kuros ietverts nevēlamais termins.

BA ietvaros tika ņemti vērā šādi parametri un ierobežojumi:

- “*Search within*” opcija: “*Article title, Abstract, Keywords*” kombinācija (visbiežāk lietojama kombinācija citos BA pētījumos ³³⁴);
- Laika periods: no 2000. gada līdz 2025. gadam;
- Pētniecības jomas: “*Energy*”, “*Engineering*”, “*Environmental science*”;
- Dokumentu veids: visi;
- Valsts/teritorija: visas valstis;
- Valoda: darbi visās valodās, ja abstrakts pieejams angļu valodā;
- Citējamība: kopējais citātu skaits, iekļaujot pašcītātus;

- Datu eksportēšanas opcija: lejupielāde CSV datnes formātā, izvēloties citēšanas informāciju (piemēram, autors(-i), publicēšanas gads, citēšanas skaits u.c.), kā arī kopsavilkumu un atslēgvārdus.³²⁰

“Scopus” datubāze nodrošina divus rīkus VA veikšanai: “Analyzer” un “Citation overview”. “Analyzer” rīks ģenerē vizuālus grafikus par dokumentu skaitu pa gadiem, autoriem, valstīm u.tml., un šie dati tika eksportēti CSV formātā. Savukārt “Citation overview” sniedz informāciju par publikāciju citējamību, kas atspoguļo attiecīgās tēmas aktualitāti. Eksportētie dati tika apstrādāti programmā “Microsoft Office Excel 365”. Pirms TA sākšanas tika veikta literatūras analīze un identificētas pieejamas zinātniskās kartēšanas programmas, kas apkopotas 2.4. tabulā.

Tabula 2.4.

TA rīku kopsavilkums (reprodukcija no ³²²)

Programma	Versija	Gads	Izstrādātājs	Operētāj-sistēma	Lietotāja saskarne
<i>VOSviewer</i>	1.6.20	2023	Leidenas Universitāte	Win, OS X, Linux	Lietotnē
<i>Bibexcel</i>	1.0.3	2020	Ūmeo Universitāte	Win	Lietotnē
<i>CiteSpace</i>	7.0	2026	Drekselas Universitāte	Win	Lietotnē
<i>CitNetExplorer</i>	1.0.0	2014	Leidenas Universitāte	Win, OS X, Linux	Lietotnē
<i>SciMAT</i>	1.1.06	2016	Granadas Universitāte	Win, OS X, Linux	Lietotnē
<i>Sci² Tool</i>	1.3.0	2020	Indiānas Universitāte	Win, OS X, Linux	Lietotnē
<i>Biblioshiny</i>	5.2.1	2025	Neapoles Federiko II Universitāte	R valodas kods	Pārlūkā
<i>BiblioMaps</i>	3.2	2018	Lionas Universitāte	Python valodas kods	Pārlūkā

“VOSviewer” ir specializēta programmatūra zinātnisko karšu izveidei un vizualizācijai, kas izstrādāta Leidenas Universitātē un plaši atzīta starp dažādu zinātņu nozaru pētniekiem. Programmas priekšrocība ir tās spēja efektīvi apstrādāt lielus bibliogrāfiskos datu apjomus, izmantojot mērogošanas, marķējuma un blīvuma vizualizācijas algoritmus, kas ļauj skaidri identificēt publikāciju, autoru vai atslēgvārdu savstarpējās sakarības. “VOSviewer” ir brīvi pieejams rīks, un tā lietotāja interfeiss ir intuitīvs un funkcionāls, kas būtiski atvieglo datu importu un grafisko attēlojumu sagatavošanu. Programma “VOSviewer” nodrošina tiešu savietojamību ar no “Scopus” datubāzes eksportētajiem bibliogrāfiskajiem ierakstiem, kas ir īpaši nozīmīgi, ņemot vērā šajā pētījumā izmantoto datu avotu. Programmas piedāvātā funkcionalitāte ļauj īstenot vairākus bibliometriskās analīzes veidus, no kuriem šajā darbā izmantotas divas praksē visplašāk pielietotās pieejas — līdzautorības (angļu val. *Co-authorship*) un atslēgvārdu līdzlietošanas (angļu val. *Co-occurrence*) analīze³³⁵. “Līdzautorības analīze” sniedz iespēju raksturot pētnieku savstarpējās sadarbības struktūru un identificēt dominējošos tematiskos virzienus, savukārt atslēgvārdu līdzlietošanas analīze ļauj noteikt konceptuālās saiknes un galvenās tēmas pētāmajā zinātniskajā laukā.

Rezultātu interpretācijai “VOSviewer” piedāvā vairākus vizualizācijas risinājumus, no kuriem šajā pētījumā izmantoti tīkla vizualizācijas un pārklājuma vizualizācijas režīmi. Tīkla vizualizācijas režīmā analīzes vienības tiek attēlotas ar etiķetēm, kuru izmērs atspoguļo

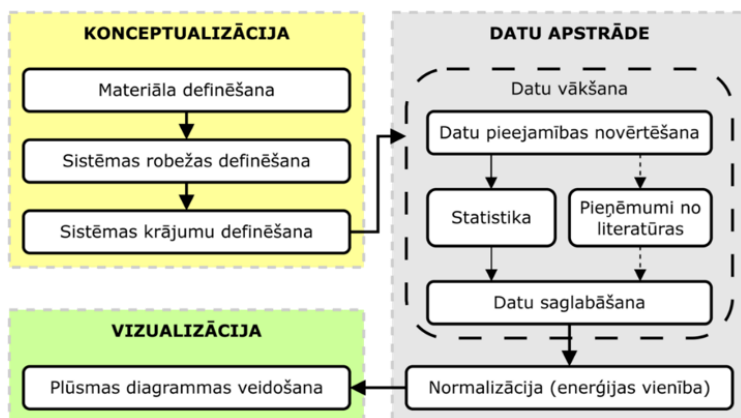
attiecīgā elementa relatīvo nozīmīgumu, savukārt krāsu kodējums norāda uz klasteru struktūru. Pārklājuma vizualizācijas režīmā krāsu gradients raksturo publikāciju hronoloģisko dimensiju, tādējādi ļaujot analizēt konkrētu pētniecības tēmu attīstību laika gaitā. Šādas vizualizācijas pieejas kombinācija nodrošina iespēju vienlaikus identificēt gan strukturālās savstarpējās saiknes, gan tematisko dinamiku, sniedzot padziļinātu ieskatu izvēlētajās pētniecības jomas attīstībā.

2.2.2. Materiālu plūsmas analīze

Biomases resursu pieejamība ir viens no izšķirošajiem faktoriem, kas nosaka iespējas attīstīt ilgtspējīgu granulu ražošanu un paplašināt alternatīvo izejvielu izmantošanu ārpus tradicionālās koksnes biomasas. Lai šo faktoru validētu tālākajam alternatīvo granulu potenciāla izvērtējumam, tika izmantota materiālu plūsmas analīze (angļu val. *Material Flow Analysis* (MFA)), kas nodrošina sistemātisku resursu plūsmas un krājumu novērtējumu noteiktā telpiskā un laika ietvarā ³³⁶; pieeja pēdējo desmit gadu laikā ir plaši pielietota ^{337–340}. MFA ļauj identificēt, cik liels materiālu apjoms konkrētajā sistēmā:

- ir pieejams kā kopējā raža vai atlikumi,
- tiek izmantots dažādiem mērķiem (pārtikai, lopbarībai, enerģijai),
- paliek kā blakusprodukts vai atkritums, ko potenciāli var novirzīt granulu ražošanai.

Plūsmas diagrammas veidošanas algoritms ir redzams 2.23. attēlā.



2.23. attēls. Materiālu plūsmas analīzes veikšanas algoritms

Sākumā ir nepieciešams definēt materiālus (aprakstīti 2.1. apakšnodaļā), sistēmas robežas un sistēmas krājumus. Viena no izvades plūsmām visos gadījumos ir biomasas daļa, kas var tikt izmantota enerģijas (granulu) ražošanai. Ievade ir materiāla kopējā raža. Krājumi atkarīgi no iekļautiem procesiem un izmantošanas iespējām (piem., ilgstoša uzglabāšana noliktavās, neizmantoti lauksaimniecības atlikumi, neizmantoti mežizstrādes atlikumi). Krājumu definēšana ļauj saprast, cik liels materiāla apjoms paliek sistēmā un vai ir strukturāls neizmantotais potenciāls granulu ražošanai.

Tālāk tika veikta datu apstrāde, kas ietver informācijas apkopošanu no statistikas datubāzēm un literatūras avotiem, lai noteiktu katra materiāla pieejamos apjomus. Ja dati par konkrēto materiālu ir pieejami un pietiekami detalizēti, tie tiek izmantoti aprēķinos un saglabāti turpmākai apstrādei. Gadījumos, kad informācija ir nepilnīga vai statistiskajos avotos nav pieejama, tiek formulēti pamatoti pieņēmumi, balstoties uz līdzīgiem pētījumiem vai reģionāliem datiem. Pēc datu apkopošanas visi rādītāji tika saskaņoti vienotās mērvienībās un pārvērsti enerģētiskajās vērtībās, izmantojot augstāko sadegšanas siltumu (sk. 2.2.3. apakšnodaļu), lai nodrošinātu salīdzināmību starp dažādiem materiāliem un to potenciālo ieguldījumu granulu ražošanā.

Biomases pieejamības pētījumos viens no būtiskākajiem izaicinājumiem ir pilnvērtīgu un konsekventu datu trūkums ^{341–343}. Gan literatūrā, gan statistiskajos avotos bieži nav pieejami detalizēti, telpiski un laika ziņā reprezentatīvi dati par visu biomasas plūsmu pilno ciklu. Šādos apstākļos tradicionālais MFA pielietojums ar pilnu masas bilances slēgšanu un nenoteiktības kvantificēšanu nav metodoloģiski iespējams. Tāpēc MFA promocijas darba ietvaros tika izmantota primāri kā validācijas instruments 2.1. apakšnodaļā atsevišķi ņemto biomasu (W, R, S, BSG un L) pieejamības enerģētikai novērtēšanai.

MFA rezultātu attēlošanai tika izmantots “*SankeyMATIC*” rīks (rīku salīdzinājums sniegts 2.5. tabulā), jo promocijas darba vajadzībām bija nepieciešams vienkāršs, reproducējams un viegli pielāgojams risinājums relatīvo materiālu plūsmu vizualizācijai. Šis rīks ļauj tieši definēt saiknes starp sistēmas posmiem un attēlot to intensitāti proporcionāli plūsmas apjomam, nepārveidojot sākotnējos datus sarežģītās modelēšanas struktūrās. Tas bija būtiski, jo biomasas pieejamības dati dažādiem resursiem nebija vienlīdz detalizēti un promocijas darba mērķis nebija pilnas masas bilances slēgšana, bet gan pieejamā un potenciāli izmantojamā resursa vizuāla validācija. Promocijas darba ietvaros *Sankey* tipa diagrammas tika izmantotas kā metodoloģijas demonstrācija pieciem no desmit analizētajiem granulu veidiem. Šāda vizualizācija ļāva pārskatāmi parādīt, kurā sistēmas posmā biomasu tiek izmantota, uzkrājas, zūd vai paliek potenciāli pieejama granulu ražošanai, tādējādi nodrošinot salīdzināmu pamatu alternatīvo biomasas resursu izvērtēšanai.

Tabula 2.5.

MFA rīku salīdzinājums

Rīks	Raksturojums	Priekšrocības	Ierobežojumi	Pielietots
<i>STAN</i>	Programmatūra materiālu plūsmu un vielu bilance analīzei. Atbalsta sistēmas modelēšanu, datu pārvaldību, masas bilances aprēķinus un plūsmu vizualizāciju; izstrādātājs — Vīnes Tehniskajā universitātē	Nodrošina masas bilances aprēķinus vienotā sistēmā; Iekļauta datu nenoteiktības modelēšana; Piemērota akadēmiskiem un stratēģiskiem MFA pētījumiem	Interfeiss ir tehnisks (prasa sākotnējo apmācību); Ierobežota vizualizācijas elastība; Atbalsta tikai <i>Win</i> operētājsistēmu	^{344–346}

Rīks	Raksturojums	Priekšrocības	Ierobežojumi	Pielietots
<i>e!Sankey</i>	Profesionāla programmatūra plūsmas diagrammu izstrādei, paredzēta enerģijas un materiālu plūsmu attēlošanai ar augstu grafisko precizitāti; izstrādātājs — <i>iPoint Systems</i>	Intuitīvs plūsmas/mezglu veidošanas interfeiss; Automatizēta vienību un plūsmu balansēšana; Ļauj eksportēt augstas izšķirtspējas diagrammas publikācijām	Komerציāla licence (nav brīvi pieejama); Nepiedāvā masas bilances aprēķinus; Apmācības process var būt laikietilpīgs	347,348
<i>Sankey MATIC</i>	Tiešsaistes bezmaksas rīks plūsmas diagrammu veidošanai, paredzēts ātrai vizualizācijai bez programmēšanas zināšanām	Bezmaksas un brīvi pieejama tiešsaistē; Ātra datu ievade un vizualizācijas ģenerēšana; Piemērota publikāciju papildmateriāliem un prezentācijām	Neatbalsta datu bilances aprēķinus; Ierobežota pielāgošanas iespēja; Nav piemērota lielu datu kopu automatizētai apstrādei	349,350

2.2.3. Biomasas kvalitātes analīze

Biomasas degvielu ķīmiskās un fizikālās īpašības būtiski ietekmē sadegšanas gaitu, efektivitāti un dūmgāzu sastāvu. 2.6. tabulā apkopotas kurināmā testēšanas laikā veiktās darbības un noteiktie parametri, kas iedalīti trīs grupās: pamatrādītāju analīzes (angļu val. *Proximate analysis*) parametros (PA), elementanalīzes (angļu val. *Ultimate analysis*) parametros (UA) un papildu kurināmā raksturlielumos. PA ietver mitruma saturu (*MC*), pelnu saturu (*AC*), gaistošo organisko vielu saturu (*VM*) un fiksētā oglekļa saturu (*FC*). UA atspoguļo cietajam kurināmajam raksturīgo elementu sastāvu (*CHNSO*). Papildu kurināmā raksturlielumus veido siltumspēja — augstākais (Q_a^d) un zemākais (Q_z^d) sadegšanas siltums —, pelnu kušanas temperatūra (*AMP*), tilpumblīvums (*BD*), mehāniskā izturība (*DU*) un frakciju jeb daļiņu izmēru sadalījums (*PSD*).

Tabula 2.6.

Kurināmā eksperimentālās izpētes parametri, metodes un aprīkojums (skaidrojumus sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

Aktivitāte/parametra noteikšana	Metodoloģiskā bāze	Aprīkojums
Paraugu sagatavošana	LVS EN ISO 14780:2017	Griezējdzimavas <i>Vibrotehnik PM120</i>
<i>MC</i>	LVS EN ISO 18134-2:2017	Svari <i>Precisa XB 120A</i>
	LVS EN ISO 18134-3:2015	Žāvkapis <i>Ecocell 55</i>
		Svari <i>Precisa XB 120A</i>
<i>AC</i>	LVS EN ISO 18122:2016	Mufelkrāsns <i>Nabertherm L3/11/P320</i>
		Eksikators
		Mufelkrāsns <i>SNOL 7.2/1300</i>
<i>VM</i>	LVS EN ISO 18123:2023	Svari <i>Precisa XB 120A</i>

Aktivitāte/parametra noteikšana	Metodoloģiskā bāze	Aprīkojums
		Mufelkrāsns <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
<i>FC</i>	Balstīts uz literatūrā aprakstīto aprēķina metodi	-
<i>CHNSO</i>	LVS EN ISO 16948:2015 LVS EN ISO 16994:2016 LVS EN ISO 16993:2016	<i>Costech ESC 4010</i> Svari <i>RADWAG ASI20.R2 PLUS</i>
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> Kalorimetriskā bumba <i>IKA C 5010</i>
<i>AMP</i>	LVS EN ISO 21404:2020	Pelnu kušanas analīzes iekārta <i>Carbolite CAF DIGITAL</i>
<i>BD</i>	LVS EN ISO 17828:2016	Metāla trauks ar rokturiem ar apjomu 5 l
<i>DU</i>	LVS EN ISO 17831-1:2016	Motors <i>Motovario HA 42</i> Sijātājs <i>Retsch AS 400</i> Svari <i>KERN 572-57</i>
<i>PSD</i>	LVS EN ISO 17827-1:2016	Sijātājs <i>Retsch AS 400</i> Svari <i>KERN 572-57</i>

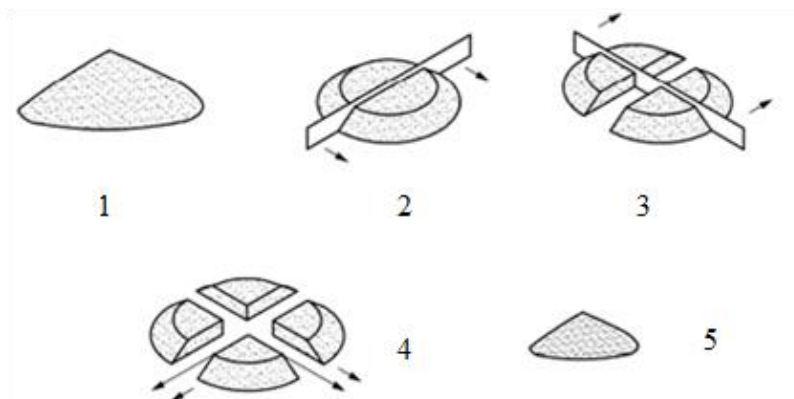
Turpmākās apakšnodaļās ir sīkāk aprakstīts katras atsevišķas aktivitātes/parametru noteikšanas gaita.

Paraugu sagatavošana

No visiem biomasas veidiem, kas izmantoti promocijas darba ietvaros, laboratorijā nekavējoties tika atdalīta reprezentatīva parauga masa, un paraugu sagatavošana tika veikta saskaņā ar LVS EN ISO 14780:2017 ³⁵¹. Parauga sagatavošanas mērķis ir nodrošināt tā sastāva nemainību parauga dalīšanas un daļiņu izmēra samazināšanas laikā, vienlaikus minimizējot mitruma un materiāla zudumus. Tā kā testējamā parauga masa ir mazāka par laboratorijā nogādāto kopējo paraugu, nepieciešama rūpīga homogenizācija un dalīšana.

Reprezentativitātes nodrošināšanai visa parauga masa tika kvartēta jeb sadalīta četrās aptuveni vienādās daļās (sk. 2.24. att.). Paraugu izbēra uz tīras, sausas virsmas un, berot materiālu vienā punktā, izveidoja konisku kaudzi; šo darbību atkārtoja trīs reizes, lai uzlabotu materiāla homogenitāti. Pēc tam koniskās kaudzes virsotni saplacināja un paraugu ar lāpstiņu sadalīja četrās vienādās ceturtdaļās, izveidojot divas savstarpēji perpendikulāras dalījuma līnijas. No sadalītā parauga tika izņemtas divas pretējās ceturtdaļas, bet atlikušās daļas atkārtoti apvienoja un kvartēja, līdz tika iegūta nepieciešamā laboratorijas parauga masa. Katrā

atkārtojumā tika izņemtas pretējās daļas no tās pašas dalījuma diagonāles, kas tika izvēlēta pirmajā dalīšanas posmā.



2.24. attēls. Parauga sagatavošana (1: koniskās kaudzes izveidošana, 2: parauga kvartēšana, 3: parauga kvartēšana, 4: parauga atdalīšana, 5: paraugs pēc kvartēšanas) ³⁵¹

Lai paraugi sasniegtu līdzsvaru ar laboratorijas telpas temperatūru un mitrumu, tie tika atstāti vismaz uz 24 stundām iekštelpās. Atsevišķām biomasām (BSG, L un G) līdzsvara laiks var būt ilgāks, tādēļ paraugi tika periodiski maisīti.

Mitruma saturs

Parauga kopējais *MC* jeb saņemtā parauga *MC* tika noteikts saskaņā ar LVS EN ISO 18134-2:2017 ³⁵². Paraugu novieto žāvskapī *Ecocell 55* pie temperatūras 105 °C un žāvē līdz konstantai masai. Mitruma saturu aprēķina pēc masas izmaiņas un izsaka procentos pēc vienādojuma:

$$MC = \frac{m_w - m_d}{m_w} \cdot 100, \quad (2.1)$$

kur

MC — parauga mitruma saturs (kopējais/darba masas), %;

m_w — parauga masa pirms žāvēšanas, g;

m_d — parauga masa pēc žāvēšanas, g.

Pēc mitruma satura noteikšanas izžāvētais paraugs tika samalts pulverveida frakcijā izmantojot ar 1 mm sietu aprīkotas griezējdzirnavas *Vibrotechnik PMI20* un izmantots tālākajām analīzēm. 2.25. attēlā parādīts BSG paraugs pirms un pēc malšanas.



2.25. attēls. BSG pirms (pa kreisi) un pēc (pa labi) malšanas

Parauga darba masas MC tika noteikts saskaņā ar LVS EN ISO 18134-3:2015 ³⁵³. Metodes princips ir analogisks kopējā MC noteikšanai, taču tiek izmantots mazāks parauga daudzums (~ 1 g), un žāvēšana notiek ierobežotas gaisa apmaiņas apstākļos. Parauga darba masas MC tiek pielietots AC , VM un Q_z^d aprēķinos.

Pelnu saturs

AC tika noteikts saskaņā ar LVS EN ISO 18122:2016 ³⁵⁴. izmantojot paraugu ar daļiņu izmēru ~ 1 mm. Katram paraugam veic vismaz divus paralēlus mērījumus. Pirms testa veikšanas sagatavo tīģeļus jeb keramiskos trauciņus: tukšos un iztīrītos trauciņus ievieto trauciņu apstrādes mufelkrāsnī *SNOL 7.2/1300* un karsē pie 550 °C temperatūrā vismaz 60 minūtes. Pēc izņemšanas tos atdzesē 5–10 minūtes uz siltumizturīgas virsmas un pēc tam 25 minūtes eksikatorā līdz konstantai masai. Kad trauciņi ir atdzisuši, nosaka to masu ar $0,1$ mg precizitāti. Paraugu homogenizē un apmēram 1 g materiāla ievieto tīģelī plānā slānī ($\leq 0,1$ g/cm²). Nosaka parauga masu kopā ar tīģeli. Karsēšanas procedūra AC noteikšanas mufelkrāsnī *Nabertherm L3/11/P320* notiek vairākos posmos:

- 30–50 minūtes mufelkrāsns programma paaugstina temperatūru līdz 250 °C ar ātrumu $4,5$ – $7,5$ °C/min (ieteicamie režīmi ir atkarīgi no biomasas veida un aprakstīti standartos);
- Mufelkrāsns 60 minūtes uztur temperatūru pie 250 °C, lai iztvaikotu gaistošās organiskās vielas pirms uzliesmošanas;
- 30 minūtes mufelkrāsns programma paaugstina temperatūru līdz 550 ± 10 °C ar ātrumu ap 10 °C/min, kas tiek uzturēta vismaz 120 minūtes.

Pēc karsēšanas tīģeļus izņem, atdzesē 5–10 minūtes uz siltumizturīgas virsmas un vēl 25 minūtes eksikatorā līdz konstantai masai. Ja laboratorijā ir paaugstināts mitrums (piem., silto āra apstākļu gadījumā), eksikatorā izmanto vāciņus, lai novērstu pelnu masas pieaugumu mitruma uzsūkšanas dēļ. Kad eksikatorā sasniegta iepriekš fiksētā temperatūra, nosaka tīģeļa un pelnu masu. AC tiek izteikts sausnas stāvoklī kā pelnu masas īpatsvars paraugā ņemot vērā parauga darba masas MC , izmantojot vienādojumu:

$$AC = \frac{m_w - m_d}{m_w} \cdot 100 - \frac{100}{100 - MC} \quad (2.2)$$

kur

AC — pelnu saturs sausnas stāvoklī, %.

Parauga AC tiek pielietots FC un O satura ($CHNSO$ ietvaros sausai masai) aprēķinā.

Gaistošo organisko vielu saturs

VM tika noteikts saskaņā ar LVS EN ISO 18123:2023³⁵⁵. Metode nosaka masas zudumu, kas rodas, paraugu karsējot vidē bez gaisa 900 ± 10 °C temperatūrā 7 minūtes. Tā kā tests ir empīrisks, nepieciešama stingra temperatūras pieauguma, gala temperatūras un testa ilguma kontrole. Tikpat būtiski ir pilnībā novērst gaisa klātbūtni karsēšanas laikā, lai nepieļautu parauga oksidēšanos; tādēļ īpaša uzmanība jāpievērš trauciņa vāka piegulšanai. Pēc būtības, tiek nodrošināts pirolīzes process. Paralēli tiek noteikts parauga darba masas MC lai veiktu korekciju uz sausnas stāvokli.

Testēšanai izmanto paraugu ar daļiņu izmēru ≤ 1 mm, viendabīgi sajauktu un laboratorijas atmosfēras līdzsvarotā mitruma stāvoklī (vai iepriekš izžāvētu). Trauciņiem jābūt cilindriskiem, no kvarca, ar labi noslēgtu vāku; atstarpe nedrīkst pārsniegt 0,5 mm. Stends tiek izgatavots no karstumizturīga tērauda stieples ar 2 mm biezām keramiskām atbalsta plāksnēm. Stabila temperatūra 900 ± 10 °C tika nodrošināta ar mufelkrāsni SNOL 7.2/1300, neņemot vērā paraugu ievietošanas brīdi. Pirms testa tukšus trauciņus un standu ievieto mufelkrāsnī, lai tie sasniegtu gala temperatūru. Temperatūras kontrole veikta ar kalibrētu K-tipa termopāri un *FLUKE PT-100* zondi, kas pieslēgtas elektroniskajam termometram *FLUKE 1528 CHUBE-4*. Testa gaita bija sekojoša:

- Trauciņus izņem no krāsns un atdzesē uz karstumizturīgas plāksnes 5 minūtes (līdz $\sim 30\text{--}50$ °C virs telpas temperatūras), pēc tam 10–15 minūtes eksikatorā;
- Nosver atdzesētos trauciņus ar vāciņiem (precizitāte 0,1 mg);
- Trauciņā ievieto $1,0 \pm 0,1$ g parauga, nodrošina vienmērīgo slāni ar vibrācijas iedarbību un atkal uzliek vāku;
- Trauciņus ievieto atdzesētā stendā un novieto krāsnī. Karsē vidē bez gaisa 900 ± 10 °C temperatūrā 7 min ± 5 s;
- Trauciņus izņem no mufelkrāsns, atdzesē 5 minūtes uz karstumizturīgas plāksnes un pēc tam 10–15 minūtes eksikatorā līdz nosvēršanai.

VM tiek aprēķināts pēc vienādojuma:

$$VM = \left[\frac{100 \times (m_2 - m_3)}{m_2 - m_1} - MC \right] \times \left(\frac{100}{100 - MC} \right), \quad (2.3)$$

kur

VM — gaistošo vielu saturs paraugā, %;

m_1 — tukša trauciņa un vāciņa masa, g;

m_2 — tukša trauciņa, vāciņa un parauga masa pirms karsēšanas, g;

m_3 — tukša trauciņa, vāciņa un parauga masa pēc karsēšanas, g.

Rezultāts ir sausnas stāvoklī. Par katru paraugu aprēķina vidējo vērtību no vismaz diviem atkārtojumiem, noapaļojot līdz 0,1 %. Atkārtojamības robeža ir 2,0 % no vidējās vērtības, reproducējamības robeža ir 4,0 %. Parauga *VM* tiek pielietots *FC* aprēķinā.

Fiksētais ogleklis

FC tika noteikts ar starpības metodi, izmantojot iegūtos *AC* un *VM* rezultātus. *FC* noteikšanai nav izstrādāts atsevišķs standarts, tomēr aprēķina metode balstīta uz literatūrā sastopamām pieejām pēc vienādojuma ^{356,357}:

$$FC = 100 - (VM + AC) \quad (2.4)$$

Šī pieeja ir piemērota gadījumos, kad fiksēto oglekli nav nepieciešams noteikt ar tiešu instrumentālu metodi, un tā nodrošina savstarpēji salīdzināmus rezultātus starp paraugiem. Visi parametri izteikti masas procentos uz sausnas bāzes. Tā kā *FC* ir atvasināts lielums, tā precizitāti nosaka *VM* un *AC* mērījumu kvalitāte; līdz ar to rezultāts tiek izmantots kā papildrādītājs parauga sadegšanas procesa raksturošanai, nevis absolūta oglekļa daudzuma indikators.

Kurināmā elementārā analīze

Elementu C, H, N, S un O saturs tika noteikts, apvienojot LVS EN ISO 16948:2015, LVS EN ISO 16994:2016 un LVS EN ISO 16993:2016 metodoloģiju ^{358–360}. Analīzi veica ar *Costech ECS 4010* elementanalizatoru, kurā paraugu sadedzina augstā temperatūrā ar skābekļa padevi, veidojot CO₂, H₂O, N₂ un SO₂ (sk. 2.26. att.).



2.26. attēls. *Costech ECS 4010* elementanalizators un to komponentes

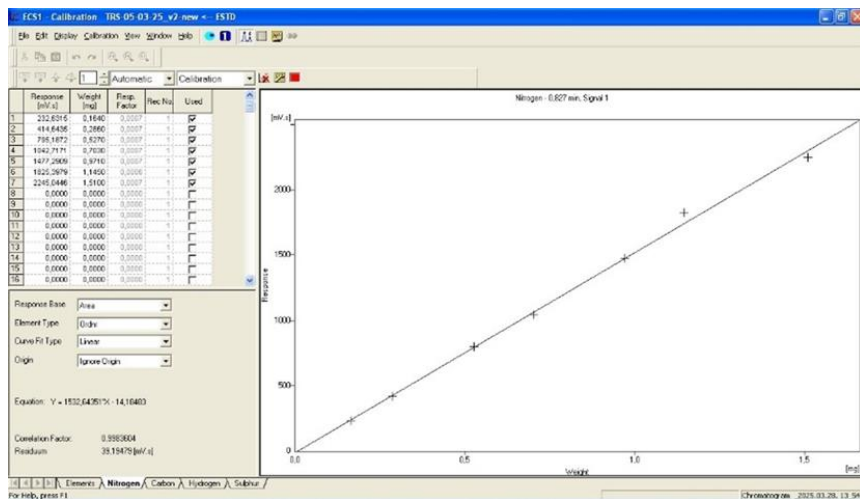
Pilnīgai oksidācijai izmantots katalītiski iepriekš iepakots reaktors. Iegūtās gāzes tiek atdalītas hromatogrāfijas kolonnā ar pastāvīgu nesējgāzes plūsmu, un to daudzumu nosaka ar termiskās vadītspējas detektoru. Analizatora darba parametri norādīti 2.7. tabulā.

Tabula 2.7.

Elementanalizatora darbības specifikācija

Sistēmas daļa	Specifikācija	Iestatījumi
Reaktors	Standarta komponente (2.26. attēlā redzams pildījums — elektrolītiskais Cu, WO ₃ , WO ₃ /Al ₂ O ₃)	1020 °C
Kolonna	Standarta komponente (N ₂ -CO ₂ -H ₂ O-SO ₂ atdalīšanai, 2 m)	75 °C
Nesējgāze	He, augsta tīrības pakāpe (99.999 %)	110 mL/min
Skābekļa padošana	O ₂ , augsta tīrības pakāpe (99.999 %)	Nepārtraukta cirkulācija
Standarta šķīdums	Sulfanilamīda (C ₆ H ₈ N ₂ O ₂ S)	1 – 10 mg

Paraugu svēršanai izmantota *RADWAG ASI20.R2 PLUS* analītiskā līmeņa svāri ar ±0,01 mg precizitāti. Kalibrēšanai sagatavoti septiņi 1–10 mg sulfanilamīda standarta šķīduma paraugi (sertificētais sastāvs: C – 41,85 %, H – 4,68 %, N – 16,27 %, S – 18,62 %), kas iesvērti tieši alvas kapsulās un hermētiski aizlocīti. Visu elementu kalibrēšanas līkņu regresijas koeficienti bija > 0,995, un elementu masas frakciju aprēķinu veica programmatūra “*EAS Clarity*”, izmantojot kalibrēšanas līkņu laukuma-masas attiecību (sk. 2.27. att.).



2.27. attēls. Kalibrēšanas līkne slāpeklim

Pirms analīzes visi paraugi tika sijāti un izmantota frakcija 250–500 μm. Katram paraugam sagatavoja divas atkārtojuma porcijas (3–5 mg), kas iesvērtas alvas kapsulās un analizētas identiskos apstākļos.

Skābekļa saturs netika noteikts instrumentāli. Tas tika aprēķināts ar starpības metodi no pārējo elementu masas frakcijām, ievērojot analizē izmantoto sausas bāzi un atbilstoši standartu metodoloģijai:

$$O = 100 - (C + H + N + S + AC), \quad (2.5)$$

kur

O — skābekļa saturs sausā masā, %;

C — oglekļa saturs sausā masā, %;

H — ūdeņraža saturs sausā masā, %;

N — slāpekļa saturs sausā masā, %;

S — sēra saturs sausā masā, %.

Augstākais un zemākais sadegšanas siltums

Siltumspēja tika noteikta saskaņā ar LVS EN ISO 18125:2017 ³⁶¹, izmantojot automātisko isoperibolisko kalorimetru *IKA C2000* (sk. 2.28. att.). Pirms analīzes kalorimetrisko bumbu kalibrēja ar sertificētu benzoscābi. Testēšanu veic skābekļa vidē, nemainīgā tilpumā un spiedienā, ar 25 °C ūdens atsaucis temperatūru. Siltumspējas noteikšanas pamatā ir temperatūras izmaiņa kalorimetra darba kamerā parauga sadegšanas laikā.



2.28. attēls. Kalorimetrs *IKA C2000* ar pievienotu kalorimetrisko bumbu

Tā kā kalorimetrā tiek mērīts atsevišķa sausā parauga izdalītais siltums, kas reprezentē siltumspēju uz sausas bāzes, ir nepieciešams, pirmkārt, izrēķināt Q_a^d un Q_z^d pēc jau iepriekš noteiktā *CHNSO*, un, otrkārt, pārrēķinu uz darba masu pēc zināmā *MC* un *AC*, balstoties uz standarta metodoloģiju. Q_a^d iegūst pēc vienādojuma:

$$Q_a^d = \left(H_0 - \frac{Q_N + Q_S}{m_s} \right) \cdot \frac{100}{100 - MC} = \left(H_0 - \frac{Q_N + (57 \cdot S \cdot m_s)}{m_s} \right) \cdot \frac{100}{100 - MC}, \quad (2.6)$$

kur

H_0 — parauga sadedzināšanas siltums kalorimetrā, J/g;

Q_N — korekcija par slāpekļskābes veidošanos, J;

Q_S — korekcija par sērskābes veidošanos, J;

m_s — kalorimetrā ievietotā parauga sausā masa, g.

Savukārt Q_z^d iegūst pēc vienādojuma:

$$\begin{aligned} Q_z^d &= \left(H_0 - \frac{Q_N + Q_S}{m_s} \right) - 212.2 \cdot H - 0.8 \cdot (O + N) = \\ &= \left(H_0 - \frac{Q_N + (57 \cdot S \cdot m_s)}{m_s} \right) - 212.2 \cdot H - 0.8 \cdot (O + N) \end{aligned} \quad (2.7)$$

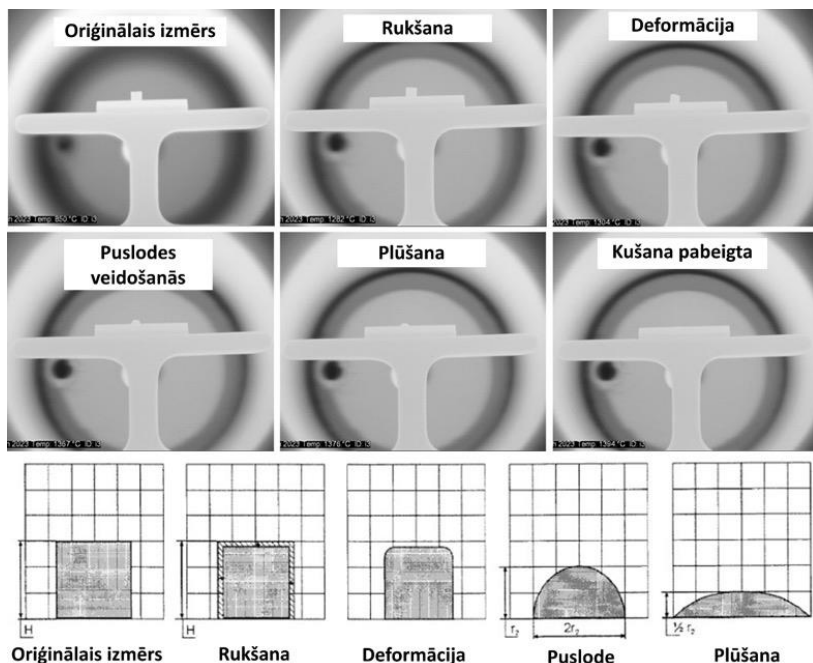
Lai gan pārrēķinot sadegšanas siltumus mērvienība paliek J/g, starptautiski šos rādītājus parasti attēlo mērvienībā MJ/kg, dalot sākotnējo vērtību ar 1000. Izteikšana MJ/kg nodrošina ērtu skaitlisko mērogu, atvieglo rezultātu salīdzināšanu starp dažādiem kurināmajiem un ir saskaņota ar enerģētikas praksē lietotajām vienībām.

Pelnu kušanas temperatūra

Pelnu kušanas testam nepieciešamie pelni tika iegūti karsējot paraugu kontrolētos apstākļos 550 ± 10 °C temperatūrā — process atkārtoti AC noteikšanas procedūru. Pašu pelnu kušanas testu veic saskaņā ar LVS EN ISO 21404:2020³⁶², izmantojot *Carbolite CAF DIGITAL*. Pelnu kušanas testu veica oksidējošā atmosfērā. Testā nosaka četras temperatūras (sk. 2.29. att.), kas raksturo pelnu fizikālās un vizuālās izmaiņas karsēšanas procesā:

- Rukšana (angļu val. *Shrinkage starting temperature*) – temperatūra, kurā pelnu presējuma laukums samazinās līdz < 95 % no sākotnējā laukuma;
- Deformācija (angļu val. *Deformation temperature*) – temperatūra, kurā parādās pirmās pelnu deformācijas pazīmes;
- Puslodes veidošanās (angļu val. *Hemisphere temperature*) – temperatūra, kurā paraugs sasniedz puslodes formu;
- Plūšana (angļu val. *Flow temperature*) – temperatūra, kurā paraugs izplūst un augstums ir puse no HT diametra.

Šajā darbā par AMP tiek uzskatīta deformācijas temperatūra, jo tieši atspoguļo pelnu kušanas sākumu un sakušņu (angļu val. *Slag*) veidošanos. Tas nodrošina salīdzināmu un fiziski pamatotu pelnu kušanas raksturojumu dažādiem biokurinām paraugiem.



2.29. attēls. Parauga kušanas procesa piemērs atbilstoši novērojumiem *Carbolite CAF DIGITAL* (augšā) un standartā esošai vizualizācijai (lejā)

Tilpumblīvums

BD tika noteikts saskaņā ar LVS EN ISO 17828:2016³⁶³. Testēšanai izmantots cilindrisks 5 l tilpuma konteiners, kurā paraugs tiek iepildīts brīvā biršanas režīmā (sk. 2.30. att.).



2.30. attēls. Konteiners tilpumblīvuma noteikšanai

Konteineru novieto uz līdzenas virsmas un piepilda, berot paraugu no 20–30 cm augstuma, lai veidotos maksimālais konusveida uzbērums. Pēc piepildīšanas konteiners tiek vairākkārt pacelts vertikālā stāvoklī un brīvi nolaists no ~ 15 cm augstuma, nodrošinot parauga sablīvēšanos. Atbrīvotajā telpā papildus ieber paraugu, līdz trauks ir pilns. Lieko materiālu

noņem ar lāpstiņu, to viegli slidinot cirkulārās kustībās pāri konteineru augšmalai, veidojot vienmērīgu virsmu. BD aprēķina kā masas attiecību pret konteineru tilpumu. Testēšanai izmanto divas parauga porcijas, un rezultāts tiek izteikts kā abu mērījumu vidējā vērtība. Aprēķins veikts pēc vienādojuma:

$$BD = \frac{m_2 - m_1}{V}, \quad (2.8)$$

kur

BD — tilpumblīvums, kg/m^3 ;

m_2 — ar paraugu piepildīta konteineru masa, kg ;

m_1 — tukša konteineru masa, kg ;

V — konteineru tilpums ($5 \text{ l} = 0,005 \text{ m}^3$), m^3 .

Mehāniskā izturība

DU tika noteikta saskaņā ar LVS EN ISO 17831-1:2016³⁶⁴. Standarts paredz, ka DU tiek noteikta tikai granulām. Testēšanai ~ 500 g granulū ievieto rotējošā kastē, kas piestiprināta pie rotējošas ass, kuru, savukārt, iedarbina motors *Motovario HA 42* (sk. 2.31. att.).



2.31. attēls. Standartam atbilstoša mehāniskās izturības noteikšanas stends

Kastes rotācijas laikā granulū paraugs tiek pakļauts atkārtotiem triecieniem un berzei, kas rodas granulū savstarpējās sadursmēs un saskarē ar sienām. Testa laikā kaste veic 500 rotācijas ar 50 apgr./min ātrumu. Pēc rotēšanas cikla paraugu izņem un izsijā caur 3,15 mm sietu, lai atdalītu sabrukušās un sasmalcinātās daļiņas. DU nosaka kā neskarto (nesadrupušo) granulū masas attiecību pret sākotnējo parauga masu. Masas noteikšanai tika izmantoti svāri *KERN 572-57* (sk. 2.32. att.).



2.32. attēls. Svari *KERN 572-57*

Testēšanai izmanto divas parauga porcijas, un gala rezultāts ir abu mērījumu vidējā vērtība. Aprēķins veikts pēc vienādojuma:

$$DU = \frac{m_A}{m_E} \cdot 100, \quad (2.9)$$

kur

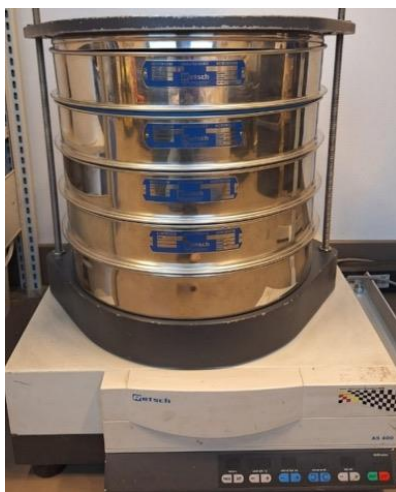
DU — granulū mehāniskā izturība, %;

m_A — granulū masa pirms rotācijas procedūras, kg;

m_E — granulū masa pēc rotācijas procedūras, kg.

Daļiņu izmēru sadalījums

PSD tika noteikts saskaņā ar LVS EN ISO 17827-1:2016 ³⁶⁵, izmantojot sietu vibrācijas iekārtu *Retsch AS 400* (sk. 2.33. att.). PSD tika noteikts šķeldas paraugiem un to maisījumiem.



2.33. attēls. Sijātājs *Retsch AS 400*

Testa paraugi tika sagatavoti ar atbilstoši augstāk darbā aprakstītai kvartēšanas metodei, nodrošinot reprezentativitāti. Tā kā nepieciešamas vismaz divas atkārtojuma porcijas, tika sagatavotas divas vienādas daļas visiem pētāmiem šķeldu paraugiem un to maisījumiem. Viena testa veikšanai nepieciešamais parauga daudzums bija 2 kg. Pamatojoties uz analizējamo kurināmā frakciju, tika izvēlēti četri sieti ar sekojošiem caurumu izmēriem:

- 31,5 mm
- 16 mm
- 8 mm
- 3,15 mm

Zem sietiem novietots savākšanas trauks ar zināmu masu, lai uzkrātu < 3,15 mm frakciju. Sieti tika sakārtoti secībā no mazākā izmēra apakšā līdz lielākajam augšā. Paraugš tika izlikts uz augšējā sieta virsmas, virs sieta novietots un pieskrūvēts ierobežojošais vāks. Sijātājā tika izvēlēta programma, kas paredz parauga sijāšanu 15 minūtes pie 200 apgr./min, mainot griešanu pulksteņrādītājvirzienā uz pretpulsteņrādītājvirzienu ik pēc 5 minūtēm, tādējādi nodrošinot vienmērīgu sijāšanu. Pēc sijāšanas procedūras uz katra sieta un traukā savāktā frakcija tika nosvērta ar svariem *KERN 572-57*.

2.2.4. Kurināmā sadedzināšanas testi

Lai nodrošinātu vienotu un reproducējamu pieeju alternatīvās biomasas granulu izvērtēšanai, šajā pētījumā degšanas procesu raksturošanai tiek izmantoti divi eksperimentālie ietvari — ISA un CSA stendi, kuros tiek veikti kontrolēti kurināmā sadedzināšanas testi ar standartizētu mērījumu un datu apstrādes secību. Papildus gāzveida emisiju un iekārtas darbības parametru noteikšanai metodoloģijā iekļauta arī pelnu frakcijas analīze, kas sniedz kvantitatīvu pamatu gan ekspluatācijas risku, gan turpmākās apsaimniekošanas un potenciālās izmantošanas izvērtēšanai. Izstrādātā metodoloģija ir veidota kā pārnesama uz citām līdzīgām cietā kurināmā sadedzināšanas sistēmām, ja tiek nodrošināti salīdzināmi paraugu ievākšanas, sagatavošanas un mērījumu kvalitātes kontroles nosacījumi.

Individuālās siltumapgādes eksperimentālais stends

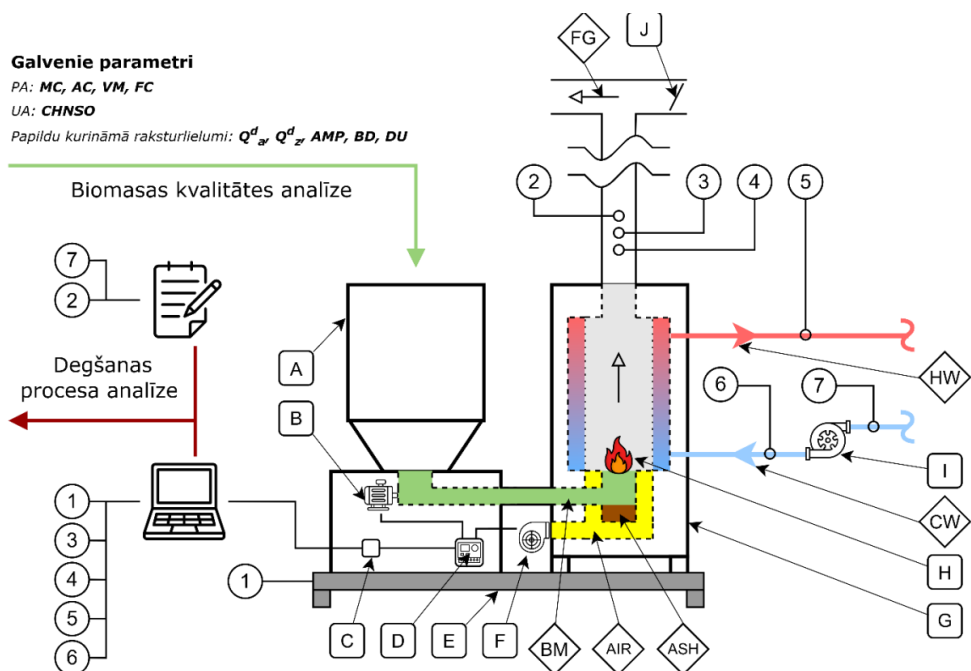
Biomasas granulu sadegšanas testi ISA gadījuma izpētes kontekstā tika veikti RTU VASSI Degšanas procesu izpētes laboratorijā. 2.34. attēlā parādīta eksperimentālās iekārtas shēma, kas ietver visu degšanas procesa nodrošināšanai un kontrolei nepieciešamo aprīkojumu un vadības/mērīšanas komponentes. Attēlā redzami numurētie punkti (1–7) (sk. 2.8. tabulu) un funkcionālie apzīmējumi (A–J, HW, CW, FG, BM, AIR, ASH) attēlo mērījumu vietas, sistēmas konstruktīvos elementus un galvenos materiālu un enerģijas plūsmu virzienus.

Galvenie parametri

PA: **MC, AC, VM, FC**

UA: **CHNSO**

Papildu kurināmā raksturlielumi: Q_{ar}^d , Q_{zr}^d , **AMP, BD, DU**



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

Sistēmas pamatelements ir dedzināšanas iekārta — granulu apkures katls *GRANDEG GD BIO 25 kW* (G), kurā notiek kurināmā sadegšana (sk. 2.35. att. (A)). Katls ir novietots uz *DINI ARGEO DFW06* svaru platformas (E), kas tiek izmantota nepārtrauktai masas izmaiņu uzraudzībai testa periodā — nolasīšana notika gan manuāli no displeja (sk. 2.35. att. (B)), gan automātiski ar “*WeiMonitor 4.16.19*” programmatūras palīdzību (sk. 2.35. att. (C)), savienojot svaru displeju ar datoru. Svari tika nokalibrēti un veic mērījumus saskaņā ar LVS EN 45501:2015³⁶⁶. Darba režīmā katls ir pusautomātisks: granulu deglis (H) tiek aizdedzināts manuāli, un tikai pēc stabilas liesmas izveides sistēmu var pārslēgt automātiskajā režīmā. Granulu padevi no bunkura (A) uz degkameru nodrošina gliemežtransportieris jeb šneks (BM), kura kustību nodrošina motors (B). Šneka darbība tiek vadīta ar automātikas bloku *SKA1200025* (D), kas nodrošina motora griezes momenta un apgriezienu regulāciju. Pareizai komunikācijai starp datoru un automātiku tiek izmantots *CT Comms USB-RS485* kabelis (C), savukārt programmēšanai un uzraudzībai izmanto “*SyPTLite*” programmatūru. Automātikas loģika balstās uz ciklisku taimeru darbību, kas nosaka granulu padeves impulsu ilgumu. Šajā darbā padeves cikla parametrs bija iestatīts kā pēc 44 000 μs pārtraukuma nodrošināt granulu padevi 4000 μs garumā. Papildus automātiskajai padevei ir pieejama manuāla šneka vadība, kas tiek izmantota testa sagatavošanas posmā un pēc sadegšanas procesa, lai attīrītu padeves sistēmu. Drošības signāli nodrošina padeves pārtraukšanu avārijas apstākļos (piem., motora pārslodze vai padeves iestrēgšana).



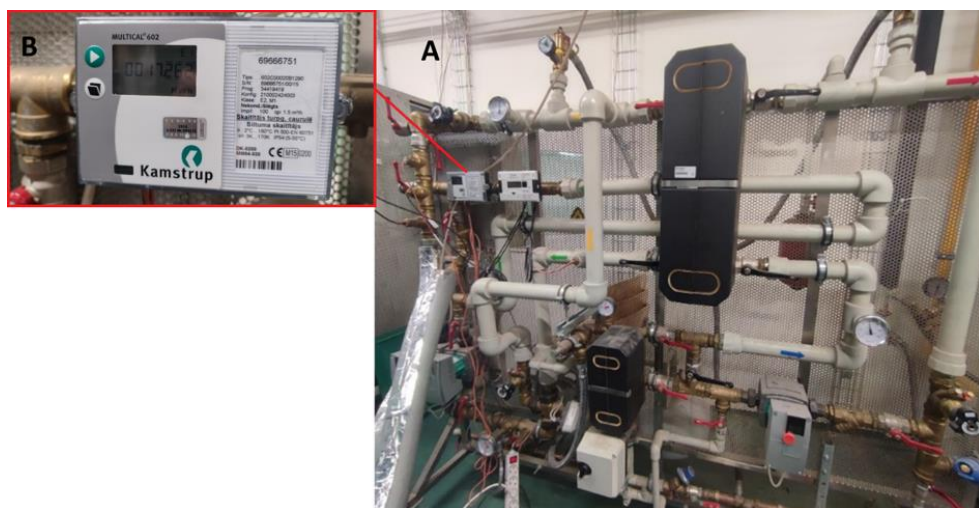
2.35. attēls. Izmantotā granulu katla vizuālais izskats (A), svaru displejs (B) un datu nolasīšanas programmas interfeiss no svaru displeja (C)

Lai nodrošinātu atbilstošus sadegšanas apstākļus, degkamerai tiek padots primārais gaiss (AIR), ko nodrošina ventilators (F). Ventilatora darbība tiek vadīta automātiski, izmantojot taimera signālus, kas periodiski ieslēdz gaisa padevi un nodrošina stabilu skābekļa pieplūdi. Šī darba ietvaros ventilatora taimeris tika iestatīts tā, lai ik pēc 5000 μs nodrošinātu gaisa plūsmu degkamerā. Dūmgāzu (FG) izvadei izmantots dūmvads, kas savienots ar ēkas skursteni (sk. 2.36. att.). Paralēli tam, dūmgāzu vilkme tiek uzturēta ar gaisa kanāla vilkmes sistēmu (J), kuru manuāli regulē, lai uzlabotu dūmgāzu izvadīšanu un stabilizētu sadegšanas procesu. Tā kā kurināmā padeve notiek caur degli uz degšanas zonu, pelni testa laikā uzkrājas kurtuvē ap degļa apakšējo zonu (ASH); pēc katra testa tie tika izvadīti no sistēmas un uzkrāti turpmākām analīzēm (sk. “Pelnu ķīmiskā sastāva un struktūras analīze” apakšnodaļu).



2.36. attēls. Dūmgāzu izvadīšana atmosfērā

Katla dzesēšanu nodrošina ūdens cirkulācijas sūknis (I), kas ir daļa no atsevišķas siltumenerģijas patēriņu simulējošās sistēmas (sk. 2.37. att. (A)), kas, savukārt, nodrošina siltuma noņemšanu un neļauj katla konstrukcijām pārkarst. No katla ūdens apvalka augšdaļas tiek izvadīts siltais ūdens (HW), kas atspoguļo turpgaitu, savukārt atdzesētais ūdens (CW), kas atspoguļo atgaitu, ieplūst katla ūdens apvalka apakšējā daļā. Ūdens sūkņa un gaisa padeves atslēgšanās tiek uzraudzīta ar drošības signāliem, jo to darbības traucējumi var radīt avārijas situācijas.



2.37. attēls. Ar granulu katlu savienots siltumenerģijas patēriņa simulācijas stends (A) un siltuma/ūdens plūsmas skaitītājs (B)

Ņemot vērā, ka viens no galvenajiem rezultējošiem rādītājiem, kas atspoguļo katla veiktspēju kāda konkrēta kurināmā sadedzināšanas gadījumā, ir katla efektivitāte, svarīgi bija izvēlēties atbilstošu metodi tās noteikšanai. Balstoties uz pieejamo aprīkojumu un iespējām tika pieņemts lēmums veikt ISA katla efektivitātes (E_{ISA}) aprēķinu pēc tiešās metodes, kas aprakstīta standarta LVS EN 303-5:2021³⁶⁷ 5.9.3.2. apakšnodaļā. E_{ISA} tiek izteikta % un rēķināta pēc vienādojuma:

$$E_{ISA} = \frac{Q_{OUT}}{Q_{IN}} \cdot 100, \quad (2.10)$$

kur

Q_{OUT} — katla lietderīgā enerģija (ūdens uzsildīšanai), kWh;

Q_{IN} — ar kurināmo ievadītā enerģija, kWh.

Q_{IN} tiek rēķināta zinot kurināmā patēriņu testa periodā (B) (par testa periodu (Δt) uzskatīts stabils sadedzināšanas režīms) un Q_Z^d (mērvienībā MJ/kg; nepieciešams izdalīt ar 3,6 konvertācijai no MJ un kWh) pēc vienādojuma:

$$Q_{IN} = \frac{B \cdot Q_z^d}{3,6}, \quad (2.11)$$

Q_{OUT} tiek rēķināta pēc vienādojuma:

$$Q_{OUT} = \frac{WVF \cdot \Delta t \cdot \rho_w \cdot c_p \cdot (\bar{T}_{out} - \bar{T}_{in})}{3,6}, \quad (2.12)$$

kur

WVF — ūdens tilpuma plūsma, m³/h;

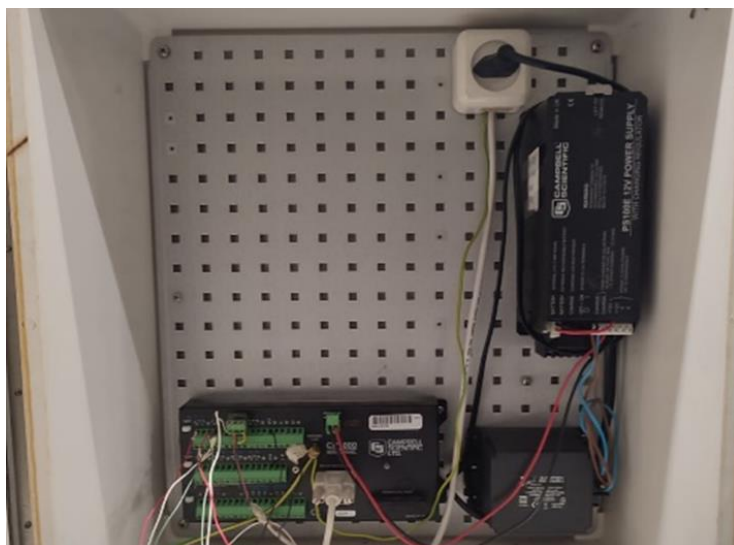
ρ_w — ūdens blīvums, kg/m³;

c_p — ūdens īpatnējā siltumietilpība, MJ/(kg·°C);

$\bar{T}_{out}$ — vidējā turpgaitas ūdens temperatūra, °C;

$\bar{T}_{in}$ — vidējā atgaitas ūdens temperatūra, °C.

WVF tiek mērīts ar siltumskaitītāja *Kamstrup MULTICAL 602* ūdens caurplūdes mērītāju (sk. 2.37. att. (B)). ρ_w ir temperatūras atkarīga fizikāla konstante, tomēr praktiskos katlu testos to parasti pieņem ~ 1000 kg/m³ vai aprēķina korekciju atbilstoši vidējai ūdens temperatūrai, ja nepieciešama augstāka rezultātu ticamība. c_p raksturo enerģijas daudzumu, kas nepieciešams, lai vienu ūdens masas vienību sasildītu par vienu kelvinu. Praktiskos termiskajos procesos c_p tiek uzskatīta par konstanti 0,004184 MJ/(kg·°C), jo tās izmaiņas tipiskajā apkures sistēmu temperatūru diapazonā ir nelielas. Darba autors ρ_w un c_p ir pieņēmis 1000 kg/m³ un 0,004184 MJ/(kg·°C), attiecīgi, pielietojot augstāk minētus aprēķinus. $\bar{T}_{out}$ un $\bar{T}_{in}$ tika noteiktas mērot HW un CW temperatūras ar multifunkcionālam datu uztvērējam *Campbell Scientific TC 108* pievienotiem termopāriem (sk. 2.38. att.).



2.38. attēls. Termopāru un plūsmas mērītāju pieslēgumu punkti pie datu uztvērēja granulu katla jaudas kontrolei

Vilkmes kontrolei izmantots spiediena devējs *DPT FLOW 2000*, kas automātiski aprēķina retinājumu jeb negatīvo relatīvo spiedienu (P) (sk. 2.39. att.) — spiediena samazinājums zem apkārtējā (atmosfēras) spiediena. P tika uzturēts ~ -10 Pa, kas definējams kā mazas jaudas katlu sistēmām raksturīga vērtība ³⁶⁸.



2.39. attēls. Spiediena devējs retinājuma kontrolei

Emisiju mērījumi dūmgāzēs veikti ar divām mēriekārtām — dūmgāzu analizatoru *Testo 350* (sk. 2.40. att. (A)) un cieta daļiņu (PM) analizatoru *Testo 380* (sk. 2.40. att. (B)). *Testo 350* veic dūmgāzu temperatūras (FT), skābekļa satura (O_2), oglekļa monoksīds jeb tvana gāzes (CO) un slāpekļa oksīdu (NO_x) koncentrāciju noteikšanu. *Testo 350 FT* un O_2 noteikšanu veic pēc EN 14789:2017 ³⁶⁹, CO — pēc EN 15058:2017 ³⁷⁰, NO_x — pēc ISO 10849:2022 ³⁷¹. Savukārt, *Testo 380* darbojas ar uzsildītu paraugu ņemšanas zondi, rotācijas tipa atšķaidītāju un oscilējošā sensora principu, kur frekvences nobīde ir proporcionāla uz sensora nogulsnētās daļiņu masas izmaiņām (mērījumu precizitāte pierāda iekārtas ražotāja sertifikāts, ka iekārta atbilst VDI 4206-2:2015 prasībām ^{372,373}). Tas ļauj novērot PM izmaiņas testa laikā un sniedz pietiekami ticamus rezultātus ³⁷⁴, bet nav starptautiski atzīta metode; par salīdzināmiem skaitās PM mērījumi, kuri veikti atbilstoši gravimetriskai metodei, kas balstās uz isokinētisku dūmgāzes paraugu ņemšanu un filtra svēršanu (metode aprakstīta EN 13284-1:2017 ³⁷⁵). Gravimetriskā metode, neskatoties uz precizitāti, ir laikietilpīga un, lielākoties, piemērota katlu testēšanai pie rekomendējamā kurināmā (piem., augstas kvalitātes granulas) ³⁷⁶. Darba autors izvēlējās izmantot *Testo 380* balstoties uz darba ietvaros pētāmo alternatīvo kurināmo klāstu, paredzēto testu apjomu un nepieciešamību vērot katla režīma ietekmi uz pētāmo emisiju apjomiem testa periodā. *Testo 350* testa periodā tiek pieslēgts pie datora un attiecīgo parametru vērtībām tiek sekots līdzī programā “*Testo easyEmission*”. *Testo 380* testa periodā netiek pieslēgts pie datora — dati testa beigās tiek eksportēti datorā ar programmu “*Testo easyHeat*”.



2.40. attēls. Testos izmantotais dūmgāzu analizators (A) un cieto daļiņu mērītājs (B)

Atsevišķi tika rēķināts gaisa patēriņa koeficients (α) lai pārlicinātos, ka sadedzināšana tiek organizēta līdzvērtīgos apstākļos katram testam.

Iegūto CO un NO_x vērtību savstarpējai salīdzināšanai nepieciešams veikt pārrēķinu uz normālapstākļiem, proti, katra testa FT un O_2 mēdz atšķirties, kas tiešā veidā ietekmē dūmgāzu fizikālos parametrus. Pārrēķins uz normālapstākļiem ir starptautiski atzīta procedūra datu apstrādei sadedzināšanas iekārtu testēšanas ietvaros ^{377–379}. Pārrēķinu veic pēc vienādojuma:

$$C = C_m \cdot \frac{21 - O_{2r}}{21 - O_{2m}} \cdot \frac{M_X}{22,4} \cdot \frac{t_m + 273,15}{t_r + 273,15}, \quad (2.13)$$

kur

C — uz normālapstākļiem pārrēķinātā koncentrācija, mg/Nm^3 ;

C_m — nomērītā koncentrācija, ppm;

O_{2r} — skābekļa koncentrācijas dūmgāzēs atsauces vērtība (10 %), %;

O_{2m} — skābekļa koncentrācijas dūmgāzēs nomērītā vērtība, %;

M_X — vielas molekulārais svars, g/mol;

t_m — nomērītā dūmgāzu temperatūra, °C;

t_r — references temperatūra (0 °C), °C.

PM gadījumā papildu pārrēķins nav nepieciešams, jo pārrēķinu veic pati mēriekārta Testo 380 pēc operatora ievadītiem parametriem. Mērāmo un aprēķināto parametru kopsavilkums ir pieejams 2.8. tabulā.

Tabula 2.8.

ISA sadedzināšanas testu ietvaros pētāmo parametru kopsavilkums (skaidrojumus sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

Nr. 2.34. attēlā	Aktivitāte/parametra noteikšana	Metodoloģiskā bāze	Aprīkojums
4	FT	EN 14789:2017	Dūmgāzu analizatora <i>Testo 350</i> termopāris (K-tipa)
4	O_2		
4	CO	EN 15058:2017 Pārreķins uz normālapstākļiem	Dūmgāzu analizators <i>Testo 350</i>
4	NO_x	ISO 10849:2022 Pārreķins uz normālapstākļiem	
3	PM	VDI 4206-2:2015	Cieto daļiņu analizators <i>Testo 380</i>
1	B	LVS EN 45501:2015	Svari <i>DINI ARGE0 DFW06</i> Hronometrs
2	P		Spiediena devējs <i>DPT FLOW 2000</i>
6	$\bar{T}_{in}$		Datu uztvērējs <i>Campbell Scientific TC 108</i>
5	$\bar{T}_{out}$		Termopāri (K-tipa)
7	WVF	LVS EN 303-5:2021	Siltumskaitītājs <i>Kamstrup MULTICAL 602</i>
-	α		-
-	Q_{IN}		-
-	Q_{OUT}		-
-	E_{ISA}		-
-			-

Centralizētās siltumapgādes eksperimentālais stends

CSA izpētes gadījuma izmantotā pieeja līdzīga ISA gadījumam — testēti noteikti biomasas paraugi cietā kurināmā sadegšanas katlā ar mērķi noskaidrot degšanas laikā radītas emisijas un ietekmi uz katla efektivitāti. Gāzveida emisiju mērīšanai tika izmantots *Testo 350*. PM mērīšanai tika izmantots *Testo 380*. CSA eksperimentālā stenda (sk. 2.41. att.) pamatā ir *KAPAK2000N* katls (ražotājs AS PROFE) ar nominālo siltuma jaudu 2 MW. Saskaņā ar MK noteikumiem Nr. 17 tas atbilst vidējās jaudas sadedzināšanas iekārtām, kurās izmantots cietais kurināmais un uz tām līdz 2030. gadam attiecas prasības, kas minētas noteikumu 5. pielikumā — CO pieļaujamā robeža ir 2000 mg/Nm³, NO_x pieļaujamā robeža ir 600 mg/Nm³ un PM pieļaujamā robeža ir 1000 mg/Nm³. Šajā kontekstā svarīgi minēt, ka saistībā ar noteikumu 4. pielikuma III. nodaļu, sākot ar 2030. gadu vidējās jaudas sadedzināšanas iekārtām, kurās izmantots cietais kurināmais prasības mainīsies — CO pieļaujamā robeža būs 1000 mg/Nm³, NO_x pieļaujamā robeža būs 650 mg/Nm³ un PM pieļaujamā robeža būs 50 mg/Nm³. Ņemot vērā CSA katlu specifiku un mērījumu klāstu CSA katla efektivitāte (E_{CSA}) tika rēķināta pēc netiešās metodes, kas aprakstīta standarta LVS EN 303-5:2021 ³⁶⁷ 5.9.3.3. apakšnodaļā. E_{CSA} tiek rēķināta pēc vienādojuma:

$$E_{CSA} = 100 - q_A - q_U - q_S - q_B, \quad (2.14)$$

kur

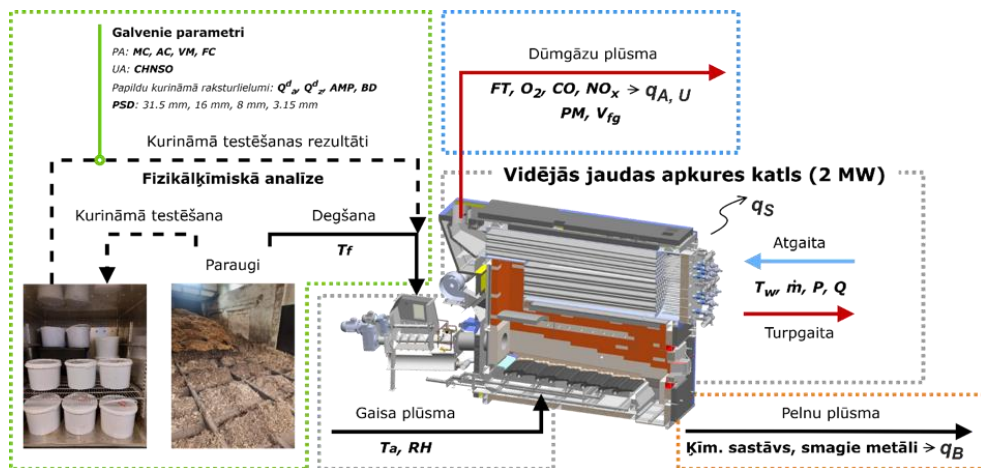
q_A — siltuma zudumi ar sadegšanas produktu sajūtamo siltumu, %;

q_U — zudumi nepilnīgas oksidācijas dēļ, %;

q_S — zudumi starojuma, konvekcijas un vadīšanas procesā, %;

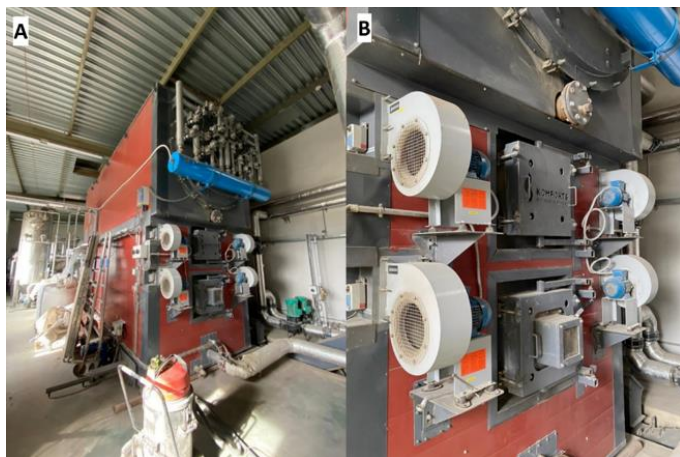
q_B — zudumi nesadegušās kurināmās vielas atlikumā pelnos, %.

Minētie zudumi tika aprēķināti attiecībā pret ievadīto siltuma daudzumu, veicot biomasas paraugu kvalitātes analīzi (sk. 2.2.3. apakšnodaļu).



2.41. attēls. CSA eksperimentālās sistēmas shēma

Būtiskākās atšķirības starp ISA un CSA stendiem ir saistītas ne tikai ar katla nominālo siltuma jaudu, bet arī ar sadedzināšanas iekārtas konstrukciju, kurināmā padeves organizāciju un pelnu izvadīšanas risinājumu. Katls (sk. 2.42. att. (A)) paredzēts darbam mainīgā slodzē; minimālā slodze ir 0,5 MW. Ārdu laukums ir 4,8 m². Kustīgo ārdurkrāns ir izvietots ar nelielu slīpumu; iekārtā integrēts konvekcijas zonas siltummainis un multiciklons. Siltumnesējs ir ūdens (maksimālais spiediens 6 bar, maksimālā temperatūra 110 °C), ūdens apvalka tilpums 9,5 m³. Katls aprīkots ar automātisku kurināmā padevi. Kurināmajam, kas paredzēts siltumenerģijas ražošanai, pieļaujamais MC ir 10–55 %. Viena no galvenajām priekšrocībām ir automātiskā pelnu izvadīšana, kas būtiski atvieglo katla ekspluatāciju un samazina izmaksas. Katlam ir primārā un sekundārā gaisa padeve sadegšanas procesu optimizācijai (sk. 2.42. att. (B)). Katls ir aprīkots ar ekonomāizeru, kura viens no galvenajiem elementiem ir mitrais skruberis PM mazināšanai dūmgāzēs.



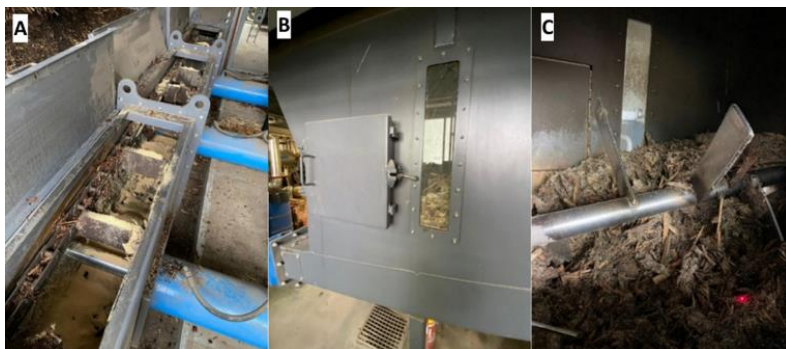
2.42. attēls. KAPAK2000N katls (2 MW): (A) vispārējs skats uz iekārtu un siltummaiņa kolektoriem; (B) degkammeras zona ar primārās un sekundārās gaisa padeves ventilatoriem

Katlam ir vadības panelis (monitoringa sistēma), no kura eksperimentālās izpētes laikā tika iegūti dati (sk. 2.43. att.) — āra temperatūra, katla jauda, krāsns temperatūra, kā arī informācija par gaisa un kurināmā padevi un sadegšanas zonas apstākļiem. Šī informācija tika izmantota režīma regulēšanai katra testa laikā līdzvērtīgu apstākļu nodrošināšanai.



2.43. attēls. Vadības paneļa ekrāns (Siemens SIMATIC HMI)

Kurināmā padeves sistēma sastāv no trīs etapiem. Sākumā biomasa tiek transportēta no uzglabāšanas bunkura uz padeves konveijeru (sk. 2.44. att. (A)). Tālāk kurināmais ar lentveida padeves mehānismu tiek nogādāts atsevišķajā nodaļā (piltuvē) (sk. 2.44. att. (B)), kurā uzstādīts maisītājs (sk. 2.44. att. (C)) nepārtrauktai ienākošā kurināmā homogenizācijai. Pēc kurināmā homogenizēšanas tas tiek automātiski izbērts uz ārdiem. Padeves mehānisma ieslēgšanu un izslēgšanu kontrolē sensori, kas reģistrē faktiskā kurināmā līmeni. Eksperimentālajā pētījumā kurināmā padeves sistēma tika pārslēgta manuālajā režīmā. Kurināmā padeve no uzglabāšanas bunkura uz konveijeri tika pilnībā apturēta. Homogēnie biomasas paraugi tika manuāli padoti uz piltuvi.



2.44. attēls. Kurināmā padeves sistēma: (A) lentveida padeves konveijers no bunkura; (B) piltuve ar apskates lūku un līmeņa kontroli; (C) gliemežtransportieris ar maisītāju kurināmā homogenizācijai

Biomases paraugi, kas paredzēti kā dažādu biomasu maisījumi, pirms testa tika sagatavoti attiecīgajās proporcijās, izmantojot *DFW XP* svarus (sk. 2.45. att.). Gadījumos, kad iepriekš sagatavotais maisījuma daudzums nebija pietiekams pilnam testa ciklam, papildu apjoms tika sagatavots testa laikā un padots uz piltuvi, lai saglabātu nepārtrauktu kurināmā padevi un nodrošinātu katla faktiskā siltuma pieprasījuma segšanu.

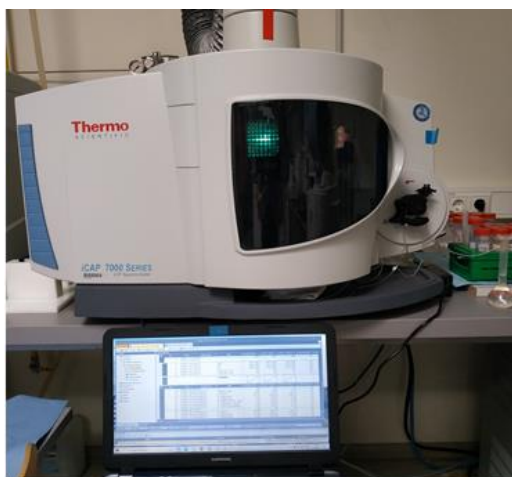


2.45. attēls. Maisījumu sagatavošana

Pelnu ķīmiskā sastāva un struktūras analīze

Papildus emisiju daudzuma dūmgāzēs analīzei, biomasas pelnu oksīdu sastāvs sniedz kvantitatīvu pamatu gala izmantošanas scenāriju sākotnējai izvērtēšanai. Trīskomponentu sastāva diagrammas (Vasileva diagrammas) ļauj novietot pelnus domēnos, kas norāda uz potenciālu pielietojumu cementa ražošanā, stikla-keramikas ražošanā, agronomisku atkārtotu izmantošanu, vienlaikus signalizējot par iespējamu sakušņu veidošanos sadegšanas laikā^{169,380,381}. Sistemātiska paraugu pelnu novietošana Vasileva diagrammā nodrošina pierādījumus balstītu un regulatīvi saderīgu izmantošanas stratēģiju izvēli un samazina nelabvēlīgas ietekmes risku, kas saistīts ar nepareizu atkritumu apsaimniekošanu. Savukārt datu iegūšana, uz kā pamata var veidot Vasileva diagrammu, tika veikta ar optiskās emisijas spektrometriju ar

induktīvi saistītu plazmu (angļu val. *Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry* (ICP-OES)). ICP-OES ir piemērota biomasas pelnu raksturošanai, jo nodrošina vienlaicīgu daudzelementu noteikšanu, plašu lineāro diapazonu un stabilu darbību matricās ar galveno un otršķirīgo elementu uztveršanu ³⁸². Elementu noteikšana tika veikta ar *Thermo Scientific iCAP 7400 ICP-OES*, darbinātu ražotāja ieteiktajos daudzelementu analīzes režīmos ar stabilu plazmas uzturēšanu (sk. 2.46. att.).



2.46. attēls. ICP-OES 7400 Thermo Fisher iekārta

Instrumenta konfigurācija un paraugu ievades parametri ir apkopoti 2.9. tabulā. Detektora uztveršanas laiki tika atšķirti ultravioletajam (UV) un redzamās gaismas (RG) diapazonam atsevišķi gan aksiālajam, gan radiālajam skatījumam, lai optimizētu jutību un izvairītos no piesātinājuma augstās koncentrācijās.

Tabula 2.9.

Metodes parametri un paraugu ievades iestatījumi

Parametrs	Iestatījums
Sūkņa caurulītes	Paraugs: <i>TFS® white/white</i> Drenāža: <i>TFS® yellow/blue</i>
Sūkņa ātrums	50 apgr./min
Injektora caurule	2 mm, keramika
Aerosola kamera	<i>PTFE cyclonic Nebulizer Burgener Mira Mist®</i>
Nebulizatora gāzes plūsma	0.65 L/min
Jauda	1150 W
Uztveršanas laiks	Aksiāls: UV 15 s, RG 10 s Radiāls: UV 15 s, RG 10 s

Izvēlētie viļņu garumi un plazmas skata konfigurācijas katram elementam ir sniegtas 2.10. tabulā, īpaši akcentējot aksiālo skatu otršķirīgiem elementiem un radiālo skatu galveno elementu kanālos.

Tabula 2.10.

Analītiskie viļņu garumi

Elements	Viļņa garums (nm)	Skats	Elements	Viļņa garums (nm)	Skats
Si	251.611 {134} / 212.412 {459}	Aksiāls	Mo	202.030 {467}	Aksiāls
Ba	455.403 {74}	Aksiāls	Na	589.592 {57}	Radiāls
Ca	393.366 {86}	Radiāls	Ni	231.604 {445}	Aksiāls
Cd	214.438 {457}	Aksiāls	P	178.284 {489}	Aksiāls
Co	230.786 {446}	Aksiāls	Pb	220.353 {453}	Aksiāls
Cr	267.716 {126}	Aksiāls	Rb	780.023 {43}	Aksiāls
Cu	324.754 {104}	Aksiāls	S	182.034 {485}	Aksiāls
Fe	259.940 {130}	Aksiāls	Sb	206.833 {463}	Aksiāls
K	766.490 {44}	Aksiāls	Al	167.079 {502}	Aksiāls
Li	670.784 {50}	Aksiāls/Radiāls	Sr	407.771 {83}	Aksiāls
Mg	279.553 {120}	Radiāls	Ti	323.452 {104}	Aksiāls
Mn	257.610 {131}	Aksiāls	V	292.402 {115}	Aksiāls
			Zn	213.856 {457}	Aksiāls

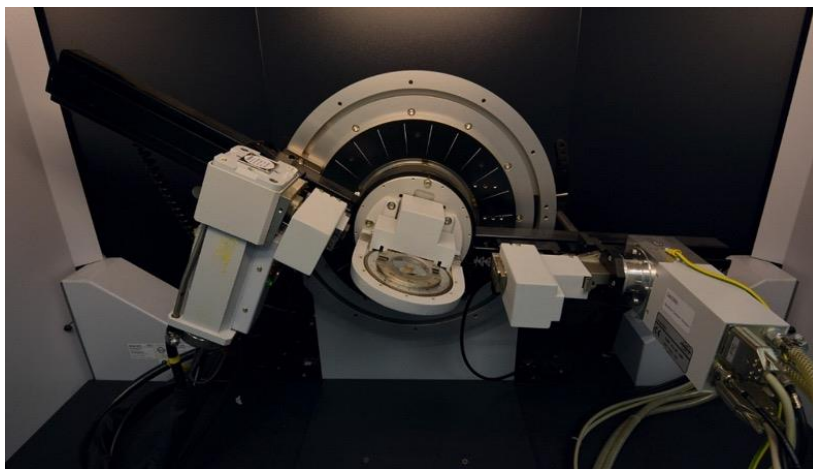
Visi skābju reaģenti un palīgvielas paraugu atšķaidīšanai un trieciena šķīdināšanai bija augstākās tīrības pakāpes, bet destilēto ūdeni sagatavoja ar *Barnstead MicroPure*, lai minimizētu fona piesārņojumu un nodrošinātu kalibrēšanu kā arī atšķaidīšanas atkārtotamību. Pelni tika sašķīdināti slēgtos traukos, izmantojot *MARS 6* mikroviļņu sašķīdinātāju ar *EasyPrep* traukiem no teflona (sk. 2.47. att.). Programma tika konfigurēta paaugstinātām temperatūrām silikātus saturošām matricām; izmantotas slāpekļskābes (HNO_3) un fluorūdeņraža (HF) maisījuma skābes ar ūdeņraža pārskābi (H_2O_2) kā oksidētāju. Pēc sašķīdināšanas tika veikta apstrāde ar borskābi (H_3BO_3), lai saistītu atlikušos fluorīdus pirms mērījuma, tādējādi novēršot kvarca komponentu bojājumus ICP-OES parauga ievades sistēmā. Slēgtie mikroviļņu trauki nodrošina ātrāku ķīmisko procesu noritēšanu salīdzinājumā ar atvērto sašķīdināšanu, uzlabojot ugunsizturīgu pelnu fāžu izšķīdināšanu un vienlaikus saglabājot drošību un procesa atkārtotamību.

2.47. attēls. *MARS 6* mikroviļņu sašķīdinātājs

Pēc atdzesēšanas līdz istabas temperatūrai paraugi tika kvantitatīvi pārnesti mērkolbās un atšķaidīti līdz 50,0 mL, nodrošinot viendabīgu analītisko šķīdumu iegūšanu. Ja noteiktu elementu koncentrācijas pārsniedza kalibrēšanas diapazonu, iegūtie šķīdumi tika papildus atšķaidīti attiecībā 1:10, lai nodrošinātu signāla līmeņa atbilstību darba diapazonam.

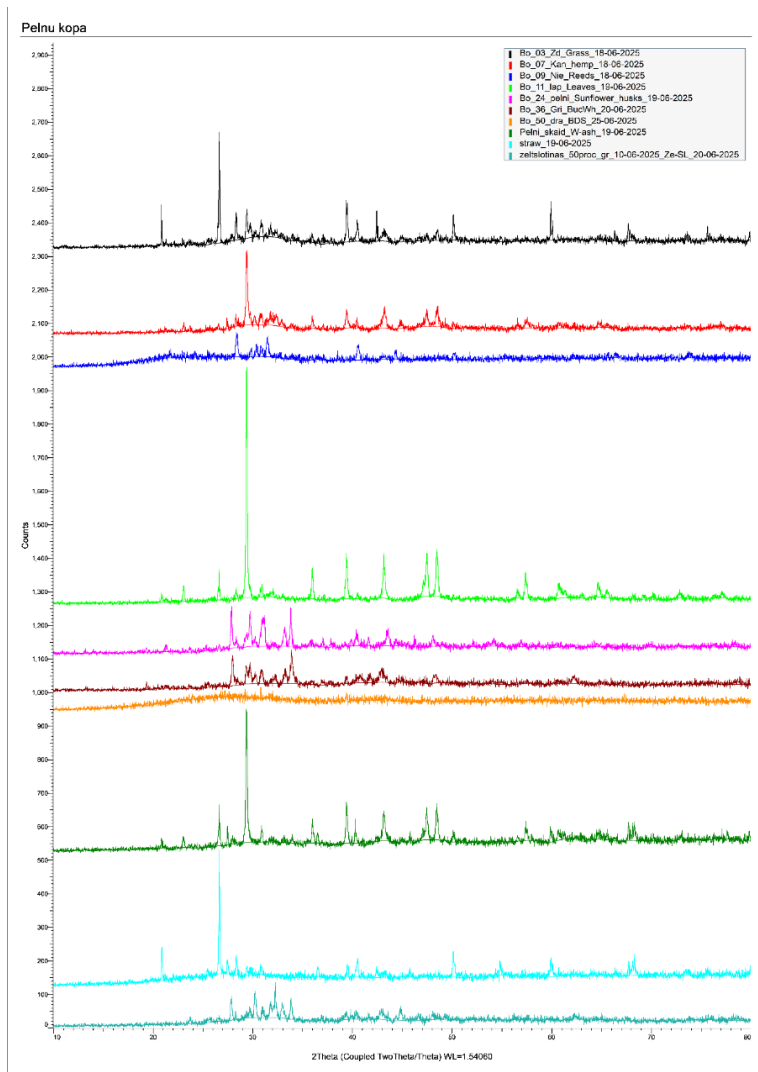
Ārējā kalibrēšana tika veikta, izmantojot “*Multielement Standard Solution V (p/n 54704)*” un “*Multielement Standard Solution VI (p/n 43834)*”, kas aptver biomasas pelnos sagaidāmos elementu koncentrāciju diapazonus. Sēra noteikšanai izmantots cisteīnskābes monohidrāts ($C_3H_9NO_6S$) kā atbilstošs references standarts. Katrā analītiskajā sērijā tika veikti aklie reaģentu paraugi, kalibrēšanas pārbaudes šķīdumi un paralēlie sašķīdināšanas paraugi, kas ļāva pārbaudīt metodes stabilitāti un atkārtojamību. Lai izvairītos no spektrālās pārklāšanās artefaktiem, tika izvēlēti piemērotākie analītiskie viļņu garumi un pielietotas fona korekcijas procedūras. Aksiālā vai radiālā plazmas skata ģeometrija tika piemēlēta atbilstoši sagaidāmajai elementu koncentrācijai un nepieciešamajai jutībai.

Rentģendifrakcijas (angļu val. *X-ray diffraction* (XRD)) analīze tika veikta ar Bruker D8 Advance difraktometru (sk. 2.48. att.), izmantojot Bragga–Brentano atstarošanas ģeometriju (standarta pulvera rentģendifrakcijas ģeometrija, kurā paraugs un detektors sinhroni pārvietojas atbilstoši θ – 2θ konfigurācijai, nodrošinot optimālu atstarošanās intensitāti no plaknēm paralēli parauga virsmai ³⁸³).



2.48. attēls. Pētījumā izmantotā difraktometra vizuālais izskats ³⁸⁴

Analīzē tika izmantota vara starotāja caurule ar niķeļa filtru. Pelni tika smalki samalti, ieberti parauga turētājā un viendabīgajā kārtā (parauga turētājs mērījumu laikā griežas, lai samazinātu preferenciālās orientācijas efektu). Difraktogrammas tika iegūtas 10–80° 2θ diapazonā ar nepārtrauktu skenēšanas ātrumu 0,01°/s. Fāžu identifikācija tika veikta, izmantojot minerālfāžu difraktogrammu datubāzi (angļu val. *Crystallography Open Database* (COD)) ³⁸⁵, bet pus-quantitatīvā fāžu analīze tika veikta ar Rietvelda precizēšanu, izmantojot BGMN algoritmu “*Profex v5.5.2*” programmatūras vidē ³⁸⁶. No iekārtas iegūtās neapstrādātās difraktogrammas ir redzamas 2.49. attēlā.



2.49. attēls. Analizējamo biomasas pelnu difraktogrammas pirms kristālisko fāžu noteikšanas

XRD un ICP-OES kopīga izmantošana līdz ar Rietvelda precizēšanu ir starptautiski atzīts risinājums sarežģītu cieto matricu (tai skaita biomasas pelnu) analīzei, jo tā ļauj vienlaikus definēt gan kristālisko, gan ķīmisko pelnu raksturu, un samazina kļūdu risku, kas saistīts ar tikai vienas metodes lietošanu. Pētniecībā šāda metodoloģiskā kombinācija ir būtiska, jo oksīdu molārās attiecības (no ICP-OES) un kristāliskās fāzes (no XRD) kopā nodrošina iespēju:

- precīzāk prognozēt pelnu kušanas uzvedību un sakušņu veidošanās risku;
- uzticami novērtēt termiski stabili un termiski degradējamu komponentu īpatnību;
- izvērtēt pelnu savietojamību ar būvniecības materiāliem un lauksaimniecības pielietojumiem.

2.2.5. Regresijas analīze

Regresijas analīzi plaši izmanto, lai demonstrētu sakarības starp mainīgajiem rādītājiem (atkarīgiem un neatkarīgiem), un tā ir izplatīta metode dabaszinātnēs un inženierzinātnēs ^{387–389}. Situācijās, kad datu izkliede ir augsta, regresijas rezultāti var tikt izmantoti mainīgo rādītāju vērtību prognozēšanai ārpus pētījuma robežām, kurā šādi rezultāti tika iegūti ³⁹⁰. Vienkāršākā pieeja prognozēšanai ir lineārā regresija, kuru rēķina pēc vienādojumā ³⁹¹:

$$y = b_0 \cdot x + b_1, \quad (2.15)$$

kur

y — atkarīgā mainīgā vērtība (prognozējamā vērtība gadījumā, ja b_0 , x un b_1 ir zināmi);

b_0 — x un y ass krustpunkts (y vērtība pie $x = 0$);

x — kovariāts vai neatkarīgais mainīgais;

b_1 — regresijas koeficients (taisnes slīpums), kas raksturo y izmaiņu par 1 vienību, palielinot x .

Neatkarīgo mainīgo skaits var būt lielāks par vienu, līdz ar ko lineārās regresijas (šajā gadījumā daudzfaktoru) vienādojums pieņem formu:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \dots + b_n \cdot x_n, \quad (2.16)$$

Vienkāršā lineārā regresija tiek izmantota situācijās, kad pastāv pamats pieņemt, ka atkarīgā mainīgā izmaiņas galvenokārt nosaka viens būtisks neatkarīgais mainīgais un citu faktoru ietekme nav statistiski nozīmīga. Savukārt daudzfaktoru lineārā regresija tiek piemērota situācijās, kad atkarīgā mainīgā vērtību vienlaicīgi nosaka vairāki neatkarīgie mainīgie. Tas parasti attiecas uz sarežģītiem procesiem (piem., degšanas process ³⁹²), ja vairāki faktori var ietekmēt rezultātu vai ja atsevišķu mainīgo ietekmi iespējams adekvāti novērtēt tikai kontrolējot pārējos. ^{393,394}

Lineāro regresiju parasti papildina ar determinācijas koeficientu (R^2), kas raksturo, kāda daļa no atkarīgā mainīgā dispersijas tiek izskaidrota ar neatkarīgo mainīgo. Determinācijas koeficients tiek aprēķināts pēc vienādojuma ³⁹⁵:

$$R^2 = \frac{(n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i)^2}{[n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2] [n \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2]}, \quad (2.17)$$

kur

R^2 — determinācijas koeficients ($0 \leq R^2 \leq 1$);

n — novērojumu skaits;

$x_i y_i$ — katra novērojuma iegūtie dati.

Augsta R^2 vērtība (tuvāka 1) norāda uz ciešu lineāru sakarību starp neatkarīgo un atkarīgo mainīgo — t.i., izmaiņas neatkarīgajā mainīgajā labi atspoguļojas atkarīgajā mainīgajā. Tas nozīmē, ka pielietotā lineārā regresija adekvāti raksturo novēroto datu tendenci. Savukārt zema

R^2 vērtība (tuvāka 0) norāda uz vāju sakarību. Daudzfaktoru regresijas pielietošana ļauj novērtēt gan katra faktora individuālo devumu, gan to savstarpējo ietekmi, kas vienkāršās regresijas gadījumā varētu pārspīlēt vai novājināt sakarības stiprumu.

Galvenie pieņēmumi promocijas darba ietvaros ir:

- starp atkarīgo mainīgo un neatkarīgajiem mainīgajiem pastāv lineāra sakarība;
- starp neatkarīgajiem mainīgajiem nav augsta korelācija vai korelācijas koeficienta vērtības iekļaujas noteiktajās robežās;
- y_i vērtības izvēlas neatkarīgi un nejauši.

Regresijas analīze promocijas darba ietvaros tika veikta izmantojot divus rīkus: “Microsoft Office Excel 365” un “Statgraphics Centurion 19”. “Microsoft Office Excel 365” tiek izmantots sākotnējiem aprēķiniem datu analīzes kontekstā un kopsavilkumam, jo tas nodrošina tiešu piekļuvi datiem, savukārt “Statgraphics Centurion 19” tika pielietots padziļinātai datu analīzei un regresijas modeļu definēšanai. “Statgraphics Centurion 19” vēsturiski pazīstams kā viena no pirmajām personālo datoru statistikas programmām ar integrēto grafisko vizualizāciju un papildu rīkiem, kas atvieglo datu apstrādi ³⁹⁶; tas nodrošina korelāciju un regresiju gan mainīgo pāriem, gan daudzu faktoru gadījumos, kā arī ietver eksperimentu plānošanas un analīzes moduļus, datu grafisko attēlošanu un salīdzināšanu. Pieejama arī bezmaksas izmēģinājuma versija, kas atvieglo atkārtotamību un pārbaudi. Daudzfaktoru regresijā “Statgraphics Centurion 19” ļauj veidot modeli atbilstoši izvēlētajai metodei un manuāli noteikt robežkritērijus, t.sk. ticamības līmeni un pieļaujamo kļūdas varbūtību, kā arī izvēlēties, ko iekļaut izvadē — aprakstošo kopsavilkumu, aprēķinātos parametrus, grafiskos attēlojumus ar ievadīto un aprēķināto datu salīdzinājumu, intervālu attēlojumu un ticamības intervālus, kā arī korelācijas matricu. Darbs ar “Statgraphics Centurion 19” ietver sekojošos posmus ³⁹⁷:

- Datu ievade programmā: “File → Open → Open Data Source”, izvēlēties “External Data File” (.XLSX vai .CSV formātā) un atzīmēt, ka 1. rindiņa satur kolonu nosaukumus;
- Regresijas analīzes iestatījumi: “Relate → Multiple Factors → Multiple Regression...”, sadaļā “Dependent Variable” pārnest atkarīgo mainīgo un sadaļā “Independent Variables” pārnest neatkarīgos mainīgos un uzspiest “OK”. Jaunajā logā “Multiple Regression Options” pie “Fitting Procedure” jāizvelas “Backward Stepwise Selection”, pie “Transformations” — “Power” ievadīt 1 (lineārā regresija bez pakāpes), “Addend” un “Autocorrelation” ievadīt 0. Atzīmēt “Constant in Model”. Mainīgo vērtību atlasī jāiestata definējot “P-Value” ar augstu robežu, līdz ar ko pie “P-to-Enter” un “P-to-Remove” jāievada 0,05, kas atbilst 95 % ticamības robežai. Uzspiest “OK”;
- Rezultātu izvades iestatīšana: jaunajā logā izvēlēties pēc nepieciešamības tabulas vai diagrammas ar rezultātiem — promocijas darba ietvaros tika atzīmēts “Analysis Summary”, “Correlation Matrix”, “Unusual Residuals” un “Observed versus Predicted”. Pēc izvēles jāspiež “OK” (sk. 2.50. att.).

R-squared = 86,8127 percent

95.0% confidence intervals for coefficient estimates

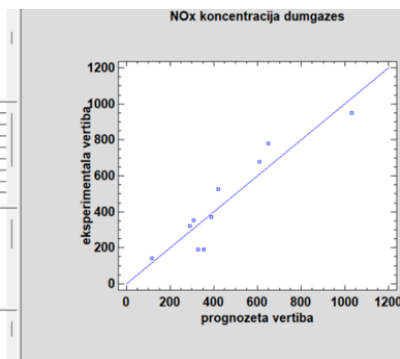
Parameter	Estimate	Standard Error	Lower Limit	Upper Limit
CONSTANT	5493.43	2450.66	-434.213	11385.1
alfa	662.662	553.866	-2096.45	761.08
lipumbilvums	-1.04619	0.897407	-3.35306	1.26067
N saturs	195.295	96.2014	90.7916	339.739
C saturs	-71.6365	32.944	-156.322	13.0488

Correlation matrix for coefficient estimates

	CONSTANT	alfa	lipumbilv	N saturs
CONSTANT	1.0000	-0.7859	-0.6605	-0.1758
alfa	-0.7859	1.0000	0.6992	0.6963
lipumbilvums	-0.6605	0.6992	1.0000	0.3389
N saturs	-0.1758	0.6963	0.3389	1.0000
C saturs	-0.8133	0.3041	0.2423	-0.2905

Unusual Residuals

Row	Y	Predicted	Residual	Studentized
BSG	948.0	1031.62	-83.6201	-3.37



2.50. attēls. Rezultātu piemērs no “Statgraphics Centurion 19”

Regresijas analīze promocijas darba ietvaros tika izmantota divējādi. Pirmkārt, tā kalpoja kā analītisks instruments, lai noteiktu, kuri kurināmā kvalitātes parametri ir statistiski nozīmīgi atkarīgo mainīgo izmaiņu skaidrošanai, t.i., lai identificētu atkarīgos parametrus ietekmējošos faktorus. Otrkārt, balstoties uz atlasītajiem nozīmīgākajiem neatkarīgajiem mainīgajiem, tika izveidoti empīriski prognozēšanas modeļi atkarīgo mainīgo aprēķinam. Vienkāršā lineārā regresija tika izmantota gadījumos, kad atkarīgā mainīgā izmaiņas pietiekami raksturo viens dominējošs faktors, savukārt daudzfaktoru regresija tika pielietota, lai vienlaikus novērtētu vairāku parametru ietekmi un iegūtu prognozēšanas vienādojumus ar regresijas koeficientiem saskaņā ar vienādojumu (2.16).

2.2.6. Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas analīze

Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas analīze (angļu val. *Multiple-Criteria Decision Analysis* (MCDA)) ir metožu un soļu kopums, kas paredzēts lēmumu pieņemšanai situācijās, kad izvēlei vienlaikus jāņem vērā vairāki savstarpēji konkurējoši kritēriji, kurus nav iespējams korekti reducēt uz vienu vienīgu rādītāju bez būtiskiem pieņēmumiem ³⁹⁸. MCDA ietvarā problēma tiek strukturēta (definē alternatīvas un kritērijus), kritēriju vērtības tiek pārnestas salīdzināmā mērogā (normalizētas), kritērijiem tiek piešķirts relatīvais nozīmīgums (svari), un rezultātā tiek iegūts alternatīvu prioritāšu sakārtojums, kuru iespējams izsekot līdz izmantotajiem datiem un pieņēmumiem. Vienlaikus pētījumi uzsver, ka normalizācijas un svaru noteikšanas izvēle var ietekmēt gala alternatīvu prioritāšu sakārtojumu, tādēļ metodikas izvēlei un pamatojumam ir izšķiroša nozīme secinājumu uzticamībai.

Alternatīvās biomasas granulu salīdzināšana ir raksturīgs MCDA pielietojuma gadījums, jo šiem kurināmajiem kvalitātes, emisiju, pieejamības un praktiskās izmantošanas rādītāji var būtiski atšķirties un atrasties plašos vērtību diapazonos. Viena alternatīva var uzrādīt labus enerģētiskos rādītājus, bet vienlaikus augstāku pelnu saturu vai emisiju risku; cita var būt plaši pieejama, bet ar zemāku mehānisko izturību vai sarežģītāku izmantošanu mazas jaudas katlos. Tādēļ šādu alternatīvu izvērtēšanu nav korekti balstīt tikai uz vienu rādītāju, jo lēmums ir atkarīgs no vairāku kritēriju kopējā līdzsvara ^{266,399,400}. Šajā kontekstā promocijas darbā kā pamatmetode izmantota svērto summu metode (angļu val. *Weighted Sum Model* (WSM)), kas

nodrošina vienkāršu, caurspīdīgu un viegli interpretējamu alternatīvu salīdzināšanu pēc kopējā svērtā snieguma. WSM pamatā ir normalizētu kritēriju vērtību svēršana un summēšana vienā integrālā rādītājā, tādēļ metode ir piemērota gadījumos, kad nepieciešams iegūt pārskatāmu kompromisa vērtējumu starp vairākiem atšķirīgu dimensiju kritērijiem ⁴⁰¹. Līdzīgas svērto summu pieejas literatūrā tiek raksturotas kā vienas no vienkāršākajām un plaši lietotām daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metodēm, jo tās ļauj apvienot kritēriju vērtības un svarus vienā alternatīvas snieguma rādītājā. Lai kritēriju svāri balstītos uz ar nozari saistīto ekspertu viedokli un nebūtu tikai autora pieņēmums, promocijas darba ietvaros tie noteikti analītiskās hierarhijas procesa ietvaros (angļu val. *Analytic Hierarchy Process* (AHP)), t. i., ekspertu spriedumos balstītā kritēriju nozīmīguma noteikšanas pieejā, kas MCDA metožu apvienošanas praksē bieži tiek izmantota tieši svaru iegūšanai pirms alternatīvu salīdzināšanas ⁴⁰². Tomēr WSM rezultāts ir atkarīgs no lineāras kompensācijas principa: augsts sniegums vienā kritērijā var daļēji kompensēt vājāku sniegumu citā kritērijā. Alternatīvo granulu gadījumā tas ir būtiski, jo ļoti labs enerģētiskais rādītājs ne vienmēr nozīmē praktiski labāko kurināmo, ja vienlaikus pastāv augsts pelnu, emisiju vai ieviešanas risks. Tādēļ WSM promocijas darbā izmantota kā pamatranžēšanas metode, bet rezultātu padziļinātai pārbaudei papildus izmantota daudzizmērķu optimizācija uz attiecību analīzes pamata, papildināta ar pilno multiplikatīvo formu (angļu val. *Multi-Objective Optimization by Ratio Analysis plus Full Multiplicative Form* (MULTIMOORA)). MULTIMOORA vienā ietvarā apvieno trīs atšķirīgus vērtēšanas mehānismus (attiecību sistēmu, atsauces punkta pieeju un pilno multiplikatīvo formu), tādēļ ļauj pārbaudīt alternatīvu sniegumu ne tikai pēc kopējā līdzsvara, bet arī pēc tuvuma vēlamajam risinājumam un pēc tā, cik lielā mērā vāji rādītāji ietekmē kopējo rezultātu ⁴⁰³.

Tādējādi abas metodes promocijas darbā nepilda identisku funkciju. WSM nodrošina vienkāršu un interpretējamu pamatvērtējumu, savukārt MULTIMOORA tiek izmantota kā padziļināta ranžējuma stabilitātes pārbaude. Ja abu metožu rezultāti ir līdzīgi, tas palielina secinājumu ticamību; ja rezultāti atšķiras, tas norāda uz alternatīvām, kuru vērtējums ir jutīgs pret kritēriju kompensācijas un agregēšanas loģiku.

Matricas veidošana un ekspertu aptauja

MCDA matrica promocijas darbā veidota, atlasot kritērijus, kas raksturo cietā biokurināmā izmantojamību siltumenerģijas ražošanā un tā praktiskās ieviešanas iespējas. Tehniskajā grupā iekļauti rādītāji, kas nosaka kurināmā enerģētisko vērtību, ekspluatācijas stabilitāti, pelnu radītos riskus, emisiju līmeni un sadedzināšanas iekārtas darbību. Tāpēc matricā iekļauts zemākais sadegšanas siltums, pelnu saturs, mehāniskā izturība, pelnu kušanas temperatūra, CO, NO_x un PM emisijas, kā arī katla efektivitāte. Šie parametri ir tieši saistīti ar granulu kvalitātes prasībām, sadedzināšanas procesa stabilitāti un lietotājam būtiskiem ekspluatācijas riskiem.

Kritēriju skaits tika ierobežots, lai nepieļautu vienas un tās pašas ietekmes dubultu iekļaušanu. Tāpēc matricā netika iekļauti visi laboratoriski noteiktie parametri, bet tikai tie, kas sniedz patstāvīgu informāciju par alternatīvas sniegumu. Piem., mitruma saturs netika iekļauts kā atsevišķs kritērijs, jo tā ietekme jau izpaužas zemākajā sadegšanas siltumā un granulu kvalitātē. Līdzīgi elementārā sastāva rādītāji daļēji atspoguļojas emisijās, pelnu saturā un

sadeģšanas īpašībās. Tādējādi izvēlētie tehniskie kritēriji raksturo galvenās granulu izmantošanas sekas, nevis atkārtο savstarpēji cieši saistītus sākotnējos parametrus.

Papildus tehniskajiem kritērijiem matricā iekļauti socio-ekonomiskie un socio-tehniskie kritēriji, jo laboratoriski piemērots kurināmais ne vienmēr ir praktiski ieviešams tirgū vai lietotāja līmenī. Enerģijas blīvums, izejvielu izmaksas un ražošanas izmaksas raksturo kurināmā ekonomisko un loģistisko pusi, savukārt resursa pieejamība, iegūšanas sarežģītība, sabiedrības pieņemamība un gatavība pielāgot degšanas procesu raksturo ieviešanas priekšnosacījumus. Šāda kritēriju struktūra ļauj salīdzināt alternatīvās granulas ne tikai pēc to tehniskās kvalitātes, bet arī pēc praktiskās izmantojamības.

Katram kritērijam tika noteikts preferenču virziens. Pozitīvs virziens (“+”) nozīmē, ka lielāka kritērija vērtība ir vēlamāka, piem., augstāks zemākais sadeģšanas siltums, lielāka mehāniskā izturība, augstāka pelnu kušanas temperatūra vai lielāka katla efektivitāte. Negatīvs virziens (“-”) nozīmē, ka vēlamāka ir mazāka kritērija vērtība, piem., zemāks pelnu saturs, zemākas CO, NO_x un PM emisijas, zemākas izejvielu vai ražošanas izmaksas, mazāka resursa iegūšanas sarežģītība vai mazāka nepieciešamība pielāgot degšanas procesu. Kritēriju kopums, apakšgrupas un preferenču virzieni apkopoti 2.11. tabulā. Promocijas darba ietvaros par alternatīvām MCDA matricā izmantotas ISA pētījuma daļā izgatavotās un testētās granulas.

Tabula 2.11.

Matricā iekļautie kritēriji

Kritēriju grupa	Kritēriju apakšgrupa	Kritērijs	Apzīmējums	Pozitīvs (+) / negatīvs (-)
Tehniskie	Biomisas kvalitāte	Zemākais sadeģšanas siltums (mitrai masai) (Q_z^d)	K1	+
		Pelnu saturs (AC)	K2	-
		Mehāniskā izturība (DU)	K3	+
		Pelnu kušanas temperatūra (AMP)	K4	+
	Sadeģšanas parametri	CO koncentrācija dūmgāzēs (CO)	K5	-
		NO _x koncentrācija dūmgāzēs (NO_x)	K6	-
		PM koncentrācija dūmgāzēs (PM)	K7	-
		Katla efektivitāte (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	-
	Socio-tehniskie	Resursa pieejamība (vai izejvielas ir viegli un stabili pieejamas)	K12	-
		Resursa iegūšanas sarežģītība (cik grūti iegūt un apstrādāt izejvielu)	K13	-

Kritēriju grupa	Kritēriju apakšgrupa	Kritērijs	Apzīmējums	Pozitīvs (+) / negatīvs (-)
		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	-

K10-K15 ir kvalitatīvi praktiskās ieviešanas kritēriji, kuru vērtības nav iespējams tieši noteikt ar laboratorisku mērījumu. Tāpēc to novērtēšanai tika izveidota trīs līmeņu skala, kas kvalitatīvu informāciju pārnēs MCDA aprēķiniem izmantojamā skaitliskā formā. Tā kā K10–K15 kritērijiem preferenču virziens ir negatīvs, vērtība 1 raksturo labvēlīgāko situāciju, bet vērtība 3 — lielāko ekonomisko, tehnisko vai sociālo ierobežojumu. Ekspertu un lietotāju vērtējumi tika iegūti *Google Forms* aptaujā (sk. pielikumu). Aptaujā piedalījās semināra-diskusijas “Granulu apkures ABC. Praktiskas atziņas un inovatīvie risinājumi” dalībnieki, kas bija saistīti ar granulu ražošanu, izmantošanu, pētniecību vai apkures tehnoloģiju praktisko pielietojumu. Respondenti novērtēja kritēriju nozīmīgumu skalā no 1 līdz 3 un piešķīra vērtības kvalitatīvajiem kritērijiem K10-K15 atbilstoši 2.12. tabulā definētajai skalai.

Tabula 2.12.

Aptaujā iekļauto kritēriju vērtēšanas skala (skaidrojums sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

Vērtība	Kritērijs					
	K10	K11	K12	K13	K14	K15
1	Resursa īpašnieks piemaksā par izejvielas utilizāciju	Izveidota ražošanas tehnoloģija / minimāla esošās līnijas modernizācija	Augsta pieejamība	Viegli	Gatavs lietošanai	Pielāgojumi nav nepieciešami
2	Izejviela tiek nodrošināta bez maksas	Esošās līnijas modernizācija, jaunu starpposmu ieviešana (piem., šķeldas un biomasas sajaukšana) Būtiska esošās līnijas modernizācija, intensīva biomasas pirmapstrāde (piem., sijāšana)	Vidēja pieejamība	Mēreni	Gatavs lietošanai, bet ar nosacījumiem	Gatavs investēt esošā katla pielāgošanā / jauna katla iegādē alternatīvajām granulām
3	Pircējs maksā par izejvielu		Zema pieejamība	Grūti	Nav gatavs lietošanai	Nav gatavs investēt

WSM-AHP metode

WSM aprēķinos pirmais posms ir novērojumu normalizācija — sākotnējo kritēriju vērtību pārveide bezdimensionālā skalā, lai dažādu alternatīvu rādītāji kļūtu savstarpēji salīdzināmi un tos varētu korekti apvienot vienā lēmumu matricā. Normalizācija ir

nepieciešama, jo kritēriji parasti ir izteikti atšķirīgās mērvienībās un diapazonos, un bez šī soļa pastāv risks, ka ranžēšanu nepamatoti ietekmē tikai skaitliskais mērogs, nevis kritērija faktiskā nozīme; turklāt ir zināms, ka normalizācijas metodes izvēle var mainīt iegūto alternatīvu secību. Literatūrā kā WSM standarta pieeja visbiežāk tiek minēta vektorālā normalizācija, jo tā ir plaši izmantota praksē un bieži dod konsekventus rezultātus, tomēr vienlaikus ir uzsvērts, ka lineārās normalizācijas procedūras, t. sk. maksimuma-minimuma normalizācija, ir pilnvērtīgas alternatīvas un noteiktos gadījumos var būt piemērotākas ⁴⁰⁴. Promocijas darbā tika izmantota tieši maksimuma-minimuma normalizācija, jo tā vienkārši un pārskatāmi pārnēs katra kritērija vērtības intervālā no 0 līdz 1 un ļauj tieši nodrošināt vienotu interpretāciju, ka lielāka normalizētā vērtība atbilst labākam alternatīvas sniegunam neatkarīgi no tā, vai konkrētais kritērijs ir maksimizējams vai minimizējams; tas ir īpaši būtiski situācijās, kad vienlaikus tiek salīdzināti vairāki kritēriji ar atšķirīgu mērogu un datu detalizāciju. Normalizācija veikta pēc vienādojuma:

$$\begin{aligned} \text{Maksimizācijas gadījums: } r_{ij} &= \frac{x_{ij} - \text{MIN}x_j}{\text{MAX}x_j - \text{MIN}x_j} \\ \text{Minimizācijas gadījums: } r_{ij} &= \frac{\text{MAX}x_j - x_{ij}}{\text{MAX}x_j - \text{MIN}x_j}, \end{aligned} \quad (2.18)$$

kur

r_{ij} — normalizētā vērtība novērojumam x_{ij} ;

x_{ij} — noteiktas alternatīvas (“i”) konkrēta kritērija (“j”) vērtība;

$\text{MAX}x_j$ — augstākā novērotā kritērija (“j”) vērtība;

$\text{MIN}x_j$ — zemākā novērotā kritērija (“j”) vērtība.

WSM otrajā posmā normalizētās kritēriju vērtības tiek svērtas ar kritēriju svāriem, lai turpmākajos aprēķinos katrs kritērijs ietekmētu rezultātu proporcionāli tā nozīmīgumam, nevis vienādi visiem kritērijiem. Šī svēršana veido svērto normalizēto lēmumu matricu un nodrošina, ka alternatīvu galīgais novērtējums atspoguļo ne tikai kritēriju faktiskās vērtības, bet arī ekspertu noteikto relatīvo nozīmīgumu ⁴⁰⁵. Promocijas darba ietvaros izmantota WSM-AHP hibrīdpieeja, kur kritēriju svāri tiek iegūti no ekspertu vērtējumiem, bet WSM tiek izmantots alternatīvu sakārtošanai. Ekspertu piešķirtie nozīmīguma vērtējumi tiek pārvērsti kritēriju svaros ar vienkāršu normalizēšanu pēc summas, t.i., katra kritērija vērtējums tiek dalīts ar visu kritēriju nozīmīguma vērtējumu summu, lai iegūtie svāri būtu savstarpēji salīdzināmi un to kopsumma būtu 1. Šāda pieeja nodrošina, ka WSM turpmākajos soļos katra kritērija ietekme tiek saglabāta proporcionāli ekspertu noteiktajai relatīvajai nozīmei un ka svaru izvēle ir caurspīdīga un reproducējama, kas ir būtiski, jo WSM rezultāti ir jutīgi pret svaru noteikšanu. Svārigi minēt, ka ja ekspertu nozīmīguma vērtējumi nav iegūti (piem., nav iespējams veikt aptauju), tad jāveic jutīguma analīze. Normalizētās vērtības svēršana pēc nozīmīguma veikta pēc vienādojuma:

$$v_{ij} = w_j \cdot r_{ij}, \quad (2.19)$$

kur

v_{ij} — svērtā normalizētā vērtība novērojumam x_{ij} (TOPSIS ietvaros);

w_j — kritērija (“j”) svars.

Trešais aprēķinu posms pēc svēršanas tiek īstenots kā svērto normalizēto kritēriju vērtību summēšana. Šāda pieeja atbilst klasiskajai WSM loģikai, kur alternatīvas tiek salīdzinātas pēc viena kopējā integrālā rādītāja, kas veidojas no atsevišķu kritēriju svērtā ieguldījuma ⁴⁰⁶. WSM pieejā tiek pieņemts, ka alternatīvas kopējais sniegums ir atkarīgs no visu kritēriju kopējā svērtā pienesuma, tādēļ metode nodrošina vienkāršu un interpretējamu alternatīvu salīdzināšanu, īpaši gadījumos, kad nepieciešams analizēt dažādu kritēriju kopējo līdzsvaru. Summēšana veikta pēc vienādojuma:

$$S_i = \sum_{j=1}^n v_{ij}, \quad (2.20)$$

kur

S_i — alternatīvas (“i”) kopējais svērtais rezultāts (ilgtspējas koeficients).

Atsevišķu kritēriju svērto normalizēto kritēriju vērtības var summēt arī atsevišķu kritēriju grupu ietvaros — promocijas darbā tas tika veikts atbilstoši 2.15. tabulā norādītām kritēriju apakšgrupām.

MULTIMOORA-AHP metode

MULTIMOORA aprēķinu sākumposms (attiecību sistēma (angļu val. *Ratio System*)) ir novērojumu normalizācija, proti, sākotnējo kritēriju vērtību pārveide bezdimensionālā mērogā, lai dažādu alternatīvu rādītāji kļūtu savstarpēji salīdzināmi neatkarīgi no mērvienībām un skaitliskā diapazona. Šajā pieejā normalizācija tiek veikta katram kritērijam atsevišķi, izmantojot attiecīgā kritērija vērtību kopu visām alternatīvām kā atsauci; līdz ar to katras alternatīvas vērtība tiek izteikta relatīvi pret šī kritērija vērtību kopējo Eiklīda normu, saglabājot relatīvās atšķirības starp alternatīvām un vienlaikus mazinot risku, ka turpmākajos aprēķinos rezultātu nepamatoti dominē kritēriji ar lielāku skaitlisko mērogu ⁴⁰⁷. Līdzīgi kā TOPSIS-AHP gadījumā, kritēriju nozīmīgums tiek noteikts izmantojot ekspertu piešķirtus svarus, līdz ar ko metodika praktiskajā realizācijā tiek interpretēta kā MULTIMOORA-AHP. Vērtības normalizācija un svēršana pēc nozīmīguma veikta pēc vienādojuma:

$$v_{ij}^* = \left(\frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{l=1}^n x_{lj}^2}} \right) \cdot w_j, \quad (2.21)$$

kur

v_{ij}^* — svērtā normalizētā vērtība novērojumam x_{ij} (attiecību sistēmas ietvaros).

Pēc svērto normalizēto kritēriju vērtību iegūšanas attiecību sistēma tās apkopo vienā indeksā katrai alternatīvai, saskaitot visu pozitīvā virziena kritēriju vērtības un atņemot visu negatīvā virziena kritēriju vērtības pēc vienādojuma:

$$Y_i = \sum_{j=1}^b v_{ij}^* - \sum_{j=b+1}^c v_{ij}^*, \quad (2.22)$$

kur

Y_i — attiecību sistēmas indikators noteiktai alternatīvai (“i”);

$\sum_{j=1}^b v_{ij}^*$ — svērto normalizēto pozitīvā virziena kritēriju vērtību summa;

$\sum_{j=b+1}^c v_{ij}^*$ — svērto normalizēto negatīvā virziena kritēriju vērtību summa.

Atsauces punkta pieeja (angļu val. *Reference Point Approach*) MULTIMOORA ietvarā tiek izmantota kā paralēls vērtēšanas mehānisms, kas balstās uz labāko sasniedzamo vērtību kopas noteikšanu katram kritērijam un alternatīvu noviržu aprēķinu attiecībā pret šo atsauci ⁴⁰⁷. Praktiskajā realizācijā atsauces punkta pieeja sākas ar to, ka no svērtajām normalizētajām vērtībām katram kritērijam tiek noteikta atsauces vērtība atbilstoši kritērija preferenču virzienam (“+” — lielākā novērotā vērtība, “-” — mazākā novērotā vērtība); pēc tam katrai alternatīvai tiek aprēķināta novirze no šīs atsauces vērtības attiecīgajā kritērijā. Atsauces punkta pieejas aprēķins veikts pēc vienādojuma:

$$\begin{aligned} \text{Pozitīvs virziens: } R_i &= MAX v_j^* - v_{ij}^* \\ \text{Negatīvs virziens: } R_i &= v_{ij}^* - MIN v_j^*, \end{aligned} \quad (2.23)$$

kur

R_i — novirze no atsauces punkta noteiktai alternatīvai (“i”);

v_j^* — atsauces vērtība konkrētajam kritērijam.

Pilnā multiplikatīvā forma (angļu val. *Full Multiplicative Form*) MULTIMOORA ietvarā nodrošina vērtēšanas komponenti, kas balstās uz reizinājuma principu, tādējādi piedāvājot neatkarīgu “kontroles” skatījumu uz alternatīvu salīdzinājumu ⁴⁰⁷. Pilnās multiplikatīvās formas pamatideja ir salīdzināt alternatīvas, veidojot attiecību starp kritērijiem ar pozitīvu preferenču virzienu un kritērijiem ar negatīvu preferenču virzienu: pozitīvā virziena kritēriju ieguldījumi tiek apvienoti reizinājumā skaitītājā, bet negatīvā virziena kritēriju ieguldījumi — reizinājumā saucējā, tādējādi vienā rādītājā vienlaikus iekļaujot abu virzienu ietekmi. Vienlaikus klasiskajā MULTIMOORA interpretācijā pilnās multiplikatīvās formas rezultāts bieži tiek atstāts bez svēršanas kā metodikas iekšējās pārbaudes komponente, lai saglabātu neatkarīgu salīdzinājuma principu un mazinātu risku dubulti pastiprināt ekspertu svaru ietekmi, kas jau ir iestrādāta citās aprēķinu daļās. Pilnās multiplikatīvās formas rādītājs tika aprēķināts pēc vienādojuma:

$$U_i = \frac{\prod_{j=1}^+ x_{ij}^*}{\prod_{j=g+1}^- x_{ij}^*}, \quad (2.24)$$

kur

U_i — alternatīvas (“i”) pilnās multiplikatīvās formas rādītājs;

$\prod_{j=1}^+ x_{ij}^*$ — visu kritēriju novērojumu ar pozitīvu preferenču virzienu reizinājumu;

$\prod_{j=g+1}^- x_{ij}^*$ — visu kritēriju novērojumu ar negatīvu preferenču virzienu reizinājums.

Katrai alternatīvai katrā no augstāk aprakstītām MULTIMOORA metodēm tiek piešķirts rangs atkarībā no iegūto rezultātu vērtības. Lai iegūtu vienotu konsolidētu vērtējumu, iegūtus rangus nepieciešams apvienot. Promocijas darba ietvaros apvienošana tiek veikta ar Borda noteikuma (angļu val. *Borda rule*) principu, kur katra alternatīva saņem punktus atkarībā no tās vietas katrā no trim apakšmetožu rezultātiem, bet punktu summa veido kopsavilkuma punktu skaitu ^{408,409}. Praktiski tas nozīmē, ka katrā no trim apakšmetožu rezultātiem 1. vietai tiek piešķirts lielākais punktu skaits, bet pēdējai vietai — mazākais; pēc tam punkti no visiem trim apakšmetožu rezultātiem tiek saskaitīti, iegūstot vienu kopsavilkuma punktu vērtību, pēc kuras alternatīvas var sakārtot kopējā izvēles rezultātā. Atsevišķos gadījumos vairākām alternatīvām var izveidoties vienāds kopsavilkuma punktu skaits. Šādā situācijā kopsavilkuma secības precizēšanai var izmantot determinētu papildkritēriju: labākā alternatīva tiek izvēlēta tai alternatīvai, kurai trīs secībās ir lielāks 1. un 2. vietu skaits, jo tas atspoguļo biežāku dominanci starp atsevišķajām metodēm. Savukārt sliktākās alternatīvas identificēšanai var izmantot pēdējo vietu skaita salīdzinājumu (promocijas darba ietvaros tika uzskaitītas 9. un 10. vietas). Konsolidēto punktu aprēķins veikts pēc vienādojuma:

$$B_i = 3 \cdot (n + 1) - \sum_{k=1}^3 p_{ik}, \quad (2.25)$$

kur

B_i — alternatīvas (“ i ”) kopsavilkuma punktu skaits pēc trīs ranžējumu apvienošanas;

n — alternatīvu skaits;

$\sum_{k=1}^3 p_{ik}$ — alternatīvas rangū summa no visām apakšmetodēm.

2.2.7. Aprites cikla analīze

Aprites cikla analīze jeb novērtējums (angļu val. *Life Cycle Assessment (LCA)*) ir sistematiska pieeja, ar kuru zinātniski izvērtē produkta ietekmi vairākās dimensijās, primāri vides un sociālajā ^{410,411}. Atbilstoši ISO 14040 un ISO 14044 LCA ietver mērķa un tvēruma definēšanu, aprites cikla inventarizāciju, ietekmes novērtējumu un rezultātu interpretāciju; mērķa un tvēruma posmā īpaši būtiski ir skaidri definēt funkcionālo vienību, sistēmas robežas, datu avotus, piešķiršanas pieeju un datu kvalitātes prasības. LCA ļauj identificēt ražošanas ķēdes “vājos punktus”, kur nepieciešami uzlabojumi ⁴¹², un ir plaši atzīta metode atšķirīgu ietekmes faktoru kvantificēšanai, nodrošinot pilnvērtīgu un uz pierādījumiem balstītu analīzi. LCA pieeja ir aprobēta gan koksnes, gan nekoksnes biomasas izpētē; tomēr lielākā daļa pētījumu fokusējas uz koksnes granulām, jo tās ir globāli pieejams biomasas veids ar attīstītu rūpniecisko bāzi. LCA nodrošina ietvaru kompromisu izvērtēšanai, kvantificējot vides ietekmi visā ražošanas ķēdē un ļaujot caurspīdīgi salīdzināt alternatīvas biomasas izmantošanas iespējas kā granulās ar turpmāku sadegšanu siltumenerģijas iegūšanai ⁴¹³.

Būtisks parametrs ir funkcionālā vienība (angļu val. *Functional unit (FU)*), kas kalpo par atsauci lielumu visiem LCA aprēķiniem. Enerģijas bāzes FU ir zinātniski pamatotāka un caurspīdīgāka granulu salīdzināšanai starp dažādām biomasām, jo tā tieši ietver atšķirības Q_Z^d , MC un E_{ISA} . Masas bāzes FU var radīt maldinošas interpretācijas, salīdzinot granulās ar atšķirīgu enerģijas blīvumu. FU definēšana kā piegādātā enerģija nodrošina funkcionāli

konsekventu un godīgu salīdzinājumu starp biomasas granulām ²⁷¹. Neatkarīgi no pētāmā materiāla, LCA kritiski svarīga ir skaidra sistēmas robežu definēšana. Literatūrā un LCA praksē sistēmas robežas tipiski iedala vairākos tvērumos ⁴¹⁴:

- “No šūpuļa līdz kapam” (angļu val. *Cradle-to-Grave*) — pilns produkta aprites cikls no izejvielu ieguves līdz produkta izmantošanai un aprites cikla beigām, ietverot atlikumu vai atkritumu apsaimniekošanu.
- “No šūpuļa līdz vārtiem” (angļu val. *Cradle-to-Gate*) — aprites cikla posms no izejvielu ieguves līdz produkta izlaidei “rūpnīcas vārtos”; neietver produkta izmantošanu un aprites cikla beigu stadiju.
- “No vārtiem līdz vārtiem” (angļu val. *Gate-to-Gate*) — atsevišķa procesa vai ražošanas posma novērtējums plašāka aprites cikla ietvarā.
- “No šūpuļa līdz šūpulim” (angļu val. *Cradle-to-Cradle*) — pieceja, kurā materiāli aprites cikla beigās tiek atgriezti jaunā ražošanas ciklā, maksimāli samazinot atkritumu veidošanos.

Šī promocijas darba LCA mērķis ir novērtēt un salīdzināt laboratorijas apstākļos ražotu granulu vides ietekmi, izmantojot 2.1. apakšnodaļā aprakstītos biomasas veidus. Pētījuma tvērums definēts kā “no šūpuļa līdz kapam”. Šajā promocijas darbā ar “šūpuli” tiek saprasts nepieciešamā materiāla savākšanas, iegūšanas vai pieejamā izejvielu plūsmā nonākšanas sākumpunkts, no kura attiecīgā biomasā tiek iekļauta granulu ražošanas sistēmā. Alternatīvās biomasas gadījumā “šūpulis” pētījuma ietvaros sākas ar konkrētās biomasas savākšanu vai tās pieejamību kā atlikuma, blakusprodukta, mazvērtīgi izmantotas vai apsaimniekošanas rezultātā iegūstamas plūsmas veidā. Šāda pieceja izvēlēta tādēļ, ka promocijas darbā iekļautā alternatīvā biomasā netiek uzskatīta par primāri audzētu kurināmā ražošanai. Līdz ar to vides ietekme, kas saistīta ar šīs biomasas sākotnējo veidošanos, tiek attiecināta uz iepriekšējo produkta sistēmu vai zemes apsaimniekošanas procesu, bet promocijas darba LCA modelī iekļauta tās savākšana, transportēšana, sagatavošana un tālāka izmantošana granulu ražošanas ķēdē. Savukārt koksnes references plūsmai “šūpulis” tika definēts plašāk, ietverot koksnes resursa iegūšanu un ar to saistīto augšanas fāzi. Šāda pieceja izvēlēta tādēļ, ka koksnes granulas promocijas darbā kalpo kā tirgū nostiprināts references kurināmais ar ilgstoši izveidotu piegādes ķēdi. Lai gan praksē koksnes granulas juridiski un tehnoloģiski var tikt ražotas arī no mežizstrādes vai mežrūpniecības atlikumiem, šajā promocijas darbā koksnes plūsma netiek interpretēta kā alternatīvas izmantošanas scenārijs, bet gan kā salīdzināšanas bāze alternatīvās biomasas granulām. Tādēļ koksnes un alternatīvās biomasas plūsmām piemērota atšķirīga sākotnējās sistēmas robežas interpretācija, vienlaikus saglabājot vienotu FU un salīdzināmu ražošanas, transportēšanas, sadedzināšanas un atlikumu apsaimniekošanas posmu struktūru. Ar “kapu” šajā promocijas darbā tiek saprasts granulu izmantošanas beigu posms — granulu sadedzināšana ISA katlā, ar sadedzināšanu saistīto emisiju iekļaušana modelī un radušos pelnu apsaimniekošana. Tādējādi sistēmas robežās ietverta izejvielu iegūšana vai savākšana, transportēšana uz granulu ražotni, biomasas pirmapstrāde, žāvēšana, smalcināšana vai malšana, granulēšana, gatavo granulu transportēšana līdz galalietotājam, sadedzināšana un pelnu apsaimniekošana.

Salīdzināšanai izvēlēta FU ir 1 MWh siltumenerģijas, kas iegūta granulu sadedzināšanas rezultātā. Sistēmas robežas granulu ražošanai un izmantošanai noteiktas, balstoties uz autora ekspertīzi un literatūras datiem par rūpnieciska mēroga granulu ražošanu un saistītajiem procesiem. Primārie dati galvenajiem aprites cikla posmiem (biomasas savākšana, apstrāde un granulu ražošana, sadedzināšana) iegūti laboratorijas eksperimentos un integrēti LCA modelī. Laboratorijas mērījumi proporcionāli mērogoti līdz rūpnieciska mēroga apstākļiem, izmantojot izvēlēto FU, un materiālu/enerģijas plūsmas normalizētas pret FU.

Šajā procesā ekspluatācijas patēriņi un emisijas tika lineāri pārrēķinātas, ievērojot katla darba režīmu un lietderības koeficientu, lai visiem variantiem nodrošinātu salīdzināmību. Inventarizācijas dati tika papildināti gadījumos, kad empīriskie mērījumi netika veikti pētījuma robežu dēļ (piem., netika veikti mērījumi attiecībā uz reālo izejvielu un saražoto granulu transportēšanas radītām emisijām). Šiem posmiem izmantota “Ecoinvent 3” datubāze ar “cut-off” pieeju, kas ir saderīga ar ISO 14040 un ISO 14044 prasībām un nodrošina metodoloģisku caurspīdīgumu un konsekveni⁴¹⁵. Nepieciešamās datu kopas atlasītas, balstoties uz reģionālo un tehnoloģisko atbilstību, kā arī specifiskiem modeļa pieņēmumiem. LCA modelī tika definēti arī vispārīgie pieņēmumi salīdzināmībai starp alternatīvām: vienota enerģijas bāzes FU, konsekventas sistēmas robežas no brīža, kad izejviela tiek iekļauta granulu ražošanas sistēmā, vienādi piešķiršanas (angļu val. *Allocation*) noteikumi blakusproduktiem, vienota datu kvalitātes stratēģija un konsekventa ietekmes kategoriju izvēle. Pamatojoties uz definētajām sistēmas robežām un iekļautajiem produktiem/plūsmām, saistītie procesi tika strukturēti un grupēti pēc resursu plūsmas (sk. 2.13. tabulu).

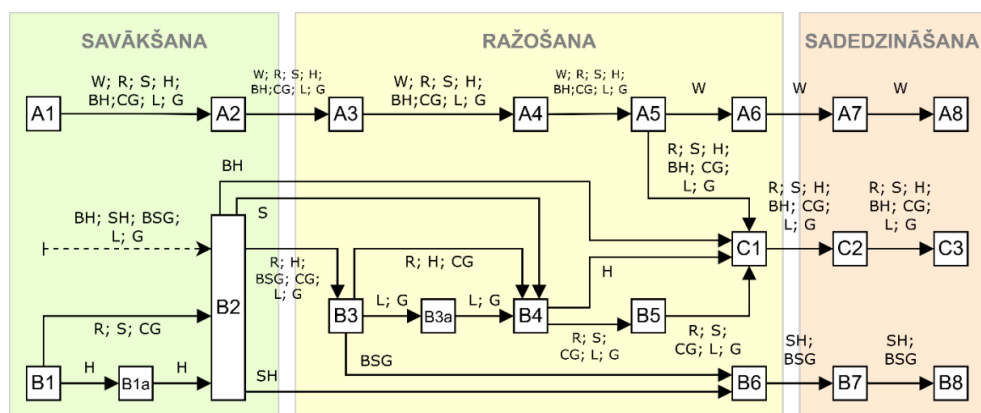
Tabula 2.13.

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)	Biomasas granulu ražošana (B6)	Koksnes un biomasas granulu ražošana (C1)
Sadedzināšanas posms	Koksnes granulu transportēšana uz izplatītāju un patērētāju (A7)	Biomasas granulu transportēšana uz izplatītāju un patērētāju (B7)	Koksnes un biomasas granulu transportēšana uz izplatītāju un patērētāju (C2)

Aprites cikla posms	Koksnes plūsma (A)	Alternatīvās biomasas plūsma (B)	Koksnes un alternatīvās biomasas maisījuma plūsma (C)
	Koksnes granulu sadegšana (A8)	Biomasas granulu sadegšana (B8)	Koksnes un biomasas granulu sadegšana (C3)

2.51. attēlā parādīti procesi un plūsmas shēma granulu ražošanai atkarībā no biomasas veida (biomasu nosaukumu saīsinājumi atbilst skaidrojumiem 2.1. apakšnodaļā). Piem., lai ražotu R granulas (procesi C1–C3), nepieciešams sagatavot koksni (procesi A1–A5) un attiecīgo biomasu (procesi B1–B5). Atsevišķu biomasu īpašības prasa papildu apstrādes posmus: H kātus ir jāsasmalcina, lai iegūtu piemērotu daļiņu frakciju (process B1a), savukārt L un G biomasu tiek sijāta, lai atdalītu piemaisījumus (process B3a); pļautas zāles vai koku lapu biomasā var būt klāt sadzīves vai iepakojuma atkritumi, kas jāsavāc pirms turpmākas apstrādes.



2.51. attēls. Pētīto biomasas granulu veidu ražošanas ķēžu procesu un sistēmas robežu plūsmas shēma (skaidrojumus sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

W granulas šī promocijas darba LCA ietvaros pilda esošā tirgū pieejamā risinājuma funkciju, attiecīgi, koksnes iegūšanas stadijā vērā tika ņemta arī audzēšana. Tas attiecas arī uz koksnes un alternatīvās biomasas maisījuma granulām — pieņemts, ka skaidas iegūtas kā primārais materiāls. Procesam A1 izmantota datu kopa no Kuka u.c. (2019) pētījuma ⁴¹⁶, kas attiecas uz 1 m³ priedes apaļkoksnes audzēšanas inventarizāciju Latvijas apstākļos, sākot no pirmās retināšanas (100 gadus pēc iestādīšanas). Agrīnās stadijas tika izslēgtas, jo to ietekme uz vidi ir minimāla, ņemot vērā tehnikas trūkumu. Retināšanas-ciršanas posms ietver mehanizētus procesus (traktori, transportlīdzekļi, zāģi u.c.), ķīmikāliju izmantošanu, oglekļa piesaisti un emisijas. Nepieciešamais koksnes apjoms attiecīgajai granulu ražošanai tika aprēķināts, izmantojot priedes apaļkoksnes (svaigi nocirstas jeb slapjas) vidējo blīvumu 510 kg/m³ pēc vienādojuma:

$$v_w = \frac{m_w}{\rho_w}, \quad (2.26)$$

kur

v_w — slapjās priedes apaļkoksnes tilpums, m³;

m_w — slapjās koksnes masa pirms ražošanas, kg;

ρ_w — slapjās priedes apaļkoksnes blīvums, kg/m³.

Saskaņā ar iepriekš definētajām sistēmas robežām R, S, H, BH, SH, BSG, CG, L un G granulu aprites cikla novērtējumā alternatīvās biomasas audzēšanas stadija netika iekļauta. Šo paraugu gadījumā “šūpulis” tika definēts kā nepieciešamā materiāla savākšana vai tā nonākšana pieejamā izejvielu plūsmā granulu ražošanai, jo attiecīgās biomasas netika interpretētas kā primāri audzētas kurināmā ražošanai. Līdz ar to ar resursa sākotnējo veidošanos saistītā ietekme tika attiecināta uz iepriekšējo produkta sistēmu vai zemes apsaimniekošanas procesu. Tomēr tām biomasas plūsmām, kuru izmantošanai nepieciešama mērķtiecīga savākšana, LCA modelī tika iekļauts B1 process — biomasas savākšana. B1 process raksturo nevis biomasas audzēšanas ietekmi, bet praktisko darbību kopumu, kas nepieciešams, lai jau esošu vai pieejamu biomasas plūsmu iegūtu un novirzītu granulu ražošanas ķēdei. Tādēļ B1 tika piemērots R, S, H un CG biomasām, kurām nepieciešamais savākšanas mērogs tika noteikts, balstoties uz vajadzīgo biomasas masu attiecībā pret izvēlēto FU un potenciālo sausnas ražīgumu. Savukārt BH, SH, BSG, L un G biomasām B1 process netika iekļauts, jo šo plūsmu gadījumā pieņemts, ka biomasu nonāk tieši ražotnē vai jau pastāv kā pieejams blakusprodukts/atlikums, un turpmākā ķēde sākas ar transportēšanu uz ražotni vai atbilstošu pirmapstrādes posmu. Potenciālais sausnas ražīgums R, S, H un CG biomasām tika noteikts, izmantojot literatūras avotus — R gadījumā 5,50 t/ha⁴¹⁷, S gadījumā 4,25 t/ha⁴¹⁸, H gadījumā 5,00 t/ha⁴¹⁹ un CG gadījumā 8,64 t/ha⁴²⁰. Izmantojot laboratorijā noteikto biomasas MC un nepieciešamo biomasas masu, lai sasniegtu FU, tika aprēķināta vajadzīgā biomasas ieguves platība. Aprēķins veikts, izmantojot vienādojumu:

$$S_b = m_b/1000 \cdot Y_1 = m_b/1000 \cdot [Y_0 + (w_b \cdot Y_0/b_b)], \quad (2.27)$$

kur

S_b — biomasas ieguves platība, ha;

m_b — biomasas masa pirms ražošanas posma, kg;

Y_1 — slapjās biomasas ražība, kg/m³;

Y_0 — sausnas ražība, kg;

w_b — biomasas MC pirms žāvēšanas, %;

b_b — biomasas sausnas īpatsvars, %.

Lai noteiktu vajadzīgo biomasas daudzumu R, S, H un CG granulu ražošanai, tika veikts proporcionāls pārrēķins, no (2.27) vienādojuma izsakot m_b . BH, SH, BSG, L un G biomasas B1 posms netiek iekļauts, jo tās var tieši nonākt ražotnē (process B2). LCA modelī pieņemts vidējais transportēšanas attālums 100 km starp biomasas savākšanas vietu un granulu ražošanas rūpnīcu. Šo rādītāju noteica autora praktiskā pieredze un biomasas nozares specifika Latvijā,

un tas atbilst reāli īstenojamiem transportēšanas attālumiem. Kravas apgrozījums aprēķināts pēc vienādojuma:

$$W_x = \frac{m_{rm/p}}{1000} \cdot s_x, \quad (2.28)$$

kur

W_x — kravas apgrozījums (materiāla/produkta piegāde), t·km;

$m_{rm/p}$ — materiāla/produkta masa, kg;

s_x — transportēšanas attālums, km.

2.14. tabulā ir norādītas iekārtas, kas tika izmantotas biomasas savākšanas un apstrādes procesos. Apstrādes laiks atkarīgs no biomasas strukturālajām īpašībām un operatora darbības kvalitātes. Pieņemts, ka rūpnieciskā mērogā tiktu izmantotas līdzīgas iekārtas. Tā kā autora rīcībā esošā koksne bija priedes skaidas, koksnes šķeldošanai tika izmantoti literatūras dati par apaļkoksnes šķeldošanas iekārtām no Papandrea u.c. raksta ⁴²¹. Šķeldas malšanas posmam LCA modelim tika pieņemts, ka malšana notika ar laboratorijas dzirnavām *Vibrotehnik PM120* — ražīguma un īpatnējā elektroenerģijas patēriņa aprēķinam tika izmantota skaidām līdzīgas kvalitātes šķelda.

Tabula 2.14.

LCA modelī iekļaujamo elektroenerģiju patērējošo iekārtu biomasas savākšanas un apstrādes procesos elektriskā jauda

Process	Iekārta	Elektriskā jauda, kW
Koksnes šķeldošana (A3) *	<i>Peruzzo model T3</i>	9,00
Kaņepju smalcināšana (B1a) **	<i>MDS-Line</i>	15,00
Smalcināšana (B4)	<i>MEKA</i>	3,00
Malšana (A5; B5)	<i>Vibrotehnik PM120</i>	1,50
Sijāšana (B3a)	<i>Retsch AS400</i>	0,14
Granulēšana (A6; B6; C1)	<i>Kahl 14 - 175</i>	7,00

* – Teorētiski pieņemts process; ** – Procesu nodrošināja SIA "ŠRĒDEREJA"

Biomasa tika ievadīta iekārtās manuāli, tāpēc apstrādes laikā novēroti materiāla zudumi — materiāla nokļūšana uz grīdas, putekļu veidošanās u.tml. Vidējais materiāla zudums tika noteikts 2 % katram apstrādes posmam. LCA ietvaros pieņemts, ka līdzīgi zudumi iespējami arī rūpnieciskā ražošanā. Koksnes materiāliem zudumi pieņemti 1 % apmērā ⁴²². L un G gadījumā pēc B3a procesa radītos zudumus ir pieņemts uzskatīt par sadzīves atkritumiem, jo tie bieži sastopami minētās biomasās ⁴²³. Zudumi aprēķināti pēc vienādojuma:

$$m_l = m_x - a_x, \quad (2.29)$$

kur

m_l — materiāla zudumi, kg;

m_x — materiāla daudzums pirms x procesa (x — process ražošanas posmā), kg;

α_x — materiāla/produkta iznākums pēc x procesa (x — process ražošanas posmā), kg.

Materiāla iznākums aprēķināts pēc vienādojuma:

$$\alpha_x = m_x - m_l = m_x - \left(m_x \cdot \frac{k_l}{100}\right), \quad (2.30)$$

kur

k_l — zudumu koeficients (materiālam — 2 %; produktam — 1 %), %;

Visos procesos (izņemot B3a — zudumi uzskatīti par sadzīves atkritumiem) pieņemts, ka materiāla zudumi rodas kā bioloģiskie atkritumi, kas LCA modelī novirzāmi uz anaerobās pārstrādes biogāzes ražotni.

Iekārtas specifiskais elektroenerģijas patēriņš aprēķināts pēc vienādojuma:

$$Q'_{el} = \frac{Q_{el}}{\alpha_x} = \frac{\frac{\alpha_x}{R_x \cdot E_x}}{\frac{\frac{\alpha_x}{t_p} \cdot E_x}{\alpha_x}}, \quad (2.31)$$

kur

Q'_{el} — iekārtas īpatnējais elektroenerģijas patēriņš, kWh/kg;

Q_{el} — iekārtas elektroenerģijas patēriņš, kWh;

R_x — iekārtas produktivitāte, kg/h;

P_x — iekārtas elektriskā jauda, kW;

t_p — apstrādes ilgums, h.

Iekārtas kopējo elektroenerģijas patēriņu rūpnieciskā mērogā iegūst pēc vienādojuma:

$$Q_{el} = Q'_{el} \cdot \alpha_x, \quad (2.32)$$

Laboratorijas apstākļos biomasa tika žāvēta dabiskā veidā līdz stabilam MC . Granulēšanai optimālais MC pieņemts 17 % visām biomasām. MC tika noteikts un izmantots lai LCA ietvaros aprēķinātu nepieciešamo enerģiju žāvēšanas posmam rūpnieciskajā mērogā. Īpatnējais siltuma patēriņš noteikts pēc vienādojuma:

$$Q'_h = \frac{Q_h}{\alpha_{dr}} = \frac{\frac{m_{dr} \cdot (w_0 - w_1)}{100} \cdot \frac{L_v}{\eta_{d/100}}}{\alpha_{dr} \cdot 3.6}, \quad (2.33)$$

kur

Q'_h — īpatnējais siltumenerģijas patēriņš, kWh/kg;

Q_h — siltumenerģijas patēriņš, kWh;

α_{dr} — žāvētas biomasas iznākums, kg;

m_{dr} — biomasas daudzums pirms žāvēšanas, kg;

w_0 — biomasas MC pirms žāvēšanas, %;

w_1 — biomasas MC pēc žāvēšanas, %;

L_v — ūdens iztvaikošanas latentais siltums (pieņemts 2,256 MJ/kg), MJ/kg;

η_d — žāvētāja efektivitāte (pieņemts 80 %), %.

Rūpnieciskā mērogā tiek pieņemts, ka slapjā biomasa tiek žāvēta ar tehnoloģisku žāvētāju (piemēram, rotācijas žāvētāju) ⁴²⁴. A4 un B3 procesos siltums tiek iegūts no biokurināmā katla. Kopējais siltuma patēriņš aprēķināts pēc vienādojuma:

$$Q_h = Q'_h \cdot \alpha_{ar}, \quad (2.34)$$

Izžuvušais mitruma daudzums tiek uzskatīts par ūdens tvaika emisijām gaisā un rēķināts pēc vienādojuma:

$$m_m = m_{dr} - \alpha_{dr} = \left(\alpha_{dr} \cdot \frac{100 - w_1}{100 - w_0} \right) - \alpha_{dr}, \quad (2.35)$$

kur

m_m — radīta tvaika daudzums, kg.

MC, kas jāpanāk žāvēšanas laikā, ir 10 %, tādēļ granulēšanas posmā (A6, B6, C1) biomasa jāmitrina lai sasniegtu definētus 17 %. Šis ir nepieciešams tādēļ, ka rūpnieciskajā mērogā procesu mijiedarbība var nebūt automatizēta, tāpēc pēc žāvēšanas materiāls tiek uzglabāts līdz brīdim kamēr netiks sagranulēts. Līdzīgi granulu veidošana noritēja arī laboratorijas apstākļos. Nepieciešamais ūdens daudzums mitrināšanai aprēķināts pēc vienādojuma:

$$m_{tp} = m_p - a_{bp}, \quad (2.36)$$

kur

m_{tp} — mitrināšanai nepieciešamais ūdens daudzums, kg;

m_p — granulu (produktu) masa, kas nepieciešama lai sasniegtu FU, kg;

a_{bp} — biomasas iznākums pirms granulēšanas procesa, kg.

S, BH un SH biomasām žāvēšana nav nepieciešama, tādēļ šo biomasu ražošanas ķēdēs žāvēšanas posms tiek izlaists.

Nepieciešamais granulu daudzums aprēķināts pēc vienādojuma:

$$m_p = a_{bp} + m_{tp} = \frac{FU \cdot 3600}{E_{ISAx} / 100 \cdot Q_z^a}, \quad (2.37)$$

kur

FU — funkcionālā vienība (1 MWh), MWh;

E_{ISAx} — katla efektivitāte dedzinot noteiktās granulas, %.

Katla īpatnējais elektroenerģijas patēriņš rēķināts pēc vienādojuma:

$$Q'_{el\ b} = \frac{Q_{el\ b}}{m_p} = \frac{P_{el\ b} \cdot \frac{m_p}{B/T_h}}{m_p}, \quad (2.38)$$

kur

$Q'_{el\ b}$ — granulu katla īpatnējais elektroenerģijas patēriņš, kWh/kg;

$P_{el\ b}$ — granulu katla elektriskā jauda, kW;

T_p — sadedzināšanas testa ilgums, h.

Tabulā 2.15. ir apkopoti katrā procesā LCA modelī iekļauto iekārtu īpatnējie enerģijas patēriņi. Vērtības tika attiecinātas uz 1 MWh izmantojot vienādojumus (2.31), (2.33) un (2.38).

Tabula 2.15.

Īpatnējais siltumenerģijas un elektroenerģijas patēriņš katrā procesā (skaidrojumus sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

	$Q', \text{kWh/kg}$	Siltum- enerģija (S)/ Elektro- enerģija (E)	W	R	S	H	BH	SH	BSG	CG	L	G
Process	A3	E	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	-	-	0,13	0,13	0,13
	A4	S	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	-	-	0,52	0,52	0,52
	A5	E	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	-	-	0,30	0,30	0,30
	A6	E	0,23	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	A8	E	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
	B1a	E	-	-	-	0,15	-	-	-	-	-	-
	B3	S	-	0,06	-	0,52	-	-	1,47	0,79	0,96	2,59
	B3a	E	-	-	-	-	-	-	-	-	0,04	0,04
	B4	E	-	0,16	0,21	0,12	-	-	-	0,16	0,07	0,07
	B5	E	-	0,30	0,43	-	-	-	-	0,44	1,28	1,28
	B6	E	-	-	-	-	-	0,23	0,09	-	-	-
	B8	E	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
	C1	E	-	0,20	0,12	0,11	0,23	-	-	0,12	0,15	0,12
	C3	E	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07

Procesi A7, B7 un C2, kas ietver granulu transportēšanu no ražošanas uzņēmuma līdz izplatītājam un galalietotājam, Latvijas apstākļos LCA ietvaros tika ierobežoti līdz 100 km transportēšanas attālumam. Kravas apgrozījums tika aprēķināts, izmantojot vienādojumu (2.20).

CO , NO_x un PM emisijas, kas iegūtas eksperimentāli saskaņā ar 2.2.4. apakšnodaļā aprakstīto metodoloģiju ISA gadījumam, tika integrētas attiecīgajos procesos (A8, B8 un C3) LCA modelī. Ņemot vērā, ka rezultātu mērvienība ir koncentrācija, kas ir īpatnējais rādītājs, kopējais katra emisijas veida daudzums tika rēķināts pēc vienādojuma:

$$m_{em\ x} = \frac{C_x \cdot V_{fg} \cdot m_p}{1000}, \quad (2.39)$$

kur

$m_{em\ x}$ — emisiju masa dūmgāzēs (x — CO , NO_x vai PM), g;

C_x — nomērīta emisiju koncentrācija dūmgāzēs (x — CO , NO_x vai PM), mg/Nm³;

V_{fg} — kopējais dūmgāzu daudzums uz (rēķināts balstoties uz literatūrā pieejamām metodēm ^{163,425,426}), Nm³/kg.

Ražošanas mērogā iegūtie pelni LCA modelī tika uzskatīti par sadzīves cieto atkritumu plūsmu. Pelnu apsaimniekošanas inventarizācijai tika izmantots “Ecoinvent 3” datubāzes process, pielāgojot ķīmisko elementu koncentrācijas atbilstoši eksperimentāli noteiktajiem pelnu sastāva datiem. Pelnu daudzums rūpnieciskā mērogā tika aprēķināts pēc vienādojuma:

$$m_{ash} = m_p \cdot \frac{AC}{100}, \quad (2.40)$$

kur

m_{ash} — pelnu masa attiecībā uz FU, kg.

Lai nodrošinātu LCA modeļa caurspīdīgumu un datu izsekojamību, 2.16. tabulā apkopota aprites cikla inventarizācija. Inventarizācija šajā gadījumā raksturo, kā promocijas darbā iegūtie vai aprēķinātie materiālu, enerģijas un emisiju dati tika sasaistīti ar atbilstošajiem aprites cikla procesiem un “Ecoinvent 3” datubāzes ierakstiem. Šāda pieeja atbilst ISO 14040 un ISO 14044 LCA struktūrai, kur inventarizācijas posmā tiek kvantificētas sistēmas robežās iekļautās ievades un izvades plūsmas, kuras tālāk izmanto ietekmes novērtējumā.

Tabula 2.16.

LCA inventarizācija (skaidrojumus sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

Process/ materiāls	Mērv.	Daudzums/ izmantotais vienādojums	Saistīts process	Saistīts produkts	Process/materiāls no Ecoinvent 3 datubāzes
Apaļkoksnēs savākšana granulu ražošanai	m ³	1	A1	W, R, S, H, BH, CG, L, G	Procesi no Kuka u.c. ⁴¹⁶ raksta tika integrēti modelī no “Ecoinvent 3” datubāzes
Materiāla/ produkta transportēšana	t·km	(2.28)	A2, B2, A7, B7, C2	visi	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {RER} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cut-off, U
Aprīkojuma un katla elektro- enerģijas patēriņš	kWh	(2.32)	A3, A5, A6, A8, B1a, B3a, B4, B5, C1, C3	visi	Electricity, medium voltage {LV} market for electricity, medium voltage Cut-off, U

Process/ materiāls	Mērv.	Daudzums/ izmantotais vienādojums	Saistīts process	Saistīts produkts	Process/materiāls no Ecoinvent 3 datubāzes
Materiāla/ produkta zudumi un to utilizācija	kg	(2.29)	A3, A5, A6, B4, B5, C1	visi	<i>Biowaste {RoW} treatment of biowaste by anaerobic digestion Cut- off, U</i>
Aprikojuma siltum-enerģijas patēriņš	kWh	(2.34)	A4, B3	W, R, H, BSG, L, G	<i>Heat, central or small-scale, other than natural gas {CH} heat production, mixed logs, at wood heater 6kW Cut-off, U</i>
Tvaika daudzums no žāvēšanas	kg	(2.35)	A4, B3	W, R, H, BSG, L, G	<i>Water; Subcompartment: low. pop. (Emissions to air)</i>
Sausā materiāla mitrināšana pirms granulēšanas	kg	(2.36)	C1,	R, S, H, BH, CG, L, G	<i>Tap water {Europe without Switzerland} market for tap water Cut-off, U</i>
CO emisiju daudzums sadedzināšanā	g	(2.39)	A8, B8, C3	visi	<i>Carbon monoxide; Subcompartment: low. pop., long-term (Emissions to air)</i>
NO _x emisiju daudzums sadedzināšanā	g	(2.39)	A8, B8, C3	visi	<i>Nitrogen oxides, LV; Subcompartment: low. pop., long-term (Emissions to air)</i>
PM emisiju daudzums sadedzināšanā	g	(2.39)	A8, B8, C3	visi	<i>Particulates, > 2.5 um, and < 10um; Subcompartment: low. pop., long-term (Emissions to air)</i>
Pelnu utilizācija	kg	(2.40)	A8, B8, C3	visi	<i>Bāzēts uz Ecoinvent 3 datubāzē pieejamo procesu (ķīmiskais sastāvs pielāgots atbilstoši ICP-OES rezultātiem): Wood ash mixture, pure {Europe without Switzerland} market for wood ash mixture, pure Cut-off, U (considered that all ash used in landfarming (Wood ash mixture, pure {Europe without Switzerland} treatment of wood ash mixture, pure, landfarming Cut-off, U)</i>
Lauka apstrāde: niedre	ha	(2.27)	B1	R	<i>Chopping, maize {RoW} chopping, maize Cut-off, U</i>
Lauka apstrāde: salmi un Kanādas zeltslotiņa	ha	(2.27)	B1	S, CG	<i>Mowing, by motor mower {RoW} mowing, by motor mower Cut-off, U</i>
Lauka apstrāde: kaņepe	ha	(2.27)	B1	H	<i>Mowing, by rotary mower {RoW} mowing, by rotary mower Cut-off, U</i>
Sijāšanas sadzīves atkritumi	kg	(2.28)	B3a	L, G	<i>Municipal solid waste {RoW} treatment of municipal solid waste, sanitary landfill Cut-off, U</i>

Aprites cikla ietekmes novērtējums (angļu val. *Life Cycle Impact Assessment (LCIA)*) ir LCA metodoloģijas posms, kurā inventarizācijas datus iekļautās materiālu, enerģijas un emisiju plūsmas tiek pārvērstas ietekmes kategoriju rādītājos. Šim nolūkam tiek izvēlēta kāda no pastāvošajām LCIA metodēm, kas nosaka, kā emisijas un resursu patēriņš tiek klasificēti, raksturoti un, ja nepieciešams, agregēti salīdzināmā rezultātā. Pētījumos par promocijas darbam līdzīgu tēmu galvenokārt sastopamas divas metodes: “*CML 2001*”²⁷⁰ un “*ReCiPe 2016*”⁴²⁷. “*CML 2001*” ir vidusposma ietekmes kategoriju metode, kas izstrādāta Leidenes Universitātes Vides zinātņu centrā un plaši izmantota aprites cikla pētījumos. Tā ļauj novērtēt atsevišķas vides slodzes, piem., klimata pārmaiņu potenciālu, paskābināšanos, eutrofikāciju, ozona slāņa noārdīšanos un toksicitātes potenciālu. “*CML 2001*” priekšrocība ir detalizēts atsevišķu ietekmes kategoriju novērtējums, tomēr rezultāti saglabājas vairākās atsevišķās kategorijās, kas var apgrūtināt kopēju alternatīvu salīdzināšanu. “*ReCiPe 2016*” ir jaunāka LCIA metode, kas nodrošina gan vidusposma ietekmes kategoriju (VIK) (angļu val. *Midpoint*), gan galarezultāta ietekmes kategoriju (GIK) (angļu val. *Endpoint*) novērtēšanu⁴²⁸. VIK raksturo konkrētas vides slodzes cēloņsakarību ķēdes agrākā posmā, piem., klimata pārmaiņu, paskābināšanās vai eutrofikācijas potenciālu. Savukārt GIK apkopo šo slodžu potenciālo kaitējumu trīs plašākās aizsardzības jomās: cilvēku veselība, ekosistēmas un resursi. Tādēļ GIK pieeja nodrošina vieglāk interpretējamu rezultātu alternatīvu salīdzināšanai, lai gan tai raksturīga lielāka nenoteiktība nekā VIK pieejai, jo tiek veikta papildu rezultātu agregācija⁴²⁹.

Šajā pētījumā LCIA veikta, izmantojot “*ReCiPe 2016 Endpoint (H) V1.09 / World (2010) H/A*” metodi “*SimaPro 10.2*” programmatūras vidē. Apzīmējums “*Endpoint*” norāda, ka rezultāti tiek interpretēti galarezultāta ietekmes kategorijās, savukārt “*H*” apzīmē hierarhisko perspektīvu, kas “*ReCiPe*” metodē tiek izmantota kā līdzsvarota, zinātniskajā konsensā balstīta modelēšanas pieeja. “*World (2010) H/A*” norāda, ka normalizācija un svēršana veikta, izmantojot pasaules mēroga references datus un hierarhisko svēršanas pieeju. Šī metode tika izvēlēta, jo promocijas darba rezultāti paredzēti ne tikai atsevišķu emisiju vai ietekmes kategoriju interpretācijai, bet arī alternatīvo biomasas granulu savstarpējai salīdzināšanai iesaistīto pušu un potenciālo lietotāju vajadzībām. Produktu salīdzināšanai autors izmantoja ekopunktus (angļu val. *Ecopoints*), kas tika lietoti kā galvenais integrālais novērtējuma indikators. Ekopunkti apvieno ietekmi uz cilvēku veselību, ekosistēmām un resursiem vienā rādītājā, tādējādi nodrošinot pārskatāmu pamatu granulu alternatīvu savstarpējai salīdzināšanai. Jo lielāka ir ekopunktu vērtība, jo lielāka ir attiecīgās alternatīvas kopējā aprites cikla ietekme uz vidi; savukārt zemāka ekopunktu vērtība norāda uz salīdzinoši mazāku kopējo ietekmi. Vienlaikus jāņem vērā, ka ekopunktu izmantošana ietver normalizācijas un svēršanas pieņēmumus, tādēļ rezultāti interpretējami kā salīdzinošs lēmumu atbalsta indikators.

2.2.8. Ilgtspējas novērtējums

Kvantitatīvs biokurināmā ilgtspējas novērtējums SEG emisiju kontekstā parasti balstās uz aprites cikla emisiju intensitātes noteikšanu un tās salīdzināšanu ar atbilstošu fosilā kurināmā etalonu. Šāda pieeja ļauj novērtēt, vai konkrētā bioenerģijas piegādes ķēde nodrošina pierādāmu SEG emisiju ietaupījumu, ņemot vērā izejvielas ieguvu vai savākšanu, zemes lietojuma maiņu,

apstrādi un ražošanu, transportēšanu, izplatīšanu un gala izmantošanu enerģijas transformācijas iekārtā.

Cietās un gāzveida bioenerģijas SEG emisiju aprēķinu metodoloģiskais pamats plaši aprakstīts EK Kopīgā pētniecības centra (angļu val. *Joint Research Centre (JRC)*) ziņojumos, kuros apkopoti ievaddati, pieņēmumi un aprēķinu struktūra tipisko un noklusēto SEG emisiju vērtību noteikšanai dažādiem bioenerģijas ceļiem ⁴³⁰. Šajos ziņojumos aprēķina struktūra veidota pa posmiem, ietverot izejvielu ieguvi vai audzēšanu, apstrādi, transportēšanu un enerģijas izmantošanu. Līdzīga harmonizēta aprēķinu pieeja izmantota arī “*BioGrace II*” rīkā, kas izstrādāts cietās un gāzveida bioenerģijas SEG emisiju aprēķinam siltuma, aukstuma un elektroenerģijas ražošanas vajadzībām ⁴³¹.

Šī aprēķinu pieeja ir izmantota arī ES atjaunojamās enerģijas normatīvajā ietvarā (piem., RED II), kur biokurināmo, tai skaitā šķidro kurināmo (biometānam ⁴³² un biogāzei ⁴³³), un atbilstība tiek vērtēta pēc SEG emisiju ietaupījuma salīdzinājumā ar fosilo etalonu. Promocijas darba ietvaros šī aprēķinu struktūra izmantota pētāmo granulu ilgtspējas novērtēšanai, nosakot attiecīgā kurināmā īpatnējo aprites cikla emisiju vērtību un salīdzinot to ar fosilā etalona atsaucēs vērtību (sk. (2.41) vienādojumu).

$$S = \frac{EC_f - EC_x}{EC_f} \cdot 100, \quad (2.41)$$

kur

S — emisiju ietaupījums, %;

EC_f — fosilā etalona atsaucēs vērtība, $\text{gCO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}$;

EC_x — attiecīgā kurināmā īpatnējā kopējo emisiju vērtība aprites ciklā, ņemot vērā enerģijas transformācijas iekārtu attiecīgajā iekārtā, $\text{gCO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}$.

EC_x tiek rēķināta dalot kurināmā īpatnējo kopējo emisiju vērtību aprites cikla laikā (E_x) ar attiecīgās enerģijas transformācijas iekārtas efektivitāti. Promocijas darba ietvaros efektivitāte tika noteikta degšanas procesa izpētes laikā atbilstoši aprakstītai metodei (sk. 2.2.4. apakšnodaļu). EC_x rēķina pēc vienādojuma:

$$EC_x = \frac{E_x}{E_{ISA_x}/100}, \quad (2.42)$$

E_x rēķina pēc vienādojuma:

$$E_x = e_{ec} + e_l + e_p + e_{td} + e_u - e_{sca} - e_{ccs} - e_{ccr}, \quad (2.43)$$

kur

e_{ec} — īpatnējās emisijas no audzēšanas un/vai ieguves, $\text{gCO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}$;

e_l — īpatnējās emisijas no zemes maiņas ietekmes, $\text{gCO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}$;

e_p — īpatnējās emisijas no apstrādes/ražošanas procesiem, $\text{gCO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}$;

e_{td} — īpatnējās emisijas no transportēšanas un realizācijas, $\text{gCO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}$;

e_u — īpatnējās emisijas no degvielas izmantošanas, $\text{gCO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}$;

e_{sca} — īpatnējo emisiju ietaupījums no oglekļa uzkrāšanās augsnē, $\text{gCO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}$;
 e_{ccs} — īpatnējo emisiju ietaupījums no CO_2 uztveršanas un uzglabāšanas, $\text{gCO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}$;
 e_{ccr} — īpatnējo emisiju ietaupījums no CO_2 uztveršanas un aizstāšanas, $\text{gCO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}$.

Īpatnējās vērtības tiek izteiktas uz attiecīgā energoresursa 1 MJ, ņemot vērā siltumspēju. Promocijas darba kontekstā, aprakstītā metodika izmantota pētāmo 10 granulu paraugu ilgtspējas novērtēšanai. Dažu parametru vērtības no vienādojuma (2.43) ir pieņemtas kā 0, balstoties uz RED II metodikas tvērumu un vadlīnijām. e_l nepastāv, jo promocijas darbā analizējamo granulu izejvielu iegāde nav saistīta ar zemes transformāciju. e_{sca} , e_{ccs} un e_{ccr} piemērošanai būtu nepieciešami ilgtermiņa (vismaz 10 gadu) empīriskie dati, kas pierādītu augsnes organiskā oglekļa pieaugumu uzlabotas lauksaimniecības prakses rezultātā, kas vienlaikus neietver analizēto atlikumu savākšanu. Tāpat arī pieņemts, ka granulu ražošanā neizmanto oglekļa uztveršanas un uzglabāšanas infrastruktūru.

Lai pētījumā aprēķinātās granulu īpatnējās SEG emisijas būtu iespējams salīdzināt ar ES normatīvajā ietvarā izmantotajām references vērtībām, 2.17. tabulā apkopotas RED II VI pielikumā C daļā norādītās noklusētās vērtības, kurās emisijas sadalītas pa galvenajiem aprites cikla posmiem: izejvielu ieguvī vai audzēšanu, apstrādi un ražošanu, transportēšanu un izplatīšanu, kā arī kurināmā izmantošanu. Šīs vērtības tālāk izmantotas kā salīdzināšanas bāze promocijas darbā pētāmo granulu aprēķinātajām SEG emisijām. Tās neaizstāj promocijas darbā iegūtos empīriskos datus, bet ļauj novērtēt, kā W, R, S, H, BH, SH, BSG, CG, L un G granulu rezultāti attiecas pret RED II noteiktajiem koksnes un salmu granulu emisiju ceļiem. Salīdzinājumam izvēlēts transportēšanas attāluma diapazons 1–500 km, jo tas atbilst pētījumā pieņemtajam Latvijas reģionālajam piegādes ķēdes mērogam.

Tabula 2.17.

Noklusētās kurināmā ražošanas un izmantošanas īpatnējo SEG emisiju vērtības koksnes granulām atkarībā no izcelsmes Latvijas kontekstā ²⁵⁵

Granulu izcelsme	Īpatnējās				
	SEG emisijas kopā, $\text{gCO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}$	e_{ec} , $\text{gCO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}$	e_p , $\text{gCO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}$	e_{td} , $\text{gCO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}$	e_u , $\text{gCO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}$
No stumbra koksnes (1. gad.)	35	1,1	29,8	3,5	0,3
No mežsaimniecības atlikumiem (1. gad.)	35	0,0	30,9	3,5	0,3
No mežrūpniecības atlikumiem (1. gad.)	21	0,0	17,2	3,3	0,3
No stumbra koksnes (2.a gad.)	18	1,4	13,2	3,6	0,3
No mežsaimniecības atlikumiem (2.a gad.)	19	0,0	15,0	3,6	0,3

Granulu izcelsme	Īpatnējās SEG emisijas kopā, gCO _{2ekv} /MJ	e_{ec} , gCO _{2ekv} /MJ	e_p , gCO _{2ekv} /MJ	e_{td} , gCO _{2ekv} /MJ	e_u , gCO _{2ekv} /MJ
No mežrūpniecības atlikumiem (2.a gad.)	11	0,0	7,2	3,4	0,3
No stumbra koksnes (3.a gad.)	6	1,4	0,9	3,6	0,3
No mežsaimniecības atlikumiem (3.a gad.)	7	0,0	2,8	3,6	0,3
No mežrūpniecības atlikumiem (3.a gad.)	4	0,0	0,3	3,4	0,3
Salmu granulas	10	0,0	6,0	3,6	0,3

1. gad. — siltumenerģija no dabasgāzes katla, elektroenerģija no tīkla; 2.a gad. — siltumenerģija no šķeldas katla, elektroenerģija no tīkla; 3.a gad. — siltumenerģija un elektroenerģija no koģenerācijas (šķelda)

Nākotnē ir plānots papildināt attiecīgos RED II pielikumus ar precizētiem datiem par šobrīd iekļauto kurināmo, kā arī papildināt ar datiem par alternatīvās biomasas kurināmo ⁴³⁴. Ņemot vērā promocijas darba metodoloģisko struktūru, iegūstamo datu apjoms un kvalitāte ir pietiekami, lai veiktu aprēķinu balstoties uz RED II ilgtspējas aprēķina metodi pētāmām granulām. Tā kā pētāmo granulu sastāvā ir gan koksne (izņemot SH un BSG granulas), gan alternatīvā biomasas, aprēķinos koksnes daļas īpatnējās emisijas proporcionāli tiek pārrēķinātas ņemot vērā aprites cikla inventarizācijas datus par koksnes plūsmu noteiktam granulu veidam.

e_{ec} iekļautas emisijas no noteiktā lauka apstrādes biomasas savākšanai un tiek rēķinātas pēc vienādojuma:

$$e_{ec} = \frac{S_b \cdot B_{dd} \cdot Q_{dd} \cdot E_{dd}}{m_p \cdot Q_z^d}, \quad (2.44)$$

kur

B_{dd} — dīzeļdegvielas īpatnējais patēriņš uz lauka apstrādi (pieņemts 100 l/ha), l/ha;

Q_{dd} — dīzeļdegvielas siltumspēja (35,7 MJ/l ⁴³⁵), MJ/l;

E_{dd} — dīzeļdegvielas emisiju faktors, gCO_{2ekv}/MJ.

e_p iekļautas emisijas, kas nosacīti veidojas izmantojot siltumenerģiju un elektroenerģiju tehnoloģiskajos procesos. Koeficients 3,6 nodrošina pāreju no kWh uz MJ, savukārt koeficients 277,78 nodrošina pāreju no tCO₂/MWh uz gCO₂/MJ. e_p tiek rēķinātas pēc vienādojuma:

$$e_p = \frac{(\sum_{i=1}^n Q_{el,i} \cdot 3,6) \cdot (E_{el} \cdot 277,78) + (\sum_{i=1}^n Q_{h,i} \cdot 3,6) \cdot (E_h \cdot 277,78)}{m_p \cdot Q_z^d}, \quad (2.45)$$

kur

$Q_{el,i}$ — kopējais apstrādes un ražošanas procesā izmantoto iekārtu elektroenerģijas patēriņš, kWh;

E_{el} — elektroenerģijas emisiju faktors ($0,0537 \text{ tCO}_2/\text{MWh}^{436}$), tCO_2/MWh ;

$Q_{h,i}$ — kopējais apstrādes un ražošanas procesā izmantoto iekārtu siltumenerģijas patēriņš, kWh;

E_h — siltumenerģijas emisiju faktors ($0,0683 \text{ tCO}_2/\text{MWh}^{436}$), tCO_2/MWh .

e_{td} iekļautas emisijas no izejvielu/produkta transportēšanas uz/no nosacīto ražotni, kas atrodas 1–500 km diapazonā no koksnes un biomasas savākšanas vietas vai no produkcijas izplatītāja/klienta, un tiek rēķinātas pēc vienādojuma:

$$e_{td} = \frac{\sum_{i=1}^n W_{x,i} \cdot E_w}{m_p \cdot Q_z^d}, \quad (2.46)$$

kur

$W_{x,i}$ — kopējais kravas apgrozījums (materiāla/produkta piegāde), t·km;

E_w — kravas automobiļu emisiju faktors ($56,6 \text{ gCO}_2/\text{t} \cdot \text{km}^{437}$), $\text{gCO}_2/\text{t} \cdot \text{km}$.

e_u ietver ne- CO_2 emisijas (CO_2 netiek ņemts vērā, jo pieņemts, ka biomasas uzkrātais CO_2 atbrīvojas degšanas laikā) aprites cikla beigu posmā (kurināmā izmantošanā), sadedzinot attiecīgās granulas. Atbilstoši 2.2.4. apakšnodaļā minētajam, granulū degšanas procesā tika mērītas CO un NO_x , kas netiešā veidā pozitīvi ietekmē globālo sasilšanu. Atbilstoši Klimata pārmaiņu starpvaldību padomes (angļu val. *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC)) izstrādātajām vadlīnijām, minēto emisiju ietekme var tikt ņemta vērā nacionālos un reģionālos līmeņos tai skaitā ar ilgtspēju saistītos aprēķinos ⁴³⁸. Promocijas darba ietvaros ilgtspējas novērtēšanā vērā tiks ņemts tikai NO_x , pieņemot, ka N_2O vidēji veido ~ 2,5 % no NO_x masas cietās biomasas degšanas gadījumā ^{439,440}. Testu laikā nomērītā NO_x koncentrācija tika pārrēķināta uz NO_x masu, ņemot vērā dūmgāzu apjomu (sk. 2.2.7. apakšnodaļu, vienādojumu (2.39)). N_2O pārrēķinam uz CO_2 ekvivalentu tika izmantots koeficients $273 \text{ gCO}_{2\text{ekv}}/\text{g}$ (100 gadu apvārsnis) ⁴⁴¹. e_u tiek rēķināts pēc vienādojuma:

$$e_u = \frac{m_{em \text{ NO}_x} \cdot 0,025 \cdot E_{\text{N}_2\text{O}}}{m_p \cdot Q_z^d}, \quad (2.47)$$

kur

$m_{em \text{ NO}_x}$ — NO_x masa dūmgāzēs, g;

$E_{\text{N}_2\text{O}}$ — N_2O emisiju faktors ($273 \text{ gCO}_{2\text{ekv}}/\text{g}$), $\text{gCO}_{2\text{ekv}}/\text{g}$.

2.3. Metodoloģijas kopsavilkums

Promocijas darba metodoloģija veidota kā daudzdimensiāla pieeja alternatīvās biomasas kurināmo izvērtēšanai siltumenerģijas ražošanā. Tā apvieno teorētisko, eksperimentālo un analītisko daļu, nodrošinot, ka pētījumā iekļauti objekti (granulas un šķeldas maisījumi) netiek vērtēti tikai pēc viena rādītāja, piem., siltumspējas vai emisijām, bet pēc savstarpēji saistītu tehnisko, vides un praktiskās ieviešanas kritēriju kopuma. Metodoloģija pārbaudīta divos

pielietojuma mērogos: individuālās siltumapgādes kontekstā, izmantojot 10 granulu veidus, un centralizētās siltumapgādes kontekstā, izmantojot 9 šķeldas paraugus vai maisījumus (sk. 2.52. att.). Granulu paraugi galvenokārt veidoti no koksnes un alternatīvās biomasas maisījumiem, savukārt šķeldas daļā analizētas dažādas kvalitātes šķeldas plūsmas un maisījumi ar alternatīvās biomasas piejaukumu. Paraugu izvēle balstīta uz priekšizpēti, kuras galvenais kritērijs bija faktiskā biomasas pieejamība Latvijas apstākļos. Tādēļ pētījumā netika iekļautas tikai teorētiski granulēšanai piemērotas izejvielas, bet gan tādas plūsmas, kurām ir reāls vai potenciāls pielietojums vietējā biokurināmā ražošanas ķēdē.



2.52. attēls. Pētījumā iekļautie paraugi

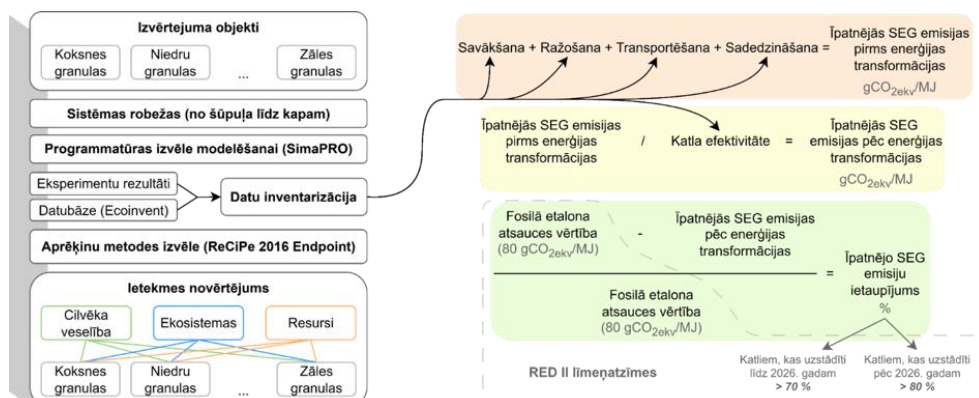
Pētījuma aktualitātes un zinātniskās nišas pamatošanai izmantota bibliometriskā analīze. Tā ļāva identificēt galvenos pētījumu virzienus biomasas enerģētikas kontekstā un parādīt, ka alternatīvās biomasas izmantošana ir saistīta gan ar tehnoloģiskiem jautājumiem, gan ar ilgtspējas, aprites cikla un lēmumu pieņemšanas problemātiku. Bibliometriskā analīze tika veikta, izvēloties zinātnisko datubāzi, definējot atslēgvārdu vaicājumus un vizualizējot iegūtos bibliometriskos datus. Alternatīvās biomasas pieejamības izvērtēšanai izmantota materiālu

plūsmas analīze. Tās mērķis bija identificēt, kādas biomasas plūsmas tautsaimniecībā jau tiek izmantotas, kādas paliek neizmantotas un kāda to daļa potenciāli varētu tikt novirzīta cietā biokurināmā ražošanai. Lai dažādu biomasas veidu potenciālu būtu iespējams savstarpēji salīdzināt, materiālu plūsmas tika normalizētas un izteiktas enerģijas ekvivalentā. Šī metode kalpoja kā pamatojums tam, ka alternatīvās biomasas izvērtēšanā būtiska ir ne tikai laboratoriski noteikta kvalitāte, bet arī resursa pieejamība un konkurence ar citiem izmantošanas virzieniem.

Granulu izpētes daļā vispirms veikta izvēlēto biomasas paraugu savākšana, sagatavošana un granulēšana. Pēc tam granulām noteikti galvenie fizikālķīmiskie kvalitātes rādītāji, kas raksturo to piemērotību izmantošanai cietā biokurināmā veidā. Individuālās siltumapgādes kontekstā sagatavotās granulas tika dedzinātas laboratorijas apstākļos 25 kW granulu katlā *GRANDEG GD BIO 25 kW*. Testos saglabāti salīdzināmi degšanas apstākļi, par pamatu izmantojot katla ražotāja iestatījumus kokskaidu granulu sadedzināšanai. Testu laikā mērīts granulu patēriņš, saražotais siltums, dūmgāzu temperatūra un emisijas, bet katla efektivitāte noteikta pēc tiešās bilances metodes. Pēc sadedzināšanas savāktajiem pelniem veikta ķīmiskā sastāva un kristālisko fāžu analīze, lai novērtētu to īpašības un potenciālos apsaimniekošanas virzienus. Centralizētās siltumapgādes kontekstā analizēti šķeldas paraugi un šķeldas maisījumi. Tiem veikta kvalitātes analīze un sadedzināšanas testi 2 MW katlā Ādažu pilsētā. Visi paraugi testēti pie katla noklusējuma iestatījumiem, kas ļāva vērtēt to ietekmi uz praktiski izmantotu katlu bez īpašas pielāgošanas katram kurināmā veidam. Katla efektivitāte noteikta pēc apgrieztās bilances metodes, aprēķinot siltuma zudumus, piem., ar dūmgāzēm un no katla virsmām. Pēc testiem savāktajiem pelniem veikta ķīmiskā sastāva analīze.

Eksperimentālo datu interpretācijai izmantota regresijas analīze. Vispirms ar vienkāršo lineāro regresiju vērtētas sakarības starp savstarpēji saistītiem parametriem, piem., starp slāpekļa saturu kurināmajā un NO_x koncentrāciju dūmgāzēs. Parametri, kuriem nebija pietiekami skaidras lineāras sakarības, tika iekļauti daudzfaktoru regresijas analīzē. Šīs analīzes mērķis bija izveidot empīriskus modeļus, ar kuriem iespējams prognozēt noteiktu sadedzināšanas rādītāju vērtības un novērtēt iespējas tos ietekmēt, mainot kurināmā sastāvu vai kvalitāti. Regresijas analīzes pielietojuma algoritms ir redzams 2.53. attēlā.

Vides novērtējums veikts divās kārtās (sk. 2.55. att.). Pirmajā kārtā veikta aprites cikla ietekmes analīze, balstoties galvenokārt uz promocijas darbā iegūtajiem eksperimentālajiem datiem. Analīze veikta “SimaPro 10.2” programmatūras vidē, izmantojot “ReCiPe 2016 Endpoint (H) V1.09 / World (2010) H/A” metodi. Granulu sistēma vērtēta “no šūpuļa līdz kapam” sistēmas robežās (no materiāla savākšanas līdz sadedzināšanai), par funkcionālo vienību izvēloties 1 MWh saražotās siltumenerģijas. Šāda funkcionālā vienība ļauj granulas salīdzināt pēc to faktiskās enerģētiskās funkcijas, nevis tikai pēc masas. Otrajā kārtā veikts granulu ilgtspējas novērtējums SEG emisiju ietaupījuma kontekstā. Šajā novērtējumā izmantoti aprites cikla ievaddati un aprēķinātas tiešās īpatnējās SEG emisijas, neiekļaujot biogēno CO₂. Galvenais rādītājs ir īpatnējo SEG emisiju ietaupījums, kas noteikts, salīdzinot kopējās īpatnējās SEG emisijas, ņemot vērā katla efektivitāti, ar fosilo etalonu. Šī pieeja ļāva sasaistīt eksperimentāli iegūtos kurināmā kvalitātes, sadedzināšanas un emisiju datus ar normatīvi salīdzināmu ilgtspējas novērtējumu.



2.55. attēls. Vides novērtējuma, kas sastāv no aprites cikla analīzes un ilgtspējas novērtējuma, pielietojums pētījumā

Kopumā izstrādātā metodoloģija ļauj alternatīvo biomasu vērtēt nevis tikai kā teorētiski pieejamu resursu, bet kā praktiski izmantojamu kurināmo. Tā apvieno resursa pieejamību, kurināmā kvalitāti, sadedzināšanas uzvedību, emisijas, pelnu īpašības, statistisko sakarību analīzi, daudzkritēriju lēmumu pieņemšanu, aprites cikla ietekmi un SEG emisiju ietaupījumu. Tādējādi metodoloģija nodrošina pamatu alternatīvās biomasas granulu un šķeldas maisījumu izvērtēšanai gan individuālās, gan centralizētās siltumapgādes sistēmās.

3. REZULTĀTI

Rezultātu nodaļā apkopoti dati un novērojumi, kas iegūti promocijas darba praktiskajā daļā, ietverot kurināmā eksperimentālo izpēti, iegūto datu analīzi un kurināmā novērtējumu. Rezultāti atspoguļoti attiecīgās apakšnodaļās zemāk.

3.1. Biomasas eksperimentālās izpētes rezultāti

Eksperimentāli tika pētīti veidotie granulu paraugi un šķeldas maisījumi atbilstoši izstrādātai metodoloģijai. Granulu paraugu un šķeldas maisījumu sastāvs un izmantoto apzīmējumu atšifrējumi ir apkopoti 3.1. tabulā.

Tabula 3.1.

Pētāmo granulu paraugu un šķeldas maisījumu sastāvs (ar % apzīmētas proporcijas sausās masas daļām) (skaidrojumus sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

Apzīmējums	Kurināmā sastāvs
W	Zāgskaidas no mežrūpniecības (100 %)
R	Zāgskaidas no mežrūpniecības (50 %) un niedru stiebru biomasa (50 %)
S	Zāgskaidas no mežrūpniecības (50 %) un kviešu salmu stiebru biomasa (50 %)
H	Zāgskaidas no mežrūpniecības (50 %) un kaņepju stiebru biomasa (50 %)
BH	Zāgskaidas no mežrūpniecības (50 %) un griķu čaumalu biomasa (50 %)
SH	Saulespuķu sēklu čaumalu biomasa (100 %)
BSG	Iesala drabiņu biomasa (100 %)
CG	Zāgskaidas no mežrūpniecības (50 %) un Kanādas zeltslotiņas stiebru biomasa (50 %)
L	Zāgskaidas no mežrūpniecības (50 %) un lapu koku nokritušās lapas (50 %)
G	Zāgskaidas no mežrūpniecības (50 %) un nopļauta zāle (50 %)
WC1	Šķelda no augstas kvalitātes apaļkoksnes (100 %)
WC2	Šķelda no zemas kvalitātes apaļkoksnes (100 %)
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 zāgskaidas no mežrūpniecības (40 %)

3.1.1. Granulu paraugu izpētes rezultāti

Granulu paraugu kvalitātes analīzes rezultāti

Šajā apakšnodaļā apkopoti granulu paraugu kvalitātes un degšanas procesa rādītāji ISA testu ietvarā. Apzīmējumu skaidrojumi atrodami 2.2.3. un 2.2.4. apakšnodaļās. 3.2. tabulā apkopotie *MC*, *AC*, *VM* un *FC* rezultāti parāda, ka veidoto granulu paraugu mitruma saturs variē no 5,09 % līdz 12,88 %, kur zemākā *MC* vērtība konstatēta *W* granulām, bet augstākā —

CG granulām. *AC* variē no 0,72 % līdz 6,51 % (W un L granulām), kas norāda uz būtiskām minerālvielu frakcijas atšķirībām starp izejvielām. *VM* diapazons ir 71,8–84,4 %, bet *FC* — 13,6–25,7 %, kur augstākais *FC* konstatēts BH granulām. Kopumā alternatīvās biomasas paraugiem novērojama augstāka *AC* un zemāka *VM* attiecībā pret W granulām, kas ir būtiski gan sadegšanas režīma stabilitātei, gan pelnu apsaimniekošanas slodzei.

Tabula 3.2.

Granulu mitruma, pelnu, gaistošo organisko vielu un fiksētā oglekļa saturs (skaidrojumus sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

Granulu parauga veids	<i>MC</i> , % no masas	<i>AC</i> , % no masas	<i>VM</i> , % no masas	<i>FC</i> , % no masas
W	5,09	0,72	84,4	14,9
R	7,05	3,73	82,7	13,6
S	9,39	4,22	74,4	21,4
H	10,55	6,00	73,6	20,4
BH	11,52	1,39	72,9	25,7
SH	9,10	3,40	76,6	20,0
BSG	9,70	3,96	80,3	15,7
CG	12,88	3,76	74,5	21,7
L	9,18	6,51	71,8	21,7
G	12,02	6,32	71,9	21,8

3.3. tabulā apkopots granulu *CHNSO* saturs un sadegšanas siltumi. *C* saturs paraugos ir līdzīgā līmenī (aptuveni 46,02–51,10 %), tomēr *N* saturs būtiski atšķiras. Zemākā *N* vērtība konstatēta W granulām (0,28 %), bet augstākā — BSG granulām (4,66 %), kas teorētiski ir nozīmīgs priekšnoteikums atšķirīgam NO_x emisiju līmenim. Q_z^d mitrai masai variē 16,3–18,7 MJ/kg (zemākā S granulām, augstākā W granulām), savukārt Q_z^d sausai masai ir 18,3–19,9 MJ/kg robežās. Šaurāks Q_z^d diapazons sausas masas bāzē norāda, ka daļa atšķirību mitrai masai saistīta ar *MC* ietekmi. Savukārt Q_a^d rādītāji ļauj salīdzināt paraugu kopējo enerģētisko potenciālu sausas masas bāzē, ņemot vērā *C*, *H* un *O* īpatsvaru kurināmajā kas atbilst granulu enerģētiskajai viendabībai.

Tabula 3.3.

Granulu ķīmiskais sastāvs un sadegšanas siltums (skaidrojumus sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

Granulu parauga veids	<i>CHNSO</i>					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	
W	47,77	6,17	0,28	0,00	45,08	18,7	19,9	21,2
R	46,02	5,68	1,06	0,08	43,44	17,3	18,8	20,4
S	46,02	5,65	0,35	0,06	43,69	16,3	18,3	19,7
H	46,31	6,10	0,36	0,05	41,18	16,4	18,6	19,9
BH	47,40	5,69	0,64	0,07	44,82	16,8	19,3	20,5
SH	50,50	5,90	1,10	0,05	39,05	17,0	18,9	20,3
BSG	51,10	6,87	4,66	0,44	32,97	17,6	19,8	21,3

Granulu parauga veids	CHNSO					Q_z^d , MJ/kg		Q_a^d , MJ/kg
	C, %	H, %	N, %	S, %	O, %	Mitrai masai	Sausai masai	
CG	48,08	6,20	1,15	0,11	40,71	16,4	19,2	20,6
L	47,41	5,87	0,86	0,08	39,28	17,0	18,9	20,2
G	46,04	6,06	1,86	0,11	39,62	16,3	18,9	20,3

Granulu fizikāli-mehāniskie rādītāji norādīti 3.4. tabulā. Pelnu *AMP* uzrāda amplitūdu 1020–1480 °C (zemākā S granulām, augstākā BSG granulām), kas norāda uz atšķirīgu pelnu kušanas uzvedību un potenciāli atšķirīgu sakušņu veidošanās risku. *BD* variē 390–640 kg/m³ (zemākais CG granulām, augstākais W granulām), bet *DU* visiem paraugiem pārsniedz 91,7%, sasniedzot 97,8 % SH granulām. Tādējādi *DU* līmenis kopumā atbilst promocijas darbā definētai iekšējai robežai (90 %), savukārt *BD* un *AMP* atšķirības raksturo attiecīgi granulu praktisko izmantojamību un pelnu termiskās uzvedības riskus.

Lai novērtētu veidoto granulu atbilstību tirgū lietojamai kvalitātes klasifikācijai alternatīvās biomasas granulām, promocijas darba ietvaros veikts salīdzinājums ar LVS EN ISO 17225-6:2021 B klases prasībām, jo B klase nosaka minimālo kvalitātes līmeni un ļauj identificēt ierobežojošos rādītājus. Salīdzinājumā izmantotas šādas B klases prasības: *MC* < 15 % (no masas), *AC* < 10 % (no masas), *N* < 2 %, *S* < 0,3 %, Q_z^d > 14,5 MJ/kg, *BD* > 550 kg/m³ un *DU* > 96 %. Rezultāti parāda, ka pilnīga atbilstība visiem B klases kritērijiem ir tikai W granulām. Jāuzsver, ka B klases minimālā Q_z^d tiek izpildīta visiem paraugiem, t.i., galvenais ierobežojums nav siltumspēja, bet gan granulu fiziski-mehāniskā kvalitāte: R, S, H, BSG, CG un L neizpilda *DU* prasību, savukārt S, H, BH, SH, CG, L un G neizpilda *BD* prasību. BSG papildus neizpilda arī *N* un *S* prasības. *BD* var paaugstināt pirms presēšanas samazinot biomasas daļiņu izmēru, lai presēšanas laikā materiāls sablīvētos kompaktāk. *DU* var uzlabot, nosakot un uzturot optimālo presēšanas mitruma un temperatūras režīmu, nodrošinot korektu pēcapstrādi un ieviešot sijāšanu pēc ražošanas. Pie promocijas darbā laboratorijas apstākļiem un izmantotā aprīkojuma šo parametru paaugstināšana ir ierobežota, tomēr to ir iespējams sasniegt rūpnieciskajā mērogā, līdz ar ko visas pētāmās granulas potenciāli var būt pieprasīti tirgū kvalitātes uzlabošanas gadījumā.

Tabula 3.4.

Granulu tilpumblīvums, mehāniskā izturība un pelnu kušanas temperatūra (skaidrojumus sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

Granulu parauga veids	<i>AMP</i> , °C	<i>BD</i> , kg/m ³	<i>DU</i> , %
W	1295	640	96,9
R	1096	580	94,9
S	1020	520	92,9
H	1422	453	92,4
BH	1079	540	97,3
SH	1125	498	97,8
BSG	1480	570	92,1

Granulu parauga veids	AMP, °C	BD, kg/m ³	DU, %
CG	1102	390	91,7
L	1208	500	95,8
G	1128	520	96,0

Granulu paraugu sadedzināšanas testu rezultāti

3.5. tabulā apkopoti granulu degšanas testu rezultāti. ISA testos E_{ISA} variē 66,3–80,4 %, kur augstākā vērtība iegūta W un BSG granulām (80,4 % abos gadījumos), bet zemākā — SH granulām. Salīdzinājumā ar W granulām lielākajai daļai alternatīvās biomasas granulu E_{ISA} ir zemāka, kas norāda, ka vienādi katla iestatījumi ne visiem paraugiem nodrošina līdzvērtīgu siltumenerģijas transformācijas efektivitāti. CO koncentrācijas diapazons ir ļoti plašs (52–29 237 mg/Nm³), kas norāda uz būtiskām atšķirībām oksidācijas pilnīgumā starp paraugiem un uz kurināmā īpašību/padeves režīma ietekmi uz sadegšanas stabilitāti. NO_x līmenis variē 140–948 mg/Nm³ un augstākās vērtības sakrīt ar paraugiem ar paaugstinātu N saturu (īpaši BSG granulām). PM vērtības ir 21–211 mg/Nm³ robežās (zemākā W granulām, augstākā G granulām). Šie rezultāti kopumā apstiprina, ka alternatīvo granulu gadījumā emisiju profils ir būtiski heterogēnāks nekā W granulām.

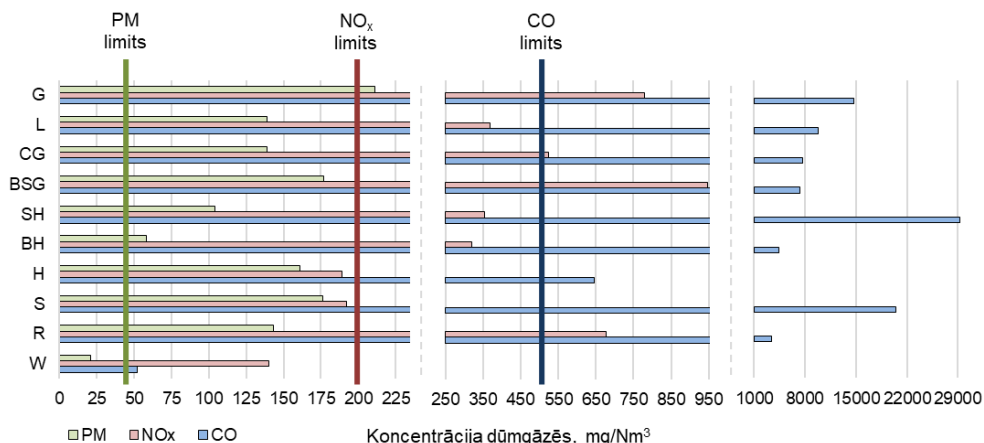
Tabula 3.5.

Granulu sadedzināšanas testu rezultāti (skaidrojumus sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

Granulu parauga veids	FT, °C	Q_{OUT} , kW	E_{ISA} , %	α , bezdīm.	O_2 , %	CO, mg/Nm ³	NO_x , mg/Nm ³	PM, mg/Nm ³
W	125	21,3	80,4	2,0	10,4	52	140	21
R	121	22,9	72,7	1,8	9,0	3421	677	143
S	109	18,3	68,0	2,1	10,8	20416	192	176
H	108	16,2	77,3	2,1	11,0	646	189	161
BH	97	16,6	78,4	2,0	10,6	4464	321	58
SH	81	17,7	66,3	1,9	9,7	29237	353	104
BSG	110	20,7	80,4	1,6	8,21	7288	948	177
CG	104	15,0	74,1	2,1	11,2	7648	525	139
L	100	17,5	70,5	2,0	10,5	9827	369	139
G	94	15,5	72,4	2,0	10,6	14750	780	211

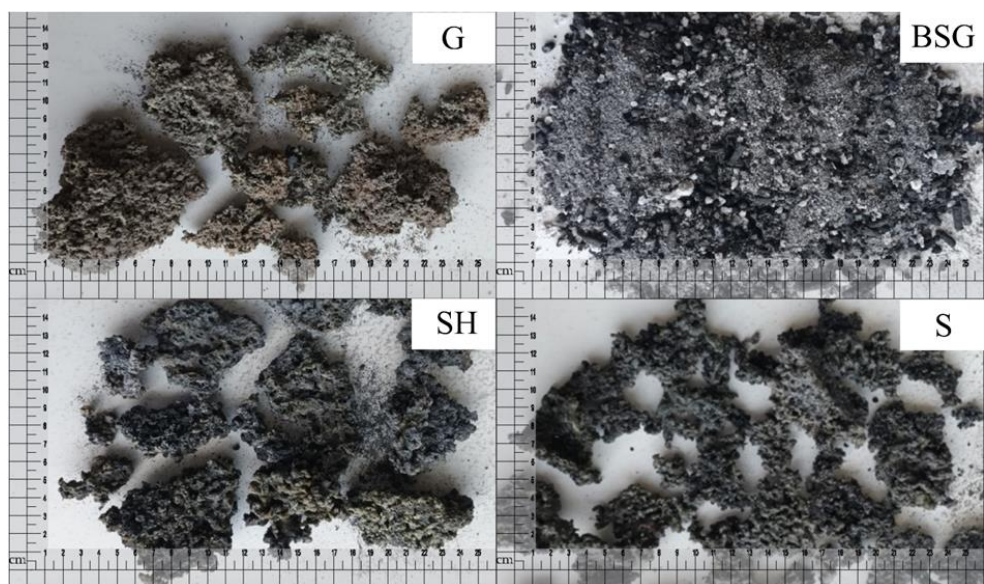
Saskaņā ar ekodizaina regulu, katliem ar siltuma jaudu > 20 kW minimālai E_{ISA} jābūt > 77 %, bet emisiju robežvērtības CO ir < 500 mg/Nm³, NO_x ir < 200 mg/Nm³ un PM ir < 40 mg/Nm³. Šajā pētījumā iegūtās ISA emisiju koncentrācijas parāda, ka pilnu atbilstību CO, NO_x un PM robežvērtībām nodrošina tikai W granulas (sk. 3.1. att.). Attiecībā uz minimālo katla efektivitāti, šo prasību izpilda W, H, BH un BSG granulas. Ņemot vērā, ka ekodizaina prasības ir formulētas pie rekomendētā kurināmā un citu kurināmo izmantošanas gadījumā attiecas tās pašas emisiju robežvērtības, iegūtie rezultāti tieši ilustrē galveno šķērslī alternatīvās biomasas granulu integrācijai mazas jaudas katlos — ir jāpanāk gan stabilāks degšanas režīms,

gan efektīvāka daļiņu kontrole, vienlaikus saglabājot katla efektivitāti prasību līmenī. Lai praktiski pietuvinātu alternatīvās biomasas granulas ekodizaina prasību izpildei un tādējādi potenciāli ļautu katlu ražotājiem tās norādīt kā rekomendēto kurināmo, nepieciešami mērķēti uzlabojumi degšanas procesa vadībā un dūmgāzu apstrādē.



3.1. attēls. Granulu sadedzināšanas emisiju salīdzinājums ar ekodizaina regulas līmeņatbilstīgi (skaidrojums sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

Pēc ISA sadedzināšanas testiem katls tika attīrīts no pelniem un sakušņiem, un iegūtie atlikumi tika vizuāli novērtēti. Izteiktākas atšķirības novērotas paraugiem, kuriem sadedzināšanas laikā bija problemātiskāka degšanas norise vai lielāks nesadegušās frakcijas un sakušņu daudzums (sk. 3.2. att.). Sakušņu veidošanās, pelnu sakupšana un nesadegušās daļiņas var ietekmēt gaisa piekļuvi degšanas zonā un kurināmā oksidācijas pilnīgumu, tādēļ šie novērojumi palīdz skaidrot atsevišķu paraugu augstākas *CO* koncentrācijas un zemāku katla efektivitāti. Vienlaikus vizuāli atšķirīgā pelnu krāsa, struktūra un trauslums norāda, ka pelnu sastāvs starp paraugiem būtiski atšķiras. Tāpēc vizuālais novērtējums izmantots kā pārejas posms uz turpmāko pelnu ķīmiskā sastāva un kristālisko fāžu analīzi.



3.2. attēls. Pēc granulu sadedzināšanas testiem iegūto pelnu un sakušņu piemērs atsevišķiem paraugiem

Granulu paraugu eksperimentālo datu regresijas analīzes rezultāti

Regresijas analīzē (sk. 2.2.5. apakšnodaļu) atkarīgie mainīgie bija parametri, kas raksturo degšanas procesu, savukārt neatkarīgie mainīgie bija kurināmā kvalitātes parametri. Granulu testēšanas laikā iegūtie dati tika izmantoti vairāku empīrisku prognozēšanas modeļu izveidei, aprēķinot atkarīgo mainīgo prognozētās vērtības un salīdzinot tās ar eksperimentāli iegūtajām vērtībām; par modeļu kvalitātes kritēriju tika izmantots R^2 . Tālākai analīzei promocijas darba autors atlasīja tikai tos modeļus, kuros R^2 bija augstāks par 0,7, jo pārējiem modeļiem sakarība starp aprēķinātajām un mērītajām vērtībām bija nepietiekama prognozēšanai. Vienlaikus modeļu struktūrā tika saglabāti tikai tie kurināmā parametri, kuriem šajā datu kopā bija būtiskākā ietekme uz atkarīgo mainīgo, bet parametri ar nenožīmīgu ietekmi tika izslēgti. Šāda mainīgo atlase apzināti virzīta uz modeļu vienkāršošanu, kas, neskatoties uz maksimāli sasniedzamo R^2 mazināšanos, kurā iekļauti visi potenciālie mainīgie, tomēr mērķis bija iegūt pēc iespējas vienkāršus empīriskus modeļus, kas saglabā pietiekamu prognozēšanas spēju praktiskai izmantošanai. Iegūtie empīriskie modeļi apkopoti 3.6. tabulā.

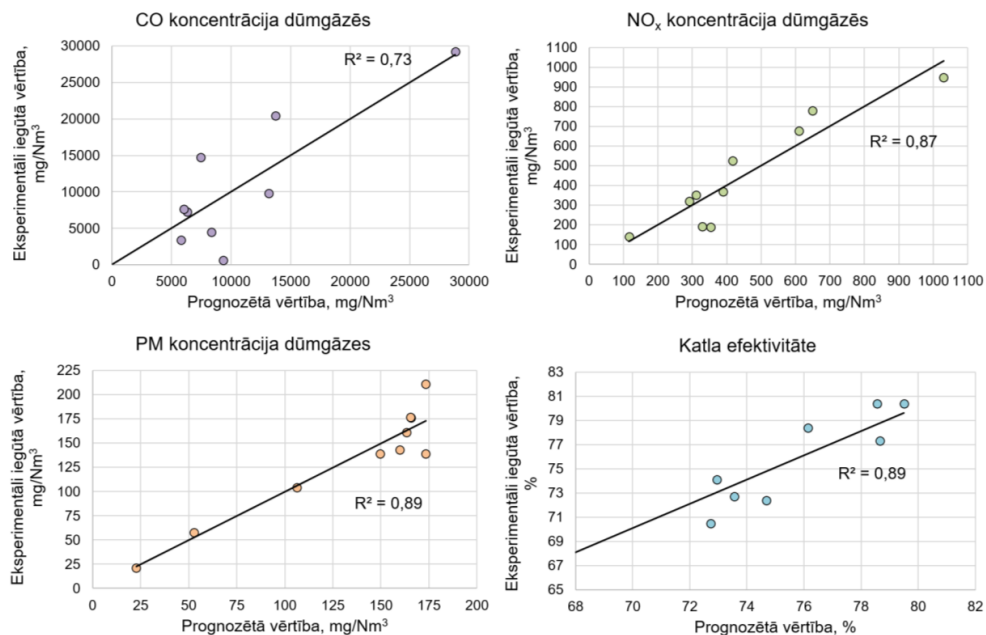
Tabula 3.6.

Sadedzināšanu raksturojošo mainīgo empīriskie modeļi (skaidrojums sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

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

Atkarīgais mainīgais	Empīriskais modelis	R ²
<i>PM</i>	$1393,91 - 112,38 \cdot \alpha + 22,72 \cdot AC - 0,11 \cdot AMP - 10,58 \cdot DU$	0,89
<i>E_{ISA}</i>	$-197,4 + 2,24 \cdot MC + 0,024 \cdot AMP + 1,81 \cdot DU + 0,473 \cdot FT$	0,89

Iegūto empīrisko modeļu prognozētā precizitāte tika novērtēta, salīdzinot katra atkarīgā mainīgā prognozētās vērtības ar eksperimentāli iegūtajām vērtībām. 3.3. attēlā parādītas izkliedes diagrammas, kur horizontālajā asī attēlotas prognozētās vērtības, bet vertikālajā asī eksperimentāli iegūtās vērtības. Attiecīgi, jo ciešāk punktu kopa izvietojas gar regresijas taisni, jo labāk modelis apraksta mērījumu variāciju attiecīgajam atkarīgajam mainīgajam. No attēlā redzamajiem R² lielumiem secināms, ka vislabākā atbilstība starp prognozētajām un mērītajām vērtībām iegūta NO_x modelim, kam seko PM un katla efektivitātes modelis, savukārt CO modelim atbilstība ir zemāka, kas saskan ar to, ka CO kā atkarīgais mainīgais ir jūtīgāks pret degšanas režīma svārstībām un procesiem, kurus šajā vienkāršotajā empīriskajā formā neaptver visi potenciāli ietekmējošie faktori.



3.3. attēls. Empīrisko modeļu validācija

Empīrisko modeļu interpretācijā jāņem vērā, ka regresijas analīze balstīta uz ierobežotu eksperimentālo datu kopu, kur katrs datu punkts atbilst vienam sagatavotam un sadedzinātam granulū paraugam. Tādēļ iegūtie vienādojumi nav uzskatāmi par universāliem prognozēšanas modeļiem visiem biomasas granulū veidiem, bet raksturo sakarības konkrētā pētījuma paraugu kopā. Modeļi ir piemērojami tikai tajās kurināmā kvalitātes un sadedzināšanas rādītāju robežās, ko aptver analizētie paraugi, un to izmantošanai ārpus šī diapazona būtu nepieciešami papildu eksperimenti.

Granulu paraugu pelnu ķīmiskās un struktūras analīzes rezultāti

Atbilstoši izstrādātajai metodoloģijai (sk. 2.2.4. apakšnodaļu), pēc ISA testiem iegūtajiem pelnu paraugiem tika veikta pelnu ķīmiskā analīze un kristālisko fāžu noteikšana, kombinējot ICP-OES un XRD pieejas, lai vienlaikus raksturotu pelnus pēc dominējošajiem oksīdiem un pēc kristāliskām formām, kurās šie elementi ir stabilizējušies pēc sadegšanas. 3.7. un 3.8. tabulās apkopotie rezultāti parāda, ka dažādu granulu pelni neveido vienu tipisku ķīmisko profilu, bet gan vairākas atšķirīgas kombinācijas. Šāds sadalījums ir nozīmīgs, jo tieši kristāliskās fāzes nosaka, vai pelni pēc sadegšanas uzvedas kā inerts materiāls, vai arī tie veido viegli kušanas sāļu maisījumus, kas praksē palielina nosēdumu, sakušņu un korozijas risku mazas jaudas katlos. Svarīgi pieminēt, ka oksīdu summa nav 100 %, jo apkopots dominējošo oksīdu kopums, bet daļa pelnu sastāva paliek ārpus šīs oksīdu grupas, kā arī daļa masas var būt saistīta ar analītiski nenoteikto komponenti un fāzēm, kas XRD griezumā izpaužas kā amorfā fāze. Tas nozīmē, ka dominējošos oksīdus ir jāinterpretē kā pelnu ķīmiskā karkasa sastāvu.

Tabula 3.7.

Granulu pelnu ķīmiskās analīzes rezultāti (skaidrojumus sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

Granulu parauga veids	W	R	S	H	BH	SH	BSG	CG	L	G
Domēns	C-MA	S-MA	S	CK	CK	CK	K	K	C	K-MA
Ķīmiskā formula/ Nosaukums	Ķīmisko elementu oksīdu daudzums paraugā, %									
Al ₂ O ₃ alumīnija oksīds	1,7	0,2	3,6	0,3	0,6	0,4	0,1	0,6	0,6	1,4
CaO kalcijs oksīds	21,2	6,3	5,1	28,0	14,3	12,8	7,7	19,2	34,6	12,8
Fe ₂ O ₃ dzelzs(III) oksīds	3,7	0,4	1,5	-	-	-	1,7	0,5	0,3	0,9
K ₂ O kālija oksīds	4,6	8,9	10,7	14,2	22,4	28,4	3,7	26,1	6,4	14,1
MgO magnija oksīds	5,9	2,5	2,1	6,6	13,9	7,3	9,3	5,0	4,5	5,4
MnO mangāna(II) oksīds	1,6	2,6	0,4	-	-	-	-	-	0,1	-
P ₂ O ₅ fosfora(V) oksīds	2,5	5,3	2,3	16,5	9,4	3,9	40,2	11,1	5,2	11,5
SO ₃ sēra(VI) oksīds	1,3	5,4	2,3	3,0	3,1	6,1	0,5	2,7	2,8	3,2
SiO ₂ silīcija dioksīds	29,2	52,4	53,7	9,4	1,7	2,4	17,2	17,1	17,2	32,8
Na ₂ O nātrijs oksīds	-	2,6	0,4	-	-	-	-	-	-	-
Kopā	72,7	84,6	82,0	78,6	67,7	62,7	82,1	83,1	72,4	83,0

Tabula 3.8.

Granulu pelnu kristālisko fāžu analīzes rezultāti (skaidrojumus sk. tabulā “DARBĀ
IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

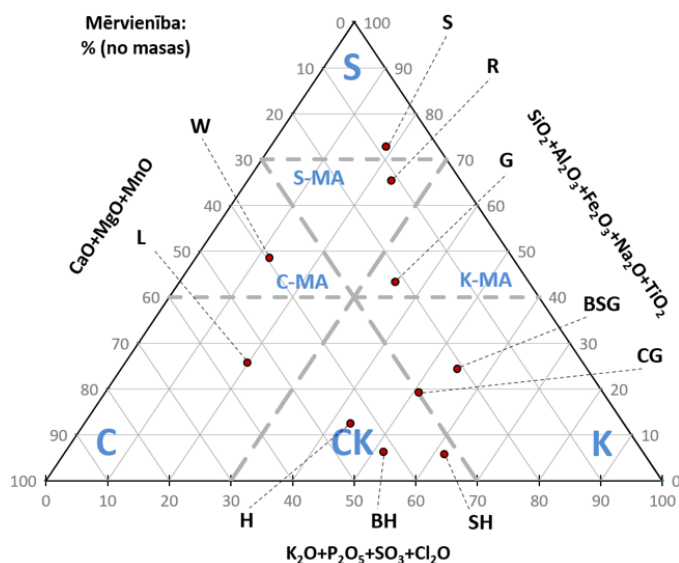
Granulu parauga veids	W	R	S	H	BH	SH	BSG	CG	L	G
Domēns	C- MA	S- MA	S	CK	CK	CK	K	K	C	K- MA
Ķīmiskā formula/ Nosaukums	Ķīmisko elementu oksīdu kristālisko fāžu īpatsvars paraugā, %									
CaCO ₃										
kalcija karbonāts (kalcīts)	65,8	-	6,4	44,4	13,1	22,3	-	5,6	72,7	16,5
SiO ₂										
silīcija dioksīds (kvarcs)	11,8	-	70,3	1,7	-	-	-	-	5,1	28,7
K ₂ SO ₄										
kālija sulfāts (arkanīts)	9,3	28,3	15,4	14,2	24,8	37,9	-	14,6	8,6	18,6
Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH)										
kalcija hidroksiapatīts (hidroksiapatīts)	13,1	-	-	39,7	16,1	5,9	-	28,7	13,6	19,9
K ₂ Ca(CO ₃) ₂										
kālija-kalcija karbonāts (ferčildīts)	-	-	-	-	46,0	33,9	-	22,4	-	-
KCl										
kālija hlorīds (silvīts)	-	26,7	7,9	-	-	-	-	0,9	-	6,3
γ-Ca ₃ (PO ₄) ₂										
gamma trikalcija fosfāts (tuīts)	-	-	-	-	-	-	-	27,8	-	10,0
(K,Na) ₃ Na(SO ₄) ₂										
kālija-nātrijs sulfāts (aftitalīts)	-	45,0	-	-	-	-	-	-	-	-
KAlSi ₂ O ₆										
kālija alumosilikāts (leucīts)	-	-	?	-	-	-	-	-	-	-
amorfā fāze (nekristāliskā daļa)	-	+	-	-	-	-	+	+	-	-

Padziļinātā interpretācija, sasaistot oksīdus un kristāliskās fāzes, parāda vairākas sistemātiskas sakarības un vienlaikus izskaidro, kāpēc vieniem paraugiem dominē sakušņu risks, bet citiem — *PM*. S granulu pelnu oksīdu sastāvā dominē silīcija dioksīds, un XRD griezumā dominē kvarcs, t.i., pelnu pamatmatrica ir termiski stabila silikātu kristāliska struktūra. Vienlaikus S pelnos parādās arkanīts un silvīts, kas nozīmē, ka daļa kālija pēc sadegšanas stabilizējas sāļu formā. Šīs sāļu fāzes ir būtiskas divu iemeslu dēļ: pirmkārt, dūmgāzu ceļā tās var pārnēsties un kondensēties vēsākās zonās, veidojot nogulsnes uz

siltummaiņa virsmām un palielinot *PM*, un, otrkārt, uz ārdiem un augstākas temperatūras zonās tās var veidot zemas kušanas eutektikas ar silikātu komponentēm (konkrēta divu vai vairāku komponentu proporcija, kurā maisījumam ir zemākā kušanas temperatūra salīdzinājumā ar atsevišķiem komponentiem), kas ir viens no tipiskajiem iemesliem zemākai *AMP* un agrākai pelnu deformācijas uzvedībai. R granulu pelnu paraugā oksīdu sastāvā dominē silīcija dioksīds, tomēr XRD griezumā kvarcs nav identificēts — tā vietā fiksēta amorfā jeb nekristāliskā fāze kopā ar sāļu fāzēm (arkanīts, silvīts un aftitalīts). Šāda kombinācija parasti ir ekspluatācijai nelabvēlīgāka nekā kvarca dominēta matrica, jo nekristāliska (stiklveida) frakcija mēdz būt reoloģiski aktīvāka un jutīgāka pret temperatūras un režīma svārstībām, kas palielina sakušņu veidošanās varbūtību uz ārdiem (kas ir saderīgi ar salīdzinoši zemāku *AMP*), vienlaikus saglabājot sāļu klātbūtni kā faktoru nogulsņēm un *PM* dūmgāzu ceļā. W un L granulu pelnu paraugiem oksīdu griezumā raksturīga izteikta kalcija sistēma, un XRD griezumā dominē kalcīts, t.i., kalcija sistēma pēc sadegšanas stabilizējas karbonātu formā. Šāda matrica parasti nozīmē mazāku sāļu frakcijas dominanci un līdz ar to zemāku nogulsnēšanās un *PM* pieauguma potenciālu dūmgāzu ceļā, kā arī zemāku saķepumu/sakušņu risku uz ārdiem, kas kopumā ir saskanīgi ar augstāku *AMP* salīdzinājumā ar kālija sāļu dominētajiem paraugiem. Kvarcs šeit parādās kā sekundāra fāze, t.i., silikātu komponents ir klātesošs, bet tas nedefinē pelnu uzvedību tik izteikti kā S gadījumā. BH, SH, CG un G granulu pelnu paraugiem oksīdu griezumā raksturīga augstāka kālija sistēmas ietekme un vienlaikus fosfora oksīda klātbūtne, un XRD griezumā tas izpaužas kā daudzfāžu komplekss. Šajā grupā konsekventi parādās arkanīts, bet BH, SH un CG gadījumā papildus identificēts ferčildīts, kas norāda uz jauktu karbonātu sistēmu un praksē ir saistāms ar paaugstinātu nogulsnēšanās un saķepuma risku (īpaši, ja katls darbojas ar režīma svārstībām un veidojas lokāli temperatūras maksimumi). CG un G gadījumā parādās fosfātu fāzes (hidroksiapatīts un tuīts), kas norāda, ka fosfors pelnos pēc sadegšanas ir stabilizējies fosfātu minerālformās. G paraugā vienlaikus identificēts arī kvarcs, kas kopā ar sāļiem un fosfātiem norāda uz viskompleksāko pelnu sistēmu šajā datu kopā, t.i., vienlaikus ir priekšnosacījumi gan *PM* veidošanās mehānismiem dūmgāzu ceļā, gan sakušņu veidošanās mehānismiem uz ārdiem, uz ko norāda salīdzinoši zema *AMP*. BSG pelnos oksīdu sastāva griezumā dominē fosfora oksīds, savukārt XRD rezultāti uzrāda amorfās fāzes klātbūtni, t.i., būtiska pelnu daļa ir nekristāliska. Ņemot vērā augsto *AMP*, saķepumu/sakušņu veidošanās risks šajā gadījumā ir vairāk saistīts ar nogulsnēšanās un režīma apstākļiem (piem., smalkās frakcijas uzkrāšanos un sāļu pārnesei), nevis ar agrīnu pelnu deformāciju.

3.4. attēlā ir redzams pētāmo granulu pelnu sadalījums Vasileva diagrammas domēnos, kas šajā darbā tiek izmantots kā pelnu sākotnējās klasifikācijas rīks turpmākai apsaimniekošanas virzienu izvērtēšanai. C tipa domēni, kuros ietilpst L (C) un W (C-MA), bet H, BH un SH (CK), raksturo pelnus ar izteiktāku kalcija sistēmas ietekmi. Šie pelni kopumā ir perspektīvāki materiālu sektora pielietojumiem (piem., minerālo saistvielu un pildvielu plūsmās), savukārt lauksaimnieciskā izmantošana ir vērtējama tikai pēc papildu atbilstības pārbaudēm, jo pielietojumu var ierobežot šķīstošo sāļu īpatsvars un piesārņojuma indikatori. CK apakšdomēna gadījumā jāņem vērā, ka kalcija sistēma ir kombinēta ar būtiskāku kālija/fosfora ietekmi, un tāpēc uz ārdiem var pieaugt sakušņu veidošanās risks pie lokāliem temperatūras maksimumiem. K tipa domēni ietver BSG (K) un CG (K), un G (K-MA) granulu

pelņus. Šie pelni ir saistīti ar izteiktāku kālija sistēmas ietekmi, un eksploataācijas ziņā tie parasti ir jutīgāki gan pret nogulsņējumu veidošanos konvekcijas zonās, gan pret sakušņu veidošanos uz ārdiem, īpaši režīma svārstību apstākļos. Pelnu izmantošanas kontekstā K tipa domēniem teorētiski ir augsts potenciāls lauksaimnieciskai atkārtotai izmantošanai kā K un P resursa avotam, tomēr praksē tas ir virziens ar augstām kvalitātes kontroles prasībām (piem., izskalošanās uzvedība, šķīstošo sāļu īpatsvars un piesārņojuma rādītāji). Ja lauksaimnieciskā izmantošana nav pamatota, šos pelņus ir lietderīgi vērtēt maisījumos vai materiālu sektorā pēc saderības izvērtējuma. S tipa domēni ietver S (S) un R (S-MA). Šī grupa raksturo silikātu orientētus pelņus, un turpmākajā izvērtējumā būtiskākais ir tas, vai silikātu sistēma ir kombinēta ar izteiktu sāļu komponenti vai nekristālisku frakciju, jo tieši šie faktori nosaka, cik izteikti praksē var būt nogulsņēšanās un sakušņu riski. Pelnu tālākās izmantošanas ziņā S tipa domēni primāri ir vērtējami silikātu materiālu virzienos (piem., stikla-keramikas un minerālo materiālu pielietojumi), savukārt lauksaimnieciskā izmantošana parasti nav prioritārais scenārijs, ja vien nav specifiska pamatojuma un atbilstības pierādījumu.



3.4. attēls. Granulu pelnu paraugu pozīcijas Vasileva diagrammā (skaidrojumus sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

3.1.2. Šķeldas maisījumu izpētes rezultāti

Šķeldas maisījumu kvalitātes analīzes rezultāti

Šajā apakšnodaļā apkopoti granulu paraugu kvalitātes un degšanas procesa rādītāji CSA testu ietvarā. Šķeldas maisījumiem MC ir būtiski augstāks (sk. 3.8. tabulu) un variē no 17,93 % līdz 52,05 % (zemākā WC3, augstākā WC2). Atsevišķos maisījumos MC samazinājumu ietekmēja būtiski sausākas alternatīvās biomasas vai koksnes atlikumu piedevas, tomēr kopumā šķeldas grupā mitruma saturs saglabājās augsts un tieši ietekmēja Q_z^d mitrai masai (sk. 3.9. tabulu). AC variē no 1,02 % līdz 6,20 % (zemākā WC1, augstākā WM3), bet VM saglabājās

73,7–83,1 % robežās, kas ir tuvu granulū paraugu līmenim. *FC* ir robežās no 15,9 % līdz 20,1 %.

Tabula 3.9.

Šķeldas maisījumu mitruma, pelnu, gaistošo organisko vielu un fiksētā oglekļa saturs (skaidrojumus sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

Parauga veids	<i>MC</i> ,	<i>AC</i> ,	<i>VM</i> ,	<i>FC</i> ,
	% no masas	% no masas	% no masas	% no masas
WC1	47,91	1,02	83,1	15,9
WC2	52,05	1,49	82,3	16,2
WC3	17,93	2,22	81,1	16,7
WR1	41,15	3,71	78,8	17,5
WR2	35,24	4,51	77,6	17,9
WM1	37,70	2,77	80,8	16,4
WM2	33,94	3,44	80,2	16,4
WM3	50,92	6,20	73,7	20,1
WM4	51,27	3,33	78,9	17,8

3.9. tabulā apkopotie CHNSO dati šķeldas maisījumiem uzrāda līdzīgu C līmeni (50,06–53,25 %), N saturs ir 1,00–2,05 % diapazonā. Q_z^d mitrai masai variē 7,6–14,8 MJ/kg, kur zemākās vērtības atbilst paraugiem ar augstāku *MC* (piem., WC2), bet augstākā vērtība konstatēta WC3 ar būtiski zemāku *MC*. Q_z^d sausai masai atšķirības ir nelielas (18,0–19,3 MJ/kg), kas norāda, ka enerģētiskā bāze sausā masā šķeldas maisījumiem ir salīdzināma, un galveno ietekmi uz mitrās masas enerģētisko kvalitāti rada *MC*.

Tabula 3.10.

Šķeldas maisījumu ķīmiskais sastāvs un sadegšanas siltums (skaidrojumus sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

Parauga veids	CHNSO					Q_z^d , MJ/kg		Q_a^d , MJ/kg
	C,	H,	N,	S,	O,	Mitrai masai	Sausai masai	
	%	%	%	%	%			
WC1	53,22	5,31	1,03	0,01	40,43	8,8	19,1	20,5
WC2	52,21	5,32	1,21	0,01	41,25	7,6	18,6	19,9
WC3	52,08	5,32	1,52	0,01	41,07	14,8	18,6	19,9
WR1	52,47	5,51	1,60	0,01	40,41	9,6	18,1	19,4
WR2	53,25	5,25	2,05	0,01	39,44	10,9	18,2	19,5
WM1	50,59	5,20	1,66	0,01	42,54	10,4	18,2	19,5
WM2	52,01	5,16	1,54	0,01	41,28	11,2	18,1	19,5
WM3	50,06	4,72	1,47	0,01	43,74	7,6	18,0	19,3
WM4	52,02	5,05	1,00	0,01	41,92	8,1	19,3	20,6

Šķeldas frakciju sadalījums (sk. 3.10. tabulu) parāda, ka paraugi būtiski atšķiras pēc rupjās frakcijas (> 31,5 mm) un smalkās frakcijas (< 3,15 mm) īpatsvara, kas ietekmē padeves un sadegšanas vienmērīgumu uz ārdiem. *BD* ir zems (109–240 kg/m³) un atšķiras starp

paraugiem; kopā ar frakciju sadalījumu tas raksturo kurināmā beramā slāņa īpašības un nepieciešamību paraugus homogenizēt pirms testa. *AMP* ir 1179–1353 °C robežās, t.i., kopumā tā pārsniedz tipiskās ārdu zonas vidējās temperatūras, tomēr *AMP* joprojām ir nozīmīga, jo katlā var veidoties lokāli temperatūras maksimumi, bet pelnu ķīmiskais sastāvs nosaka to deformācijas un sakušņu veidošanās iespējamību. Attiecīgi, sakušņu riska ziņā relatīvi nelabvēlīgākie ir paraugi ar zemāko *AMP* (piem., WM3), bet labvēlīgākie — ar augstāko (piem., WC3).

Tabula 3.11.

Šķeldas maisījumu tilpumbūvums, frakciju sadalījums un pelnu kušanas temperatūra (skaidrojumus sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

Parauga veids	<i>AMP</i> , °C	<i>BD</i> , kg/m ³	<i>PSD</i>				
			> 31.5 mm	< 31.5 mm > 16 mm	< 16 mm > 8 mm	< 8 mm > 3.15 mm	< 3.15 mm
WC1	1251	226	10,9	34,1	34,6	15,6	4,9
WC2	1265	240	3,9	26,7	40,9	19,9	8,5
WC3	1353	184	5,2	13,7	32,7	34,8	13,7
WR1	1198	174	12,9	52,0	11,5	12,3	11,3
WR2	1192	215	18,1	28,1	23,5	18,2	12,1
WM1	1179	133	5,1	24,2	24,9	26,3	19,5
WM2	1187	109	5,0	17,4	21,7	33,6	22,3
WM3	1133	216	12,9	52,0	11,5	12,3	11,3
WM4	1225	189	5,9	17,9	15,6	12,3	48,3

Šķeldas maisījumu sadedzināšanas testu rezultāti

CSA testos E_{CSA} variē 73,5–88,2 % diapazonā (sk. 3.11. tabulu), kur augstākā vērtība konstatēta WC3, bet zemākā — WM3. *CO* ir 288–8017 mg/Nm³ diapazonā; augstākās vērtības iegūtas WM3 un WM4 paraugiem, kuriem testa laikā bija zemāka katla sasniegtā jauda un mazāk labvēlīga sadegšanas norise. NO_x koncentrācija variē no 139 līdz 416 mg/Nm³, kur zemākās vērtības noteiktas WC2 un WM4, bet augstākās — WR2 un WR1. WR2 gadījumā augstākais NO_x līmenis sakrīt ar augstāko N saturu šķeldas paraugu grupā, tomēr kopumā NO_x izmaiņas jāvērtē kopā ar katla jaudu, gaisa padevi un degšanas temperatūru. *PM* vērtības ir 52–180 mg/Nm³ robežās, kur zemākā vērtība konstatēta WC3, bet augstākā — WM3. CSA testos novērots, ka *CO* un *PM* izmaiņas ir saistāmas ar *MC*, *AC* un *PSD*: paaugstināts *MC* samazina kurināmā praktisko enerģētisko vērtību un var pasliktināt sadegšanas norisi, *AC* palielina pelnu slodzi, bet *PSD* ietekmē kurināmā padevi un degšanu uz ārdiem.

Tabula 3.12.

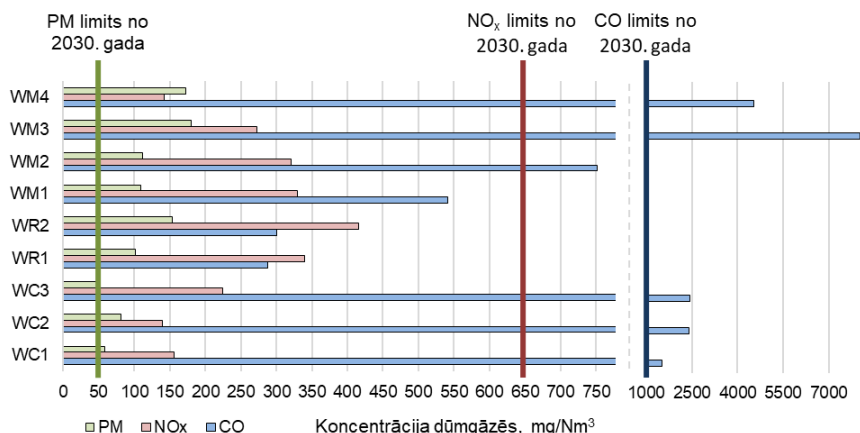
Šķeldas maisījumu sadedzināšanas testu rezultāti (skaidrojumus sk. tabulā “DARBĀ
IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

Parauga veids	FT, °C	Q_{OUT} , MW	E_{CSA} , %	α , bezdim.	O_2 , %	CO, mg/Nm ³	NO _x , mg/Nm ³	PM, mg/Nm ³
WC1	128	1,4	80,9	2,3	10,4	1526	156	59
WC2	123	1,0	79,7	2,3	9,6	2405	139	81
WC3	149	1,0	88,2	2,2	9,0	2453	224	52
WR1	123	0,9	84,1	2,1	10,5	288	340	102
WR2	132	1,1	85,4	1,9	9,9	301	416	153
WM1	136	0,8	83,2	2,0	11,1	542	329	109
WM2	144	0,9	82,0	1,8	11,6	752	321	112
WM3	120	0,7	73,5	1,8	11,8	8017	273	180
WM4	122	0,4	75,7	2,0	11,8	4541	142	172

Salīdzinājumā ar MK noteikumu Nr. 17 prasībām par gaisa piesārņojuma ierobežošanu no sadedzināšanas iekārtām, CSA eksperiments veikts 2 MW katlā, kas atbilst vidējas jaudas sadedzināšanas iekārtas kategorijai. Promocijas darbā CSA rezultātu salīdzināšanai izmantoti divi nosacījumi atkarībā no spēkā stāšanās perioda:

- līdz 2029. gada 31. decembrim esošām 1–10 MW cietā kurināmā iekārtām piemēro CO 2000 mg/Nm³, NO_x 600 mg/Nm³ un PM 1000 mg/Nm³;
- sākot ar 2030. gada 1. janvāri 1–5 MW iekārtām kļūst aktuālas stingrākas prasības, t.sk. CO 1000 mg/Nm³, NO_x 650 mg/Nm³ un PM 50 mg/Nm³.

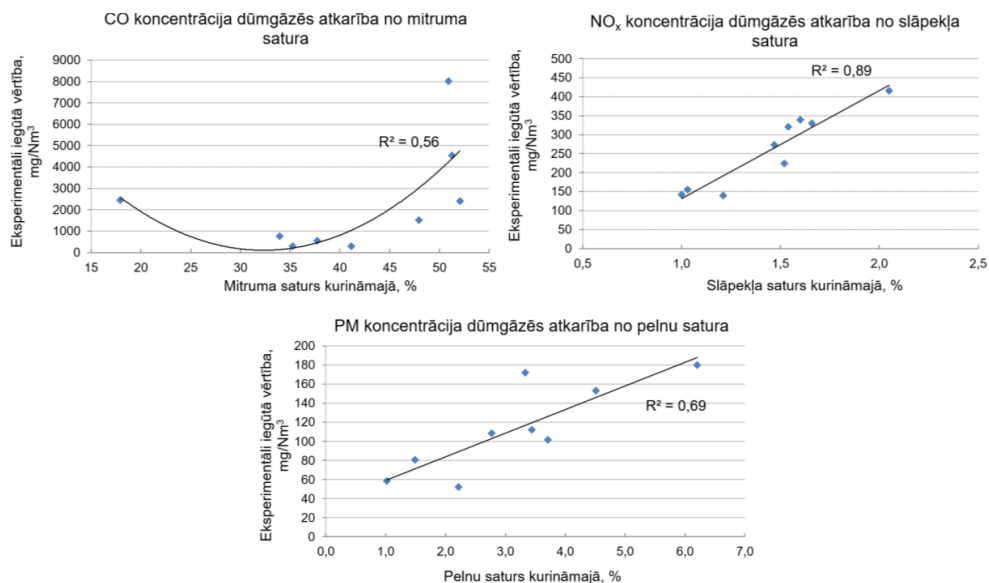
CSA testu rezultāti rāda, ka līdz 2029. gadam noteikto robežvērtību kontekstā būtiskākais neatbilstības risks ir CO. Vairums šķeldas maisījumu atbilst NO_x un PM robežvērtībām, tomēr atsevišķiem maisījumiem CO pārsniedz 2000 mg/Nm³ (WC2, WC3, WM3 un WM4), kamēr pārējie maisījumi (WC1, WR1, WR2, WM1 un WM2) šajā kritērijā iekļaujas. Savukārt salīdzinot ar nākotnes prasībām no 2030. gada (sk. 3.5. att.), nevienam no testētajiem maisījumiem PM neiekļaujas 50 mg/Nm³ robežā, un daļai maisījumu vienlaikus neatbilst arī CO (WC1, WC2, WC3, WM3 un WM4). Līdz ar to CSA rezultāti normatīvā skatījumā parāda divus atšķirīgus secinājumus: īstermiņā galvenais izaicinājums ir oksidācijas pilnīgums, bet ilgtermiņā par dominējošo ierobežojumu kļūst daļiņu emisijas, pat ja CO un NO_x līmenis daļā režīmu ir kontrolējams.



3.5. attēls. Šķeldas maisījumu sadedzināšanas emisiju salīdzinājums ar MK noteikumu Nr. 17 līmeņatzīmēm (skaidrojumus sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

Šķeldas maisījumu eksperimentālo datu regresijas analīzes rezultāti

Lai papildinātu CSA testu rezultātu interpretāciju, šķeldas maisījumu datu kopai tika veikta regresijas analīze, kur atkarīgie mainīgie bija degšanas procesu raksturojošie rādītāji, bet neatkarīgie mainīgie bija kurināmā kvalitātes parametri. NO_x gadījumā konstatēta cieša lineāra sakarība ar N saturu, kas nozīmē, ka šajā paraugu kopā NO_x variāciju pārsvarā izskaidro kurināmā slāpekļa saturs. PM gadījumā konstatēta izteikta lineāra sakarība ar AC , tādēļ šajā paraugu kopā pelnu saturs ir viens no galvenajiem cieto daļiņu emisiju skaidrojošajiem rādītājiem. CO gadījumā lineārā sakarība ar MC ir vāja, tāpēc pieņemts, ka CO reakcija pret mitrumu praksē var būt nelineāra — CO un MC sakarībai tika pārbaudīta nelineāra regresija, un otrās kārtas polinoma modelis uzlaboja sakarības aprakstu, t. i., CO izmaiņas nav monotoni izskaidrojamas ar MC visā apskatītajā diapazonā. Iegūtas R^2 vērtības ir redzamas 3.6. attēlā.



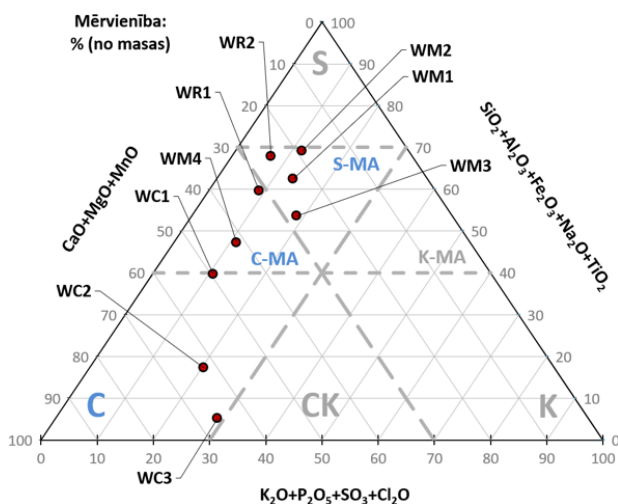
3.6. attēls. Sadedzināšanas emisiju korelācija ar kurināmā kvalitātes mainīgajiem

Praktiskā nozīmē iegūtās sakarības norāda uz galvenajiem šķeldas maisījumu uzlabošanas virzieniem. NO_x samazināšanai prioritāri jāizvairās no maisījumiem ar paaugstinātu N saturu, bet PM samazināšanai — no maisījumiem ar augstu AC . CO gadījumā tikai MC kontrole nav pietiekama, jo emisiju izmaiņas ietekmē arī frakciju sadalījums, padeves vienmērīgums un režīma stabilitāte. Tādēļ šķeldas maisījumu izmantošanā emisiju samazināšana jābalsta uz zemāku N un AC vērtību izvēli, kontrolētu MC un vienmērīgu kurināmā padevi ārdū katlā.

Šķeldas maisījumu pelnu ķīmiskās un struktūras analīzes rezultāti

CSA testu gadījumā šķeldas maisījumu pelniem netika veikta XRD analīze, jo galvenais uzdevums bija iegūt sākotnēju pamatu pelnu iespējamās izmantošanas virzienu izvērtēšanai. Šim nolūkam pietiekams ir oksīdu sastāvs un pelnu novietojums Vasileva diagrammas domēnos (sk. 3.7. att.), kas ļauj pelnus klasificēt pēc dominējošā oksīdu kompleksa un saistīt to ar tipiskām izmantošanas plūsmām. WC1, WC2 un WC3 atrodas C domēnā, WM4 un WR1 atrodas C-MA domēnā, bet WR2, WM1, WM2 un WM3 atrodas S-MA domēnā. Vienlaikus pelnu praktiska izmantošana Latvijā ir primāri juridisks jautājums, jo pēc noklusējuma pelni tiek uzskatīti par atkritumiem. To nosaka Atkritumu apsaimniekošanas likumā ietvertais atkritumu jēdziens, un praksē tas nozīmē, ka pelnu plūsmai ir piemērojamas atkritumu apsaimniekošanas prasības (uzskaitē, uzglabāšanā, nodošana atbilstošam apsaimniekotājam un pierādāmība pārbaudēs). Papildus pelnu statusa noteikšanai un klasifikācijai piemēro Ministru kabineta noteikumus Nr. 302, kuros ir ietverts atkritumu klasifikators un bīstamības īpašības, kā arī kritēriji blakusproduktiem un šo kritēriju piemērošanas kārtība. Līdz ar to pelnus var izmantot kā izejvielu citam procesam ārpus atkritumu plūsmas tikai tad, ja operatoram ir

pierādāms, ka turpmāka izmantošana ir skaidri paredzēta, pelnus var izmantot tieši bez papildu apstrādes ārpus parastās prakses, pelni rodas kā ražošanas procesa neatņemama daļa un paredzētais pielietojums ir tiesisks un nerada nelabvēlīgu ietekmi uz vidi vai cilvēku veselību. MK noteikumi Nr. 17 papildus nosaka prasības pelnu un citu cieto atlikumu uzglabāšanai sadedzināšanas iekārtas teritorijā, tostarp principu, ka pelnus nedrīkst uzglabāt pastāvīgi un tie jāuzglabā tā, lai neradītu gaisa, ūdens vai augsnes piesārņojumu, līdz ar to arī CSA kontekstā pelni jāuztver kā regulēta plūsma, nevis brīvi izmantojams materiāls. Sasaistot juridisko ietvaru ar Vasileva diagrammas rezultātiem, šajā pētījumā iegūtie pelni sākotnēji ir vērtējami šādi: C un C-MA domēna pelni (WC1, WC2, WC3, WM4, WR1) ir racionālāk virzāmi minerālo materiālu plūsmās kā izejvielu vai piedevu sastāvdaļa (piem., saistvielu un būvmateriālu virzieni), savukārt S-MA domēna pelni (WR2, WM1, WM2, WM3) ir racionālāk virzāmi silikātu orientētās materiālu plūsmās (piem., minerālie materiāli un noteikti ceļu būves risinājumi), pie nosacījuma, ka tiek nodrošināta tiesiski korekta pelnu statusa un kvalitātes pierādāmība atbilstoši izvēlētajam pielietojumam.



3.7. attēls. Šķeldas maisījumu pelnu paraugu pozīcijas Vasileva diagrammā

3.2. Biomasas kompleksās novērtēšanas rezultāti

Pētāmo granulu kompleksais novērtējums veikts, apvienojot trīs savstarpēji papildinošas pieejas: daudzkritēriju lēmumu analīzi, aprites cikla ietekmes novērtējumu un SEG emisiju ietaupījuma novērtējumu. Daudzkritēriju lēmumu analīze izmantota tehnisko-sociālo kritēriju salīdzināšanai, aprites cikla ietekmes novērtējums ļāva noteikt granulu kopējo ietekmi uz vidi visā to ražošanas un izmantošanas ķēdē, savukārt SEG emisiju ietaupījuma novērtējums izmantots granulu ilgtspējas interpretācijai fosilā etalona kontekstā. Šāda pieeja ļauj vienus un tos pašus granulu paraugus vērtēt no dažādiem skatupunktiem: praktiskās izmantojamības, vides ietekmes un ilgtspējas prasību izpildes.

3.2.1. Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas analīzes rezultāti

Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas analīze veikta atbilstoši 2.2.6. apakšnodaļā aprakstītajai metodoloģijai. 3.13. tabulā apkopota MCDA lēmumu matrica, kurā iekļauti gan granulu eksperimentālajā izpētē iegūtie tehniskie kritēriji, gan ekspertu un lietotāju aptaujā noteiktās kvalitatīvo kritēriju vērtības un kritēriju svāri. Aptauja tika veikta *Google Forms* vidē, un tajā piedalījās 11 respondenti vecuma grupā no 20 līdz 60 gadiem. Respondenti bija semināra-diskusijas “Granulu apkures ABC. Praktiskas atziņas un inovatīvie risinājumi” dalībnieki, kas bija saistīti ar granulu aprites ciklu no lietotāja, ražošanas, piegādes, pētniecības vai apkures tehnoloģiju praktiskās izmantošanas skatpunkta. No visiem respondentiem 5 pārstāvēja kādu no granulu ražošanas un izmantošanas ķēdē iesaistītajiem uzņēmējdarbības veidiem. K10-K15 kritēriju vērtības iegūtas, aprēķinot respondentu sniegto vērtējumu vidējo aritmētisko vērtību, savukārt kritēriju svāri iegūti, vidējās aritmētiskās vērtības attiecinot pret kopējo kritēriju skaitu un normalizējot kopsummu līdz “1”.

Tabula 3.13.

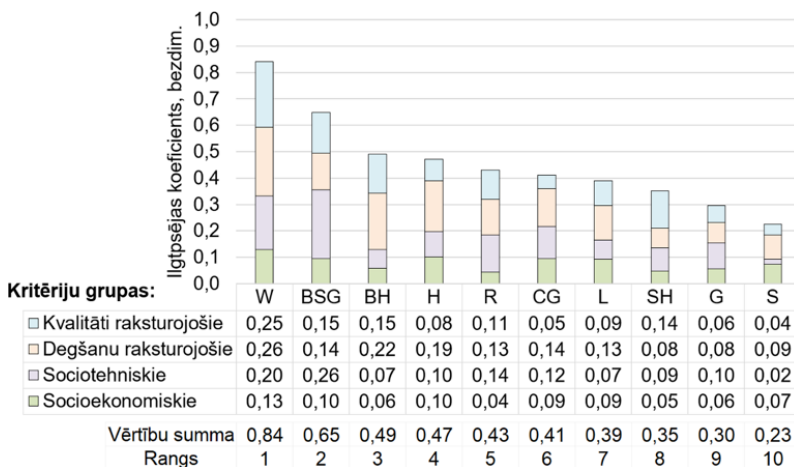
MCDA lēmumu matrica granulu tehniski-sociālajam novērtējumam (skaidrojumus sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

Kritērijs	Mērvienība	Svars	Alternatīva (granulu parauga veids)									
			W	R	S	H	BH	SH	BSG	CG	L	G
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
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

MCDA rezultāti pēc vienkāršās pieejas (WSM)

WSM-AHP rezultāti apakšskategoriju griezumā (sk. 3.8. att.) parāda, ka W granulas ieņem 1. vietu ar kopējo vērtību 0,84, jo tām ir augstākais ieguldījums gan kvalitāti raksturojošajos kritērijos (0,25), gan degšanu raksturojošajos kritērijos (0,26), kā arī salīdzinoši augstas socio-ekonomisko (0,13) un socio-tehnisko (0,20) kritēriju vērtības. BSG granulas ieņem 2. vietu ar kopējo vērtību 0,65; šajā gadījumā rezultātu būtiski paaugstina socio-tehnisko kritēriju grupa (0,26), kas ir augstākā vērtība starp visām alternatīvām. BH granulas ieņem 3. vietu ar kopējo

vērtību 0,49, galvenokārt pateicoties degšanu raksturojošo kritēriju ieguldījumam (0,22), savukārt H granulas ar kopējo vērtību 0,47 ieņem 4. vietu, kur nozīmīgākais pienesums arī ir degšanu raksturojošajai grupai (0,19). R, CG un L granulas veido vidējo rangu grupu ar kopējām vērtībām attiecīgi 0,43, 0,41 un 0,39, kur neviena apakš kategorija nav izteikti dominējoša. SH granulas, neskatoties uz salīdzinoši augstu kvalitāti raksturojošo kritēriju vērtību (0,14), ieņem 8. vietu, jo degšanu raksturojošo (0,08) un socio-ekonomisko (0,05) kritēriju ieguldījums ir zems. Zemākās kopējās vērtības iegūtas G un S granulām (attiecīgi 0,30 un 0,23), kas saistīts ar zemu ieguldījumu vairākās apakš kategorijās vienlaikus.



3.8. attēls. Granulu tehniski-sociālā novērtējuma ar WSM-AHP rezultāti (skaidrojums sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

Šāds rezultātu sadalījums parāda, ka WSM-AHP rangs nav atkarīgs tikai no granulu kvalitātes rādītājiem. Augstāko vietu iegūst alternatīva, kurai nav izteikti vājas apakš kategorijas, kā tas redzams W granulu gadījumā. Savukārt BSG granulu piemērs parāda WSM pieejas kompensējošo raksturu: zemāku degšanas rādītāju ietekmi daļēji kompensē labvēlīgi socio-tehniskie kritēriji. Pretēja situācija redzama BH un H granulām, kuru pozīciju galvenokārt nosaka degšanu raksturojošie kritēriji, nevis socio-tehniskā priekšrocība. Tādēļ WSM-AHP rezultāti interpretējami kā kompromisa rangs, kurā augstu vietu var nodrošināt atšķirīgs apakš kategoriju līdzsvars. Praktiskā lēmumu pieņemšanā tas nozīmē, ka augsts WSM-AHP rangs vēl nenozīmē vienādi labu sniegumu visos kritēriju blokos; īpaši jāvērtē, vai zemāks sniegums degšanas, emisiju vai ekspluatācijas kritērijos ir pieļaujams konkrētajā izmantošanas scenārijā.

MCDA rezultāti pēc padziļinātās pieejas (MULTIMOORA)

MULTIMOORA-AHP rezultāti nodrošina alternatīvu salīdzinājumu trīs atšķirīgos novērtēšanas skatījumos: attiecību sistēmā, atsaucē punkta pieejā un pilnajā reizināšanas formā, pēc tam apvienojot rangu informāciju kopējā vērtējumā. Šādas struktūras galvenā priekšrocība ir tā, ka rezultātu interpretācijā iespējams nošķirt alternatīvas, kuras ir noturīgi

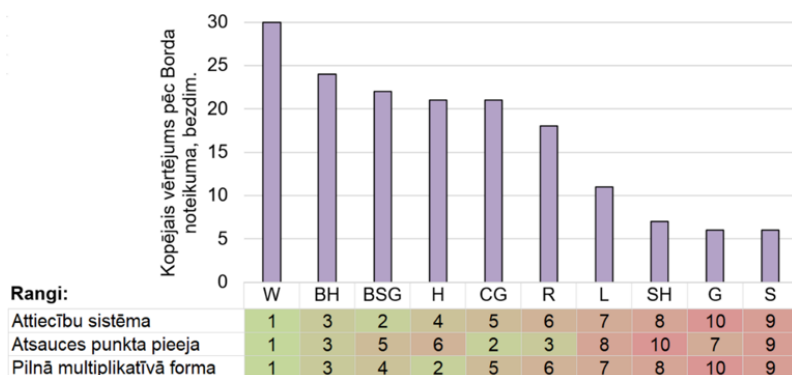
labas neatkarīgi no novērtēšanas loģikas, no alternatīvām, kuru pozīcija būtiski mainās atkarībā no tā, vai priekšroka tiek dota kopējai summēšanai, attālumam līdz labākajām vērtībām, vai stingrākai pieejai, kur vāji rādītāji spēcīgi samazina kopējo rezultātu. MULTIMOORA-AHP ranžējums tika iegūts, apvienojot trīs neatkarīgas izvērtēšanas formas un pēc tam konsolidējot to secību ar Borda noteikuma principu (sk. 3.14. tabulu).

Tabula 3.14.

MULTIMOORA-AHP rezultāti (skaidrojumus sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

Granulu parauga veids	Attiecību sistēma		Atsauces punkta pieeja		Pilnā multiplikatīvā forma		Borda noteikuma vērtējums		
	Y_i	Rangs	R_i	Rangs	U_i	Rangs	B_i	1. un 2. vietu skaits	9. un 10. vietu skaits
W	0,018	1	0,010	1	322,5099	1	30	3	0
R	-0,086	6	0,021	3	0,0023	6	18	0	0
S	-0,131	9	0,033	9	0,0003	9	6	0	3
H	-0,068	4	0,027	6	0,0468	2	21	1	0
BH	-0,063	3	0,021	3	0,0143	3	24	0	0
SH	-0,122	8	0,047	10	0,0004	8	7	0	1
BSG	-0,057	2	0,026	5	0,0125	4	22	1	0
CG	-0,079	5	0,017	2	0,0024	5	21	1	0
L	-0,099	7	0,030	8	0,0011	7	11	0	0
G	-0,138	10	0,029	7	0,0001	10	6	0	2

3.14. tabulas un 3.9. attēla rezultāti parāda, ka W granulas ieņem 1. vietu visās trīs apakšmetodēs un iegūst maksimālo Borda noteikuma vērtējumu 30. BH granulas iegūst 24 punktus un visās trīs apakšmetodēs saglabā 3. vietu, kas norāda uz vienmērīgu rezultātu neatkarīgi no aprēķina pieejas. BSG granulas iegūst 22 punktus, ieņemot 2. vietu attiecību sistēmā, 5. vietu atsaucē punkta pieejā un 4. vietu pilnajā multiplikatīvajā formā. H un CG granulas iegūst vienādu Borda vērtējumu (21 punktu), tomēr to rezultātu struktūra ir atšķirīga: H granulas augstāko vietu iegūst pilnajā multiplikatīvajā formā (2. vieta), savukārt CG granulas — atsaucē punkta pieejā (2. vieta). R granulas iegūst 18 punktus un ieņem vidēju pozīciju visās apakšmetodēs. Zemākajā grupā atrodas L, SH, G un S granulas ar Borda vērtējumiem attiecīgi 11, 7, 6 un 6. G un S granulām ir vienāds kopējais Borda vērtējums, tomēr G granulas attēlā novietotas augstāk, jo vienā no apakšmetodēm tās sasniedz 7. vietu, kamēr S granulas visās trīs apakšmetodēs paliek 9. vietā.



3.9. attēls. Granulu tehniski-sociālā novērtējuma ar MULTIMOORA-AHP rezultāti (skaidrojumus sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

MULTIMOORA-AHP rezultāti parāda, ka augsts kopējais vērtējums var veidoties dažādos veidos. W granulu gadījumā augstākais rangs visās trīs apakšmetodēs nozīmē, ka šī alternatīva saglabā labāko pozīciju neatkarīgi no aprēķina loģikas. Līdzīga, lai gan zemāka līmeņa, stabilitāte redzama BH granulām, kuras visās apakšmetodēs ieņem 3. vietu. Savukārt BSG, H un CG granulu pozīcijas mainās atkarībā no apakšmetodes: BSG labāk izskatās attiecību sistēmā, H — pilnajā multiplikatīvajā formā, bet CG — atsauces punkta pieejā. Tas nozīmē, ka šo alternatīvu vērtējums ir vairāk atkarīgs no tā, vai priekšroka tiek dota kopējam līdzsvaram, tuvumam labākajām vērtībām vai vāju kritēriju stingrākai ietekmei uz gala rezultātu. No praktiskās interpretācijas skatupunkta stabila pozīcija vairākās apakšmetodēs ir nozīmīgāka nekā augsta vieta tikai vienā no tām. Tāpēc W granulas ir skaidrs references variants, bet BH granulas var uzskatīt par stabilāko alternatīvu aiz W granulām. BSG, H un CG granulas uzrāda atsevišķas priekšrocības, tomēr to pozīciju maiņa starp apakšmetodēm norāda, ka šo granulu piemērotība ir vairāk atkarīga no konkrētā lēmuma prioritātēm. Zemākās pozīcijas S un G granulām savukārt parāda, ka vairākās kritēriju grupās vienlaikus pastāv ierobežojumi, kurus nevar kompensēt ar atsevišķiem labākiem rādītājiem.

3.2.2. Aprites cikla ietekmes novērtējuma rezultāti

LCA veikta atbilstoši metodoloģijas 2.2.7. apakšnodaļai. Novērtējums veikts “SimaPro 10.2” programmatūras vidē, izmantojot “ReCiPe 2016 Endpoint (H) V1.09 / World (2010) H/A” metodi. Rezultāti attiecināti uz funkcionālo vienību — 1 MWh siltumenerģijas, kas iegūta granulu sadedzināšanas rezultātā. Sistēmas robežas definētas kā “no šūpuļa līdz kapam”, kur alternatīvās biomasas gadījumā “šūpulis” ir nepieciešamā materiāla savākšana vai tā nonākšana pieejamā izejvielu plūsmā, bet “kaps” — granulu sadedzināšana ISA katlā un ar šo posmu saistīto emisiju un pelnu apsaimniekošanas iekļaušana modelī. Datu inventarizācija ir pieejama tiešsaistē kā papildmateriāls publicētajam zinātniskajam rakstam ⁴⁴², kurā aprobēta promocijas darbā pielietotā LCA metode.

3.15. tabulā apkopoti kopējās ietekmes uz vidi rezultāti pa procesiem katram pētītajam granulu parauga veidam. Rezultāti izteikti ekopunktos, kur lielāka vērtība nozīmē lielāku

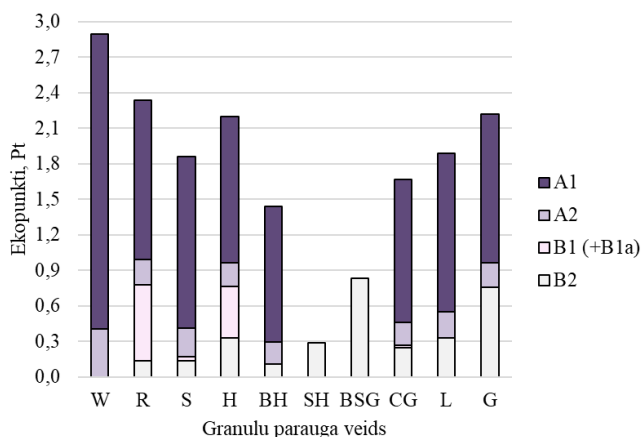
kopējo ietekmi uz vidi. Posmu griezumā savākšanas posmā lielākā ietekme konstatēta W granulām (2,90 Pt), bet mazākā — SH granulām (0,29 Pt). Ražošanas posmā lielākā ietekme konstatēta G granulām (4,66 Pt), bet mazākā — SH granulām (1,30 Pt). Sadedzināšanas posmā lielākā ietekme konstatēta BSG granulām (5,22 Pt), bet mazākā — W granulām (1,21 Pt).

Tabula 3.15.

Aprites cikla analīzes rezultāti ekopunktos (Pt) (skaidrojumus sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

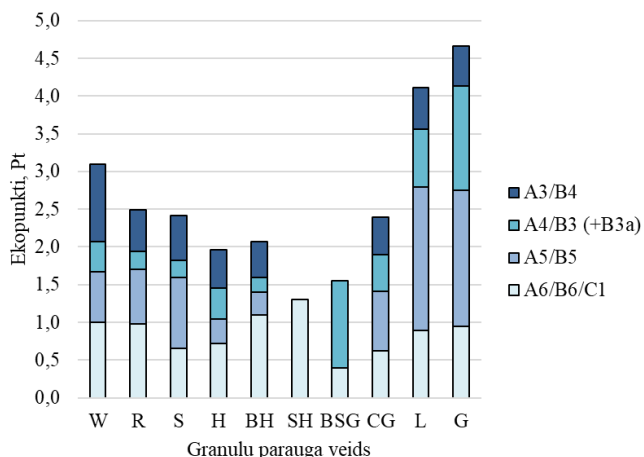
Granulu parauga veids	Savākšanas posma procesi				Ražošanas posma procesi				Sadedzināšanas posma procesi	
	A1	B1 (+B1a)	A2	B2	A3/B4	A4/B3 (+B3a)	A5/B5	A6/B6/C1	A7/B7/C2	A8/B8/C3
W	2,49	-	0,41	-	1,02	0,41	0,66	1,00	0,21	1,00
R	1,34	0,64	0,22	0,13	0,55	0,24	0,72	0,98	0,25	3,60
S	1,45	0,04	0,24	0,13	0,59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

Savākšanas posmā ietekmes struktūru nosaka tas, vai parauga piegādes ķēdē ir iekļauta koksnes plūsma (sk. 3.10. att.). Paraugos W, R, S, H, BH, CG, L un G savākšanas posmā lielāko ieguldījumu veido A1 (koksnes izejvielu savākšana), un līdz ar to savākšanas posma atšķirības starp šiem paraugiem ir primāri saistītas ar A1 intensitāti, nevis ar transportu uz ražotni (A2/B2). Pretējā gadījumā, kad paraugs balstās tikai uz alternatīvās biomasas plūsmu, savākšanas posmā dominē B2 (biomasas transportēšana uz ražotni) — to parāda SH un BSG, kur savākšanas posma profils ir loģistikas vadīts. Šī atšķirība ir būtiska interpretācijā: A1 dominējoša loma nozīmē, ka kopējā ietekme kļūst jutīga pret pieņēmumiem par izejvielas ieguves/audzēšanas posmu, savukārt B2 dominējoša loma pārbīda jutību uz transporta attālumu un kravas organizāciju.



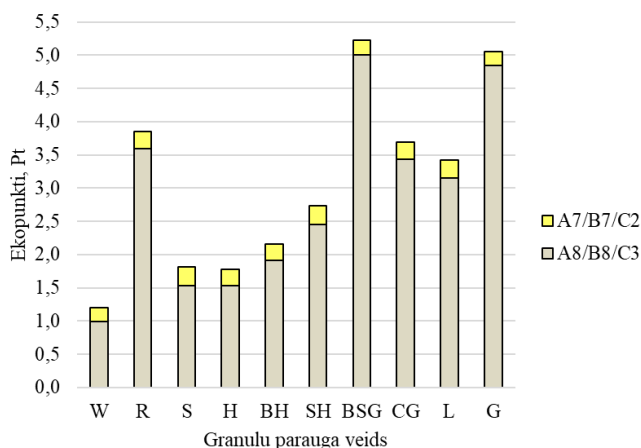
3.10. attēls. Savākšanas posmā iekļauto procesu kopējā ietekme uz vidi (skaidrojumus sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

Ražošanas posmā nav viena procesa, kas visiem paraugiem būtu noteicošais (sk. 3.11. att.). Ietekmes avots pārvietojas starp mehānisko sagatavošanu, žāvēšanu un granulēšanu, un šī atšķirība arī izskaidro, kāpēc ražošanas posma ietekme dažiem paraugiem ir salīdzinoši zema, bet citiem kļūst par vienu no galvenajiem kopējā profila komponentiem. W gadījumā ražošanas posmā lielāko ietekmi veido šķeldošana (A3) un granulēšana (A6). R, H, BH un SH gadījumā ražošanas posmā lielāko ietekmi veido granulēšana (B6/C1). Šeit ražošanas posma lielākā ietekme veidojas granulēšanā. S, CG, L un G gadījumā ražošanas posmā lielāko ietekmi veido malšana (A5/B5). Īpaši L un G parāda, ka ražošanas posms šiem paraugiem kļūst energoietilpīgs tieši mehāniskās sagatavošanas dēļ. BSG gadījumā ražošanas posmā lielāko ietekmi veido žāvēšana (A4/B3).



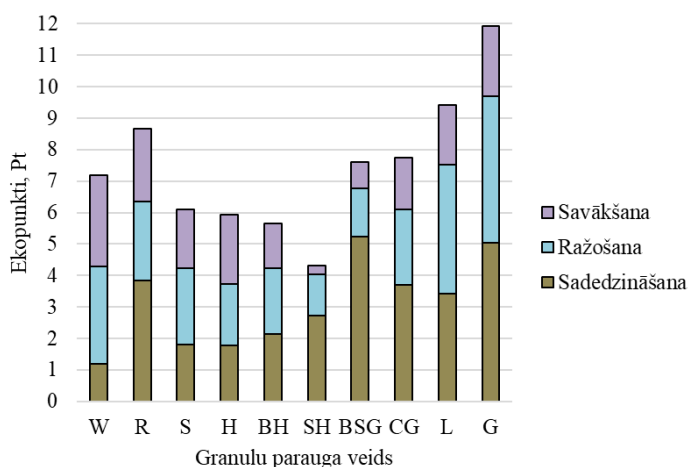
3.11. attēls. Ražošanas posmā iekļauto procesu kopējā ietekme uz vidi (skaidrojumus sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

Sadedzināšanas posmā ietekmes struktūra visiem paraugiem ir vienāda (sk. 3.12. att.): posma rezultātu nosaka A8/B8/C3 (granulu sadegšana), bet A7/B7/C2 (granulu transportēšana uz izplatītāju un patērētāju) ir process salīdzinoši nelielu variāciju starp paraugiem. Līdz ar to sadedzināšanas posma atšķirības starp paraugiem primāri raksturo sadegšanas procesa ietekmes intensitāti, nevis transporta posmu. Vislielāko sadedzināšanas posma ietekmi uzrāda BSG un G granulas, kam seko R, CG un L granulas. Vidējā līmenī atrodas SH un BH granulas, savukārt viszemākās vērtības ir W granulām, kā arī S un H granulām.



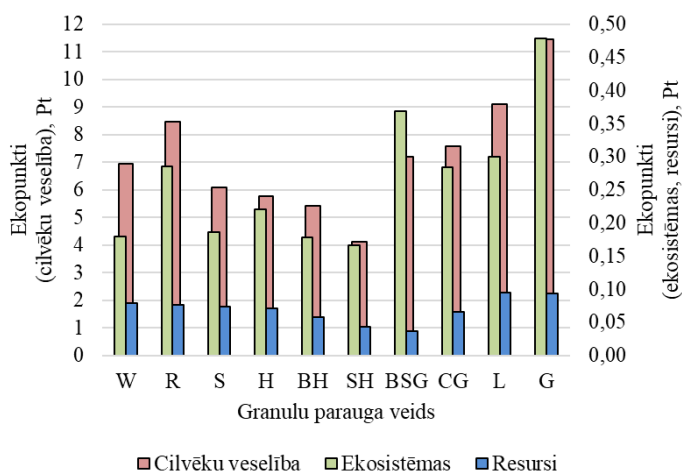
3.12. attēls. Sadedzināšanas posmā iekļauto procesu kopējā ietekme uz vidi (skaidrojumus sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

Kopējās ietekmes gadījumā konstatēts, ka S, H, BH un SH granulām ir mazāka ietekme uz vidi (sk. 3.13. att.), kas pierāda alternatīvās biomasas granulu konkurētspēju no vides ietekmes viedokļa salīdzinājumā ar W granulām.



3.13. attēls. Granulu aprites cikla posmu kopējā ietekme uz vidi (skaidrojumus sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

LCA metodika paredz rezultātu apkopošanu “ReCiPe 2016 Endpoint (H) V1.09 / World (2010) H/A” aizsargājamajās jomās — cilvēku veselība, ekosistēmu kvalitāte un resursu pieejamība (sk. 3.14. att.), jo šāds rezultātu formāts ir tieši izmantojams alternatīvu salīdzināšanai lēmumu pieņemšanas līmenī. Cilvēku veselības aizsargājamajā jomā zemākais rezultāts ir SH granulām, bet augstākais — G granulām. L atrodas starp augstākajiem rezultātiem, savukārt BH un H granulām — starp zemākajiem. Ekosistēmu kvalitātes aizsargājamajā jomā zemākais rezultāts atkal ir SH granulām, bet augstākais — G granulām. BSG šajā jomā ir starp augstākajiem rezultātiem, kas norāda uz izteiktu ietekmi ekosistēmu dimensijā. Resursu pieejamības aizsargājamajā jomā zemākais rezultāts ir SH un BSG granulām, bet augstākais — L un G granulām. Kopējā ranžējuma struktūra ir konsekventa diviem paraugiem: SH granulām visās aizsargājamajās jomās uzrāda zemāko, bet G granulām — augstāko ietekmi.

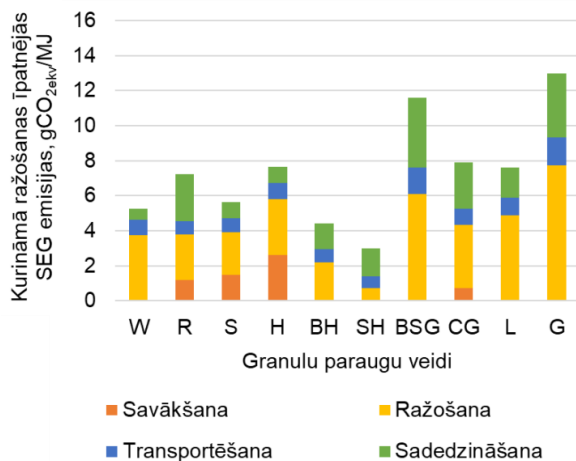


3.14. attēls. Granulu aprites cikla posmu kopējā ietekme uz cilvēku veselību, ekosistēmām un resursiem (skaidrojums sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

3.2.3. Ilgtspējas novērtējuma rezultāti

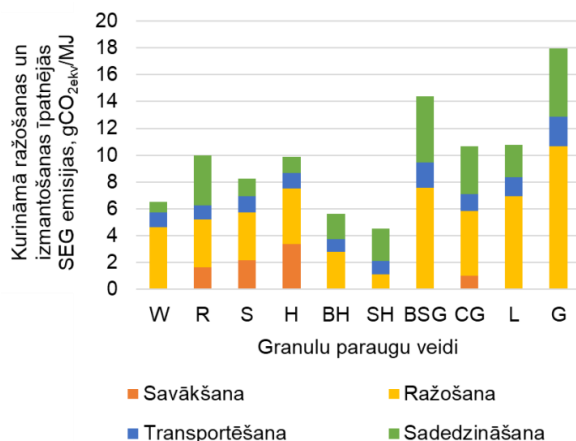
Pielietojot metodoloģijas 2.2.8. apakšnodaļā aprakstīto pieeju, kas ir promocijas darba autora uzlabotā un papildinātā metode uz RED II aprēķinu bāzes, tika iegūti rezultāti par pētāmo granulu īpatnējām SEG emisijām četros aprites cikla posmos (savākšana, ražošana, transportēšana un sadedzināšana) pirms un pēc enerģijas transformācijas siltumenerģijā ar sadedzināšanas iekārtu, kā arī aprēķināts īpatnējo SEG emisiju ietaupījums pret fosilo etalonu, kas, saskaņā ar RED II, sastāda 80 gCO_{2ekv}/MJ. 3.15. attēlā redzamas īpatnējo SEG emisiju vērtības katrā posmā pirms enerģijas transformācijas. Mazākā vērtība ir iegūta SH granulām (3,00 gCO_{2ekv}/MJ), savukārt lielākā ir G granulām (12,99 gCO_{2ekv}/MJ). Visām granulām lielāko daļu veido ražošanas emisijas enerģijas patērējošo tehnoloģisko procesu dēļ. Tā, piem., ir iespējams novērst emisijas no žāvēšanas nodrošinot dabisko žāvēšanu, tomēr, ņemot vērā tehnoloģisko procesu savstarpējo atkarību materiālu plūsmā, racionālāks variants ir uzlabot

esošā žāvēšanas procesa energoefektivitāti. Līdzīgi paņēmieni var tikt īstenoti ar elektroenerģiju patērējošiem procesiem.



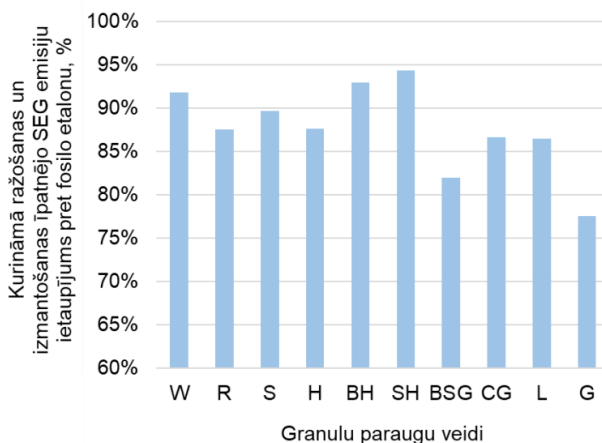
3.15. attēls. Īpatnējās SEG emisijas no granulu aprites cikla posmiem pirms enerģijas transformācijas (skaidrojumus sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

Lai salīdzinātu īpatnējās SEG emisijas ar fosilo etalonu, nepieciešams attiecināt īpatnējās SEG emisijas pret sadedzināšanas iekārtas efektivitāti atbilstoši vienādojumam (2.42.). Promocijas darbā aprēķinā izmantotas eksperimentāli iegūtas vērtības (sk. 3.5. tabulu). Arī šajā gadījumā mazākās īpatnējās SEG emisijas ir SH granulām (4,53 gCO_{2ekv}/MJ) un lielākās ir G granulām (17,94 gCO_{2ekv}/MJ) (sk. 3.16. att.).



3.16. attēls. Īpatnējās SEG emisijas no granulu aprites cikla posmiem attiecinot pret sadedzināšanas iekārtas efektivitāti (skaidrojumus sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

3.17. attēlā ir redzams īpatnējo SEG emisiju pēc enerģijas transformācijas ietaupījums, kas iegūts veicot aprēķinu atbilstoši vienādojumam (2.41). Vislielākais samazinājums, attiecīgi, sasniedzams izmantojot SH granulas (94 %) un mazākais — G granulas (78 %). Plašāks salīdzinājums ar RED II noklusējuma vērtībām un iegūto rezultātu analīze ir pieejama zemāk (sk. 3.25. att.).

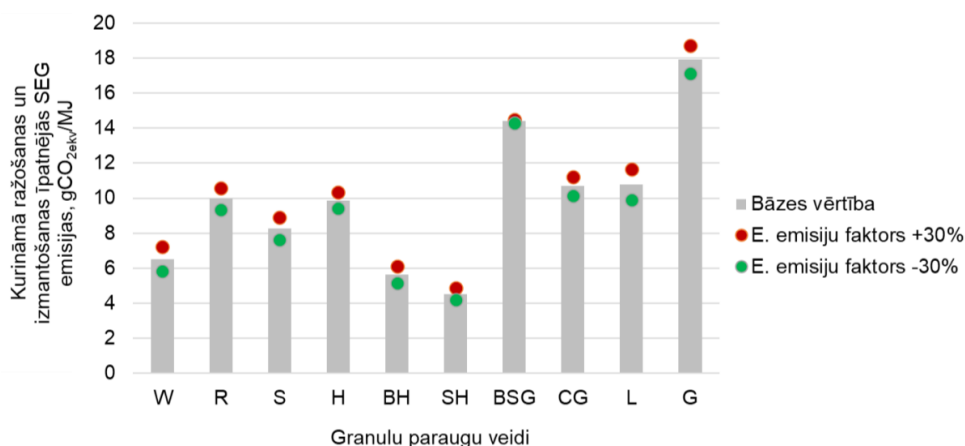


3.17. attēls. Īpatnējo SEG emisiju samazinājums, salīdzinot granulu iegūtās vērtības ar fosilo etalonu siltumenerģijas ražošanas kontekstā (skaidrojumus sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

Jūtīguma analīze

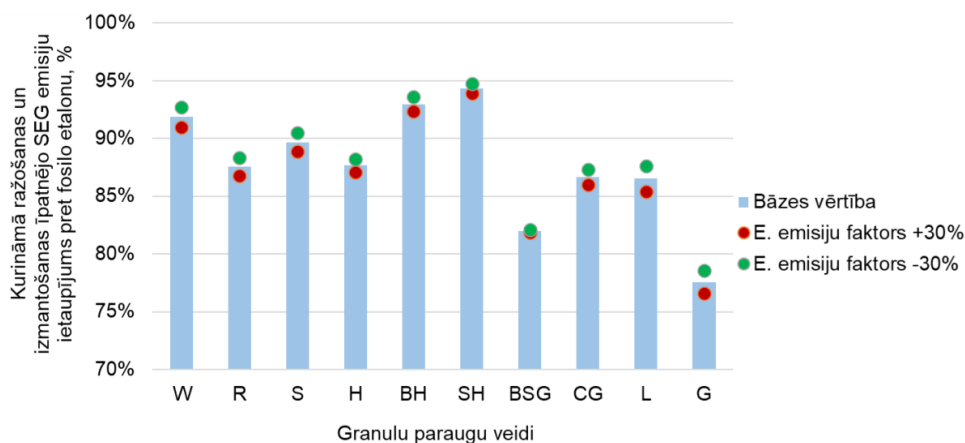
Atsevišķo aprēķinos iekļauto mainīgo vērtības var mainīties dažādu iemeslu dēļ, piem., KEM mājaslapā sadaļā “Siltumnīcefekta gāzu emisiju aprēķina metodika” publicēti vēsturiskie dati par elektroenerģijas un siltumenerģijas CO₂ emisiju faktoriem, kuru vērtības ir samazinājušās, bet vienmērīgā samazināšanās tendence nav novērojama. Promocijas darba ietvaros īpatnējo SEG emisiju no granulu ražošanas vērtības tika iegūtas izmantojot pēdējās publicētās 2024. gada emisiju faktoru vērtības bāzes aprēķinam un veikta jutīguma analīze, kura ietvaros emisiju faktoru vērtības tika samazinātas un palielinātas par 30 % no bāzes vērtības.

Elektroenerģijas CO₂ emisiju faktora izmaiņas visvairāk ietekmē tos granulu veidus, kuru ražošanas posmā iesaistīti vairāki elektroenerģiju patērējošie procesi — kā redzams 3.18. attēlā, lielākā svārstība ir L granulām, savukārt BSG granulām, kuru ražošanas posmā vienīgais elektroenerģiju patērējošais process ir granulēšana, izmaiņas skar minimāli.



3.18. attēls. Elektroenerģijas CO₂ emisiju faktora izmaiņu ietekme uz īpatnējām SEG emisijām no granulu aprites cikla posmiem (skaidrojumus sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

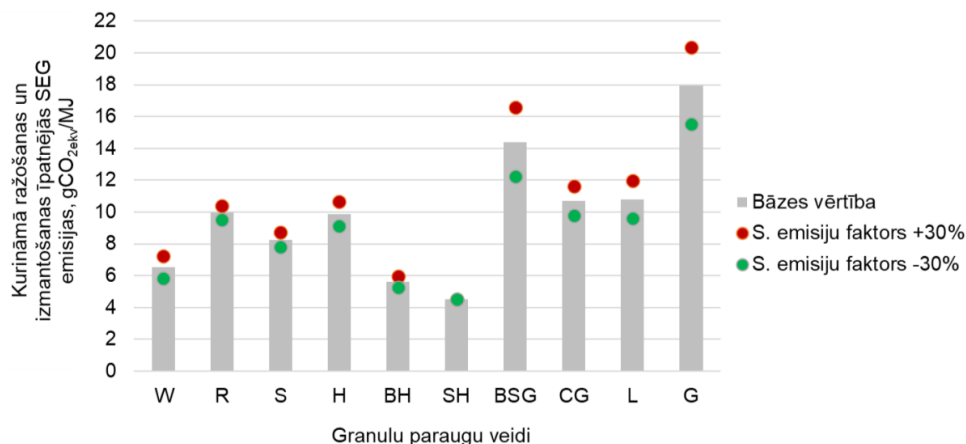
Līdzīgi novērojumi ir redzami arī 3.19. attēlā, kur attēlota elektroenerģijas CO₂ emisiju faktora ietekme uz īpatnējo SEG emisiju samazinājumu. Neskatoties uz G granulu salīdzinoši zemu īpatnējo SEG emisiju samazinājumu pētāmo granulu starpā, elektroenerģijas CO₂ emisiju faktora samazinājums par 30 % nebūtiski ietekmē rādītāja pieaugumu.



3.19. attēls. Elektroenerģijas CO₂ emisiju faktora izmaiņu ietekme uz granulu aprites cikla īpatnējo SEG emisiju samazinājumu (skaidrojumus sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

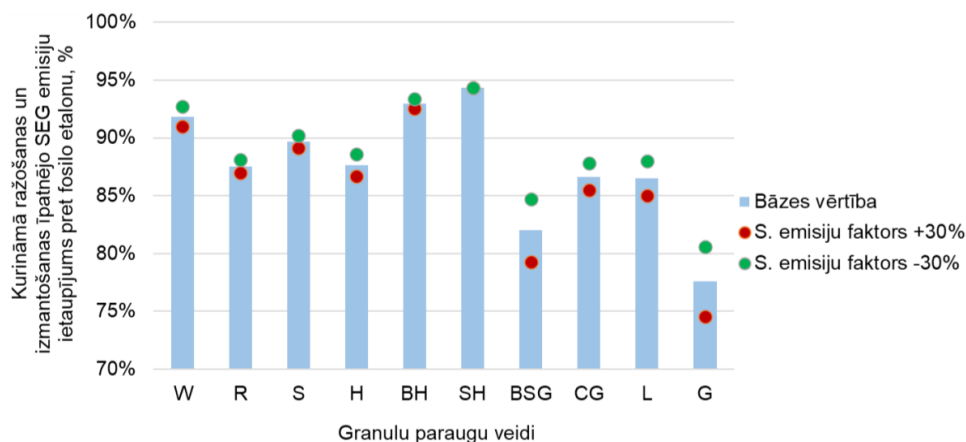
3.20. attēlā ir redzama siltumenerģijas CO₂ emisiju faktora izmaiņu ietekme uz īpatnējām SEG emisijām pētāmo granulu ietvaros — lielākā ietekme ir novērota granulām, kuru ražošanai nepieciešamajā izejas materiālā mitrums ir salīdzinoši augstāks (BSG un G granulas), līdz ar ko uz to žāvēšanu patērēts vairāk siltumenerģijas un, attiecīgi, pie emisiju faktora kāpuma

veidojas īpatnējo SEG emisiju pieaugums. Attiecīgi, SH granulu gadījumā izejas materiāla žāvēšana nav nepieciešama, tāpēc emisiju faktora svārstības šo granulu ražošanu neietekmē.



3.20. attēls. Siltumenerģijas CO₂ emisiju faktora izmaiņu ietekme uz īpatnējām SEG emisijām no granulu aprites cikla posmiem (skaidrojumus sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

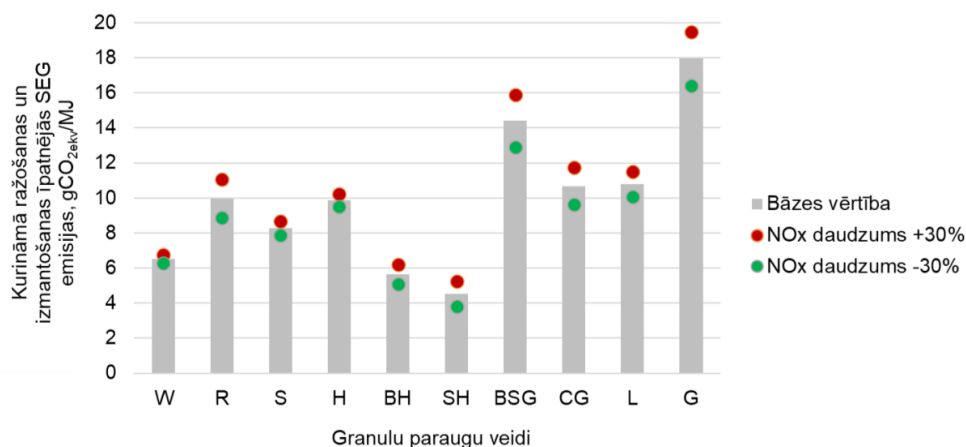
Arī īpatnējo SEG emisiju samazinājuma gadījumā BSG un G granulu vērtības ir ietekmētas visvairāk — emisiju faktoram pieaugot vērtība var nolaisties zem 80 % sliekšņa BSG granulām, savukārt G granulām emisiju faktoram pieaugot vērtība var pārsniegt 80 % sliekšni (sk. 3.21. att.).



3.21. attēls. Siltumenerģijas CO₂ emisiju faktora izmaiņu ietekme uz granulu aprites cikla īpatnējo SEG emisiju samazinājumu (skaidrojumus sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

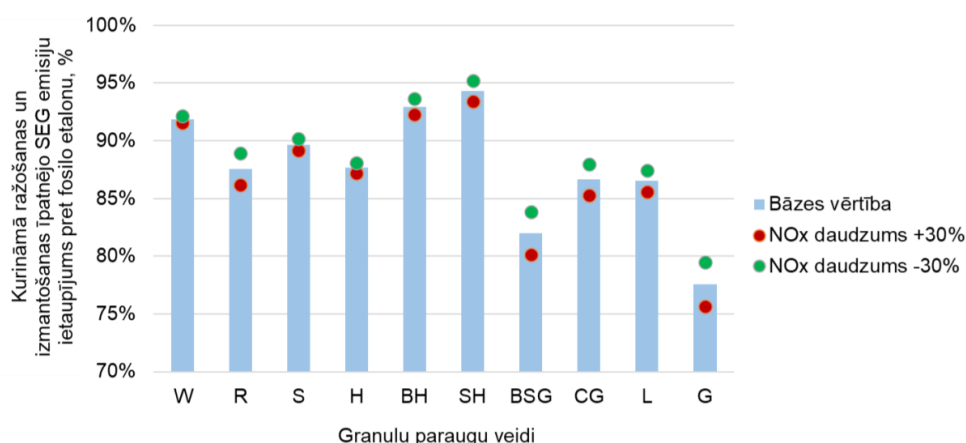
Atšķirībā no elektroenerģijas un siltumenerģijas CO₂ emisiju faktoriem, sadedzināšanas posmu neietekmē valstī vispārīgi noteiktie rādītāji, bet kurināmā kvalitāte un degšanas procesa

norise. Ņemot vērā, ka sadedzināšanas posmu promocijas darba ilgtspējas novērtējuma ietvaros raksturo dūmgāzēs esošā NO_x daudzuma N₂O daļa, jūtīguma analīzes ietvaros NO_x daudzums tika samazināts un palielināts par 30 % no bāzes vērtības. 3.22. attēlā redzams, ka vismazāk NO_x daudzuma svārstības ietekmē W granulas, savukārt visvairāk īpatnējās emisijas mainās BSG un G granulām.



3.22. attēls. NO_x daudzuma dūmgāzēs izmaiņu ietekme uz īpatnējām SEG emisijām no granulu aprites cikla posmiem (skaidrojumus sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

NO_x daudzuma dūmgāzēs izmaiņas nebūtiski ietekmē īpatnējo SEG emisiju samazinājumu lielākai daļai pētāmo granulu, izņemot BSG un G granulām (sk. 3.23. att.).

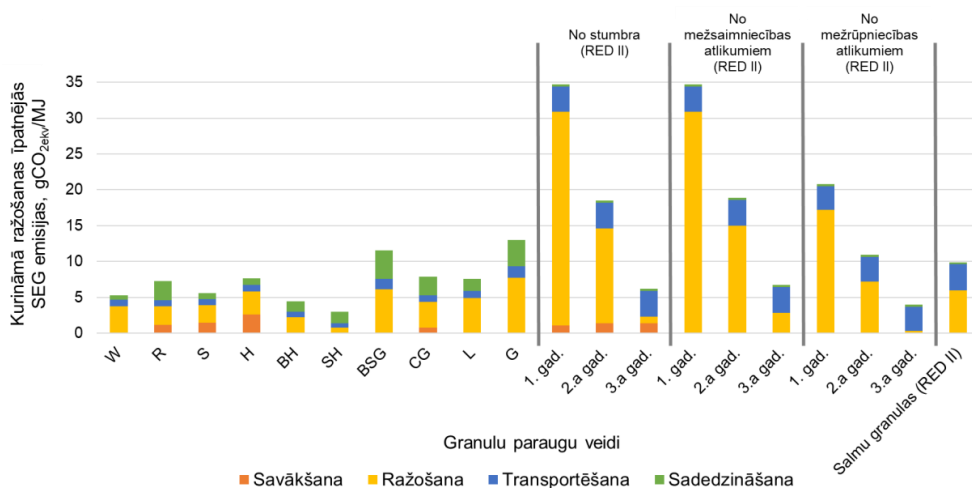


3.23. attēls. NO_x daudzuma dūmgāzēs izmaiņu ietekme uz granulu aprites cikla īpatnējo SEG emisiju samazinājumu (skaidrojumus sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

Salīdzinājums ar RED II noklusējuma vērtībām

3.24. attēlā parādīts pētīto granulu īpatnējo SEG emisiju salīdzinājums ar RED II noklusējuma vērtībām, kas promocijas darbā apkopotas 2.17. tabulā. RED II noklusējuma vērtībās salīdzināti vairāki granulu ražošanas scenāriji: 1. gadījumā siltumenerģija ražota no dabasgāzes un elektroenerģija ņemta no tīkla (1. gad.), 2.a gadījumā siltumenerģija iegūta šķeldas katlā un elektroenerģija ņemta no tīkla (2.a gad.), bet 3.a gadījumā gan siltumenerģija, gan elektroenerģija nodrošināta koģenerācijā (3.a gad.). Vislielākās īpatnējās SEG emisijas ir tiem RED II koksnes granulu scenārijiem, kuros siltumenerģija ražošanas posmā iegūta no dabasgāzes, jo šajā gadījumā ražošanas posmā ir augstāks emisiju faktors. Palielinoties AER īpatsvaram siltumenerģijas un elektroenerģijas nodrošināšanā, kā tas attēlots 2.a gad. un 3.a gad., īpatnējo emisiju vērtības koksnes granulām samazinās neatkarīgi no to izcelsmes.

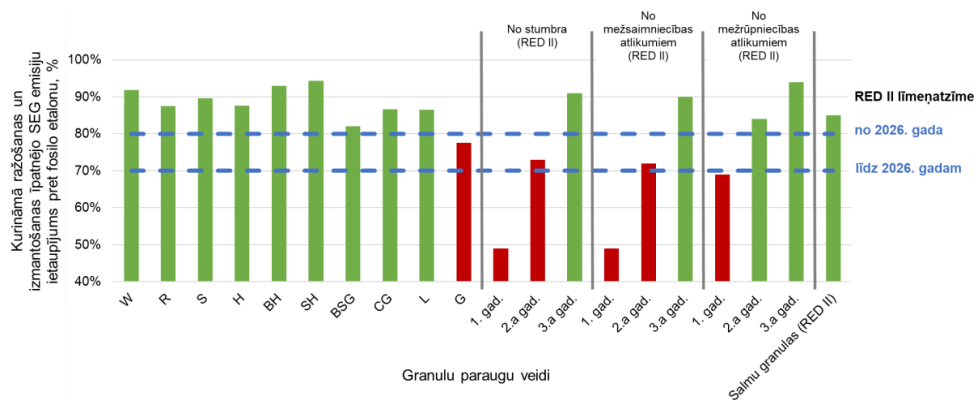
Salīdzinot W granulas ar RED II scenāriju “No mežrūpniecības atlikumiem (3.a gad.)”, redzams, ka kopējās īpatnējo emisiju vērtības būtiski neatšķiras - starpība ir $\sim 1 \text{ gCO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}$. Tomēr atšķiras emisiju sadalījums pa posmiem: RED II noklusējuma vērtībās ražošanas posma emisijas ir zemākas, bet transportēšanas posma emisijas augstākas nekā promocijas darbā aprēķinātajām W granulām. Šo atšķirību var skaidrot ar promocijas darbā izmantotajiem pieņēmumiem par laboratorijā iegūto ražošanas datu mērogošanu līdz granulu ražotnes līmenim. Līdzīga atšķirība novērojama, salīdzinot S granulas ar RED II salmu granulām: kopējā RED II noklusējuma vērtība salmu granulām ir par $\sim 4 \text{ gCO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}$ augstāka nekā promocijas darbā aprēķinātā S granulu vērtība, bet posmu ieguldījums abos gadījumos nav identisks.



3.24. attēls. Īpatnējās SEG emisiju no granulu aprites cikla posmiem pirms enerģijas transformācijas pētāmiem un RED II iekļautiem granulu veidiem (skaidrojumus sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

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.

RED II ietvaros cietā biokurināmā būtisks ilgtspējas rādītājs ir atbilstība īpatnējo emisiju samazinājuma sliekšņiem enerģijas transformācijas kontekstā — emisiju samazinājumam pret fosilo etalonu jābūt vismaz 70 % gadījumā, ja sadedzināšanas iekārta, kurā to iespējams izmantot, ir palaista līdz 2026. gadam, un, attiecīgi, vismaz 80 %, ja iekārta palaista pēc 2026. gada. 3.25. attēlā ir redzams īpatnējo emisiju samazinājums pētāmajām granulām un vērtības no RED II VI pielikuma A. daļas koksnes granulām (dažādas izcelsmes) un salmu granulām. No pētāmajām granulām G granulas nesasniedz 80 % samazinājuma sliekšni, kas var apgrūtināt to izmantošanu jaunajos mazas jaudas apkures katlos pie nosacījuma, ka tie nespēj nodrošināt augstāku sadegšanas efektivitāti un zemāku NO_x koncentrāciju dūmgāzēs. Visas pārējās pētāmās granulas sasniedz un pārsniedz abus samazinājuma sliekšņus, kas pierāda to ilgtspējas potenciālu siltumenerģijas ražošanai. Savukārt no RED II iekļautām granulām salīdzinoši zems īpatnējo emisiju salīdzinājums ir novērojams no stumbra (1. gad.) un no mežsaimniecības atlikumiem (1. gad.) veidotām granulām, kas norāda uz to, ka šāda veida granulām ir iespējams sasniegt RED II sliekšņus tikai ražotnes modernizācijas gadījumā, atsakoties no fosilā kurināmā siltumenerģijas ražošanas nolūkos.



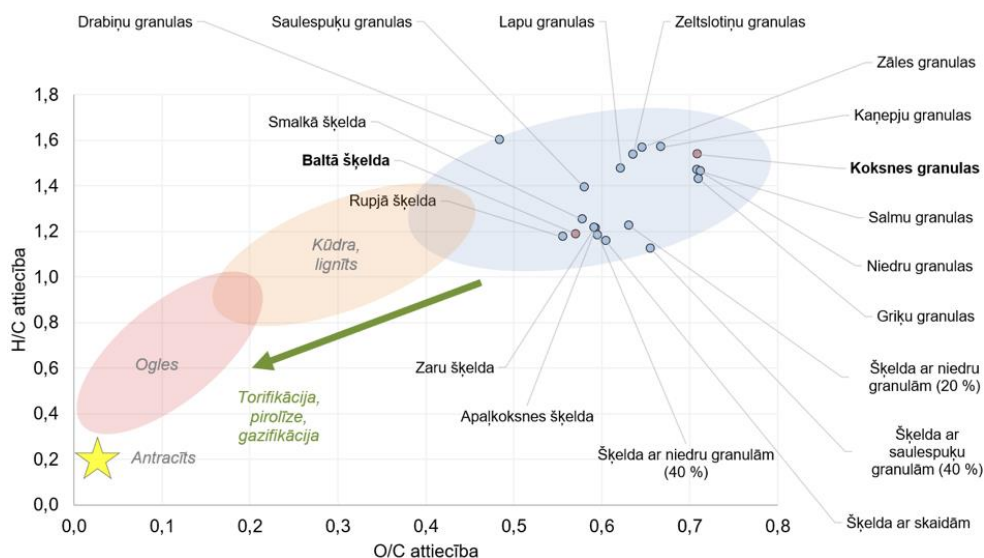
3.25. attēls. Īpatnējo SEG emisiju samazinājums granulām un atbilstība RED II sliekšņiem (skaidrojums sk. tabulā “DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI”)

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.

3.3. Rezultātu kopsavilkums

Promocijas darba rezultāti apliecina, ka alternatīvās biomasas izmantošanas potenciāls siltumenerģijas ražošanai nav vērtējams pēc viena izolēta rādītāja. Pētītie paraugi būtiski atšķiras pēc kvalitātes, sagatavošanas prasībām, sadedzināšanas uzvedības, emisiju profila, pelnu īpašībām un aprites cikla ietekmes. Tādēļ rezultātu interpretācija darbā veikta pakāpeniski: vispirms novērtēta kurināmā kvalitāte, pēc tam sadedzināšanas rezultāti ISA un CSA kontekstā, tālāk analizētas sakarības starp kurināmā īpašībām un emisijām, bet noslēgumā veikts granulū tehniski-sociālais, vides un ilgtspējas novērtējums.

Kurināmā kvalitātes analīze parādīja, ka pētītie biomasas paraugi atrodas biomasai raksturīgajā Van Krevelena diagrammas (sk. 3.26. att.) apgabalā, tomēr granulu paraugiem raksturīga lielāka izkliede nekā šķeldas paraugiem. Tas norāda uz atšķirīgāku elementāro sastāvu un potenciāli atšķirīgu sadedzināšanas uzvedību. Koksnes granulām konstatēti augstāki kvalitātes rādītāji, īpaši zemāks pelnu saturs, augstāks tilpumblīvums un augstāka mehāniskā izturība, savukārt alternatīvās biomasas granulām biežāk raksturīgs augstāks pelnu saturs, zemāks tilpumblīvums vai atšķirīga mehāniskā izturība. Šie rezultāti parāda, ka alternatīvās biomasas granulu kvalitāti potenciāli iespējams uzlabot ar atbilstošu sagatavošanu, daļiņu izmēra samazināšanu, mitruma regulēšanu un presēšanas režīma kontroli, tomēr to īpašības nav tieši pielīdzināmas koksnes granulām.



3.26. attēls. Pētāmo biomasu izvietojums Van Krevelena diagrammā

Granulu sadedzināšanas testi ISA katlā parādīja, ka alternatīvās biomasas granulas rada būtiski atšķirīgu emisiju profilu. Pie katla ražotāja iestatījumiem, kas paredzēti koksnes granulām, normatīvajām prasībām pilnībā atbilda tikai koksnes granulas. Alternatīvajām granulām galvenie ierobežojumi bija CO , NO_x un PM emisiju pārsniegumi, kas saistīti ar kurināmā sastāvu, pelnu saturu un degšanas režīma stabilitāti. Perspektīvākas atsevišķos rādītājos bija griķu čaumalu un kaņepju granulas, tomēr kopumā rezultāti apstiprina, ka alternatīvo granulu izmantošanai mazas jaudas katlos nepieciešama degšanas procesa pielāgošana, bet atsevišķos gadījumos arī katla konstrukcijas vai dūmgāzu attīrīšanas risinājumu pilnveide.

Šķeldas paraugu un maisījumu testi CSA katlā parādīja citu ierobežojumu struktūru. Vidējās jaudas ārdū katlā būtiska nozīme bija mitruma saturam, frakciju sadalījumam un padeves vienmērīgumam. Līdz 2029. gadam spēkā esošo robežvērtību kontekstā galvenais neatbilstības risks bija CO emisijas, savukārt no 2030. gada stingrāku prasību kontekstā par būtiskāko ierobežojumu kļūst PM emisijas. Tas nozīmē, ka CSA līmenī alternatīvo biomasas

maisījumu izmantošana ir tehniski iespējama, tomēr tai nepieciešama kurināmā kvalitātes kontrole, stabila padeve un, atsevišķos gadījumos, dūmgāzu attīrīšanas risinājumi.

Regresijas analīze ļāva kvantitatīvi pamatot sakarības starp kurināmā kvalitātes parametriem un sadedzināšanas rezultātiem. Granulu datu kopā iegūtie empīriskie modeļi parādīja, ka CO , NO_x , PM un katla efektivitāti var aprakstīt ar kurināmā kvalitātes mainīgajiem konkrētās eksperimentālās kopas ietvaros. Modeļi nav interpretējami kā universāli vienādojumi visiem biomasas granulu veidiem, bet tie sniedz praktisku sakarību aprakstu pētītajā kvalitātes un sadedzināšanas rādītāju diapazonā. Šķeldas maisījumiem regresijas rezultāti parādīja, ka NO_x visciešāk saistīts ar N saturu, PM ar AC , bet CO jāvērtē kopā ar MC , frakciju sadalījumu, padeves vienmērīgumu un režīma stabilitāti.

Pelnu analīze parādīja, ka alternatīvās biomasas kurināmo izvērtēšanā nepietiek ar pelnu daudzuma noteikšanu. Būtiska nozīme ir pelnu ķīmiskajam sastāvam un kristālisko fāžu struktūrai, jo tie nosaka gan ekspluatācijas riskus, gan potenciālos pelnu izmantošanas virzienus. Vasileva diagrammas izmantošana ļāva pelnu paraugus sasaistīt ar iespējamiem pielietojumiem kaļķošanā, mēslošanā vai būvmateriālu ražošanā. Tādējādi pelni nav vērtējami tikai kā sadedzināšanas atlikums, bet kā plūsma, kuras turpmāka izmantošana ir atkarīga no sastāva, kvalitātes un normatīvās atbilstības.

Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas analīze parādīja, ka tehniski-sociālajā vērtējumā koksnes granulas saglabā 1. vietu gan WSM-AHP, gan MULTIMOORA-AHP rezultātos. WSM-AHP rezultāti parāda kompromisa rangu, kur augstu pozīciju var iegūt ar dažādu kritēriju grupu līdzsvaru. MULTIMOORA-AHP papildus ļāva pārbaudīt, vai alternatīvas pozīcija saglabājas pie atšķirīgas aprēķinu loģikas. Šajā vērtējumā koksnes granulas bija labākās visās apakšmetodēs, bet BH un BSG granulas izcēlās kā spēcīgākās alternatīvas aiz koksnes. Tas norāda, ka alternatīvo granulu izvēlē jāņem vērā ne tikai kvalitāte vai emisijas, bet arī izmaksas, pieejamība, lietotāju gatavība akceptēt šādu kurināmo un nepieciešamība pielāgot degšanas procesu.

Aprītes cikla ietekmes novērtējums parādīja, ka alternatīvās biomasas granulas no vides ietekmes viedokļa atsevišķos gadījumos var būt konkurētspējīgas ar koksnes granulām. Rezultāti, kas izteikti ekopunktos uz 1 MWh saražotās siltumenerģijas, parādīja, ka kopējo ietekmi visbiežāk nosaka ražošanas un sadedzināšanas posmi. Savākšanas posma nozīme ir atkarīga no sistēmas robežām un konkrētās izejvielu plūsmas: koksnes saturošiem paraugiem būtiska ir A1 ietekme, savukārt tikai alternatīvās biomasas plūsmām lielāka nozīme ir transportēšanai un sagatavošanai. Kopējā LCA novērtējumā S, H, BH un SH granulām konstatēta mazāka ietekme uz vidi nekā W granulām, savukārt G granulām ietekme bija visaugstākā.

Ilgspējas novērtējums SEG emisiju ietaupījuma kontekstā parādīja, ka lielākā daļa pētīto granulu pārsniedz RED II ietvarā izmantotos emisiju ietaupījuma sliekšņus. Zemākās īpatnējās SEG emisijas iegūtas SH granulām, bet augstākās — G granulām. Pēc emisiju attiecināšanas pret sadedzināšanas iekārtas efektivitāti SH granulas saglabā labāko rezultātu, savukārt G granulas atrodas tuvu stingrākajam sliekšnim un to izmantošana jaunās iekārtās var būt problemātiska, ja netiek nodrošināta augstāka efektivitāte un zemākas NO_x emisijas. Jūtīguma

analīze parādīja, ka rezultātus īpaši ietekmē ražošanā izmantotās elektroenerģijas un siltumenerģijas emisiju faktori, kā arī NO_x daudzums dūmgāzēs.

Kopumā rezultāti apstiprina promocijas darba hipotēzi: alternatīvās biomasas granulas var neatbilst esošajām emisiju prasībām pie koksnes granulām pielāgotiem sadedzināšanas apstākļiem, tomēr vairākos gadījumos tās nodrošina būtisku SEG emisiju ietaupījumu un zemāku aprites cikla ietekmi nekā koksnes references kurināmais. Tas nozīmē, ka alternatīvās biomasas potenciāls nav noraidāms emisiju pārsniegumu dēļ, bet tā praktiskai ieviešanai nepieciešama kvalitātes kontrole, sadedzināšanas procesa pielāgošana, pelnu apsaimniekošanas pamatojums un izvērtējums pēc vairākām savstarpēji saistītām metodēm.

SECINĀJUMI

1. Promocijas darba ietvaros izstrādātā daudzdimensiālā metodoloģija nodrošina zinātnisku un strukturētu pieeju biomasas ilgtspējas potenciāla novērtēšanai siltumenerģijas ražošanas kontekstā un var tikt izmantota 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 ko pierāda ilgtspējas potenciālu.
3. Granulu kvalitātes analīze un salīdzinājums ar LVS EN ISO 17225-6:2021 alternatīvo granulu B klases prasībām parāda, ka pētāmo paraugu ierobežojošie faktori ir tilpumblīvums un mehāniskā izturība. Pilnīga atbilstība visiem B klases kritērijiem sasniegta tikai koksnes granulām.
4. Granulu un šķeldas sadedzināšanas rezultāti parāda, ka emisiju līmeni nosaka kurināmā īpašības un sadedzināšanas apstākļi. Individuālās siltumapgādes empīriskajos modeļos būtiski parametri bija gaisa pārpalikuma koeficients, oglekļa saturs, slāpekļa saturs, pelnu saturs, pelnu kušanas temperatūra, tilpumblīvums, mehāniskā izturība un dūmgāzu temperatūra. Centralizētās siltumapgādes testos slāpekļa oksīdu koncentrācija visciešāk bija saistīta ar slāpekļa saturu kurināmajā, cieta daļiņu koncentrācija — ar pelnu saturu, savukārt oglekļa monoksīda koncentrācijai konstatēta nelineāra sakarība ar mitruma saturu. Individuālās siltumapgādes kontekstā galvenais šķērslis ir paaugstināts oglekļa monoksīda un cieta daļiņu līmenis, bet centralizētās siltumapgādes kontekstā būtiskākie emisiju skaidrojošie rādītāji ir mitruma saturs, pelnu saturs un slāpekļa saturs kurināmajā.
5. Granulu un šķeldas pelnu analīzes rezultāti pierāda, ka ekspluatācijas risku nosaka ne tikai pelnu daudzums, bet pelnu fizikālķīmiskais raksturs. Pelnu plūsmas statusa maiņai no atkritumiem uz blakusproduktu ir nepieciešams pierādāms un reproducējams pamatojums, kurā pelnu ķīmiskais un kristālisko fāžu saturs kalpo kā galvenais atbilstības pamats drošai un tiesiski saderīgai turpmākai izmantošanai. Pielietojot Vasileva diagrammu pieeju, pelnus iespējams sistemātiski grupēt pēc dominējošā oksīdu kompleksa un attiecīgi definēt izmantošanas virzienus.
6. Aprites cikla novērtējums “no šūpuļa līdz kapam” tvērumā parāda, ka kopējo ietekmi galvenokārt nosaka ražošanas un sadedzināšanas posms, savukārt savākšanas posma rezultātu būtiski ietekmē sistēmas robežu izvēle. Zemākā kopējā ietekme uz vidi noteikta saulespuķu sēkļu čaumalu granulām (4,33 ekopunkti), griķu čaumalu-zāgskaidu granulām (5,67 ekopunkti) un kaņepju stiebru-zāgskaidu granulām (5,67 ekopunkti) uz 1 MWh siltumenerģijas (tiešās sadedzināšanas ietvaros), savukārt augstākā ietekme iegūta zāles un koksnes zāgskaidu granulām. Ietekmes mazināšana visefektīvāk panākama, samazinot ražošanas posma enerģijas patēriņu, nodrošinot sausāku izejmateriālu un mazinot slāpekļa oksīdu koncentrāciju dūmgāzēs.
7. Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas analīzē WSM-AHP un MULTIMOORA-AHP pieeja kopumā dod savstarpēji saskanīgu alternatīvu ranžējumu, tomēr atšķiras pēc kompensācijas loģikas: WSM-AHP vairāk atspoguļo kompromisu starp kritērijiem, bet

MULTIMOORA-AHP ir jūtīgāka pret izteikti vājiem rādītājiem un tādējādi precīzāk izgaismo alternatīvu kritiskos ierobežojumus praktiskai ieviešanai. WSM-AHP pieejā augstāko vērtējumu ieguva koksnes zāģskaidu granulas, iesala drabiņu granulas un griķu čaumalu-zāģskaidu granulas, savukārt MULTIMOORA-AHP pieejā augstāko kopējo Borda vērtējumu ieguva koksnes zāģskaidu granulas, griķu čaumalu-zāģskaidu granulas un iesala drabiņu granulas. Tas parāda, ka griķu čaumalu-zāģskaidu granulas un iesala drabiņu granulas ir spēcīgākās alternatīvās biomasas granulu alternatīvas aiz koksnes zāģskaidu granulām, savukārt kaņepju stiebru-zāģskaidu granulas saglabā labu pozīciju abu pieeju rezultātos.

8. Ilgtspējas novērtējums parāda, ka pētāmās granulas kopumā nodrošina augstu siltumnīcefekta gāzu emisiju ietaupījumu pret fosilo etalonu. Lielākais emisiju ietaupījums sasniegts saulespuķu sēklu čaumalu granulām (94 %), savukārt zemākais ir zāles-zāģskaidu granulām (78 %). Lielākā daļa pētīto granulu pārsniedz RED II emisiju ietaupījuma sliekšņus, tomēr rezultāta jutīgumu nosaka ražošanas posma enerģijas struktūra un sadedzināšanas iekārtas efektivitāte. Ilgtspējas uzlabošanas prioritātes ir procesa energoefektivitāte un enerģijas avotu dekarbonizācija ražošanā, vienlaikus nodrošinot samazinātu slāpekļa oksīdu veidošanos sadedzināšanas procesā.

Ekspertu un lietotāju aptaujas forma

15.07.2026, 17:38

Ekspertu un lietotāju aptauja semināra "Granulu apkures ABC. Praktiskas atziņas un inovatīvie risinājumi" ietvaros

Ekspertu un lietotāju aptauja semināra "Granulu apkures ABC. Praktiskas atziņas un inovatīvie risinājumi" ietvaros

Paldies par velmi izteikt savu viedokli!

Aptaujas mērķis - savākt datus 18 alternatīvo granulu kompleksajam novērtējumam. Novērtējums notiek pēc 15 atlasītajiem kritērijiem. Jums ir jāpiešķir SVARĪGUMS katram šim kritērijam, kā arī JĀNOVĒRTĒ atsevišķi kritēriji (no 10. līdz 15.) katras alternatīvas kontekstā.

Zemāk lūdz atzīmēt vai esat eksperts, lietotājs vai vienlaikus pārstāvat abas grupas.

* Indicates required question

1. Vai jūs esat **eksperts** vai **lietotājs**? (var atzīmēt vairākus variantus) *

Check all that apply.

- ☐ Eksperts
☐ Lietotājs

Skip to question 2

15.07.2026, 17:38

Ekspertu un lietotāju aptauja semināra "Granulu apkures ABC. Praktiskas atziņas un inovatīvie risinājumi" ietvaros

Kritēriju svarīgs

Kopā ir definēti 15 kritēriji, kas ļauj novērtēt 18 dažādu granulu alternatīvas.

Lūdzu, piešķiriet katram kritērijam SVARĪGUMU lēmumu pieņemšanas kontekstā pēc skalas:

- 1 - Zems svarīgums
2 - Vidējais svarīgums
3 - Augsts svarīgums

Svarīgumu jāpiešķir NEATKARĪGI no tālāk aptaujā apskatāmām alternatīvām.

2. **K1. Zemākais sadegšanas siltums** – Norāda, cik daudz siltuma iegūst no granulu degšanas *

1	2	3
☆	☆	☆

3. **K2. Pelnu saturs** – Norāda, cik daudz pelnu paliek pēc granulu sadedzināšanas *

1	2	3
☆	☆	☆

https://docs.google.com/forms/d/1grGouVwD-X0QumMfjpaN8GUAOC2OC6cont1nDeMEwEdt

180

15.07.2026, 17:38

Ekspertu un lietotāju aptauja semināra "Granulu apkures ABC. Praktiskas atziņas un inovatīvie risinājumi" ietvaros

4. **K3. Ilgizturība** – Granulu spēja nesadrūpēt transportēšanas un uzglabāšanas laikā *

1	2	3
☆	☆	☆

5. **K4. Pelnu kušanas temperatūra (deformācija)** – Temperatūra, *
pie kuras pelni sāk veidot cietas nogulsnes katlā

1	2	3
☆	☆	☆

6. **K5. CO koncentrācija dūmgāzēs** – Oglekļa monoksīda *
daudzums, kas ietekmē gaisa kvalitāti un drošību

1	2	3
☆	☆	☆

7. **K6. NOx koncentrācija dūmgāzēs** – Slāpekļa oksīdu emisijas, *
kas veicina gaisa piesārņojumu

1	2	3
☆	☆	☆

https://docs.google.com/forms/d/1grGouVwD-X0QumMfjpaN8GUAOC2OC6cont1nDeMEwEdt

360

https://docs.google.com/forms/d/1grGouVwD-X0QumMfjpaN8GUAOC2OC6cont1nDeMEwEdt

260

15.07.2026, 17:38

Ekspertu un lietotāju aptauja semināra "Granulu apkures ABC. Praktiskas atziņas un inovatīvie risinājumi" ietvaros

8. **K7. PM koncentrācija dūmgāzēs** – Cieto daļiņu daudzums, *
kas ietekmē veselību un apkārtējās vides pH

1	2	3
☆	☆	☆

9. **K8. Katla efektivitāte** – Cik efektīvi katls pārvērš granulu *
enerģiju siltumā

1	2	3
☆	☆	☆

10. **K9. Enerģijas blīvums (piegādātāja/ražotāja kontekstā)** – *
Enerģijas daudzums uz tilpuma vai masas vienību, ietekmē transporta izmaksas

1	2	3
☆	☆	☆

https://docs.google.com/forms/d/1grGouVwD-X0QumMfjpaN8GUAOC2OC6cont1nDeMEwEdt

480

11. **K10. Izejvielu īpatnējās izmaksas (ražotāja kontekstā)** – *
Cena par izejvielu vienību, kas ietekmē ražošanas ekonomiku

1	2	3
☆	☆	☆

12. **K11. Ražošanas izmaksas (ražotāja kontekstā)** – Kopējās izmaksas granulu izgatavošanai un esošo tehnoloģiju pielāgošanās spēja

1	2	3
☆	☆	☆

13. **K12. Resursa pieejamība (ražotāja kontekstā)** – Vai izejvielas ir viegli un stabili pieejamas

1	2	3
☆	☆	☆

14. **K13. Resursa iegūšanas sarežģītība (ražotāja kontekstā)** – *
Cik grūti iegūt un apstrādāt izejvielu

1	2	3
☆	☆	☆

15. **K14. Sabiedrības pieņemamība (galalietotāja kontekstā)** – *
Vai lietotājs ir gatavs izmantot šīs granulas

1	2	3
☆	☆	☆

16. **K15. Gatavība pielāgot degšanas procesu (galalietotāja kontekstā)** – Vai lietotājs gatavs mainīt katla iestatījumus vai konstrukciju granulu dēļ

1	2	3
☆	☆	☆

A1. Koksnes granulas (pirktas)

Lūdzu, novērtējiet šo alternatīvu pēc sekojošiem kritērijiem.

17. **K10. Izejvielu īpatnējās izmaksas (ražotāja kontekstā)**

Skala:

- 1 – Resursa īpašnieks piemaksā, lai atbrīvotos no izejvielas
2 – Izejviela tiek nodota bez maksas
3 – Pircējs maksā par izejvielu

1	2	3
☆	☆	☆

18. **K11. Ražošanas izmaksas (ražotāja kontekstā)**

Skala:

- 1 – Atstrādātā ražošanas tehnoloģija / minimāla esošās līnijas modernizācija
2 – Esošās līnijas modernizācija, jaunu starposmu ieviešana (piem., skaidu un biomasas jaukšana)
3 – Pamatīga esošās līnijas modernizācija, nopietna biomasas priekšapstrāde (piem., sijāšana)

1	2	3
☆	☆	☆

19. **K12. Resursa pieejamība (ražotāja kontekstā)** *

Skala:

- 1 – Augsta pieejamība
2 – Vidēja pieejamība
3 – Zema pieejamība

1	2	3
☆	☆	☆

20. **K13. Resursa iegūšanas sarežģītība (ražotāja kontekstā)** *

Skala:

- 1 – Viegli
2 – Vidēji
3 – Grūti

1	2	3
☆	☆	☆

21. K14. Sabiedrības pieņemamība (galalietotāja kontekstā) *

Skala:

- 1 – Gatavs izmantot
- 2 – Gatavs izmantot, bet ar nosacījumu
- 3 – Nav gatavs izmantot

1 2 3

☆☆☆

22. K15. Gatavība pielāgot degšanas procesu (galalietotāja kontekstā) *

Skala:

- 1 – Pielāgošanās nav nepieciešama
- 2 – Ir gatavs ieguldīties, lai pielāgotu esošo / iegādāties jaunu katlu alternatīvajām granulām
- 3 – Nav gatavs ieguldīties

1 2 3

☆☆☆

Skip to question 23

A2. Sienā granulas (pirktas)

Lūdzu, novērtējiet šo alternatīvu pēc sekojošiem kritērijiem.

23. K10. Izejvielu īpatnējās izmaksas (ražotāja kontekstā)

Skala:

- 1 – Resursa īpašnieks piemaksā, lai atbrīvotos no izejvielas
- 2 – Izejviela tiek nodota bez maksas
- 3 – Pircējs maksā par izejvielu

1 2 3

☆☆☆

24. K11. Ražošanas izmaksas (ražotāja kontekstā)

Skala:

- 1 – Atstrādātā ražošanas tehnoloģija / minimāla esošās līnijas modernizācija
- 2 – Esošās līnijas modernizācija, jaunu starposmju ieviešana (piem., skaidu un biomasas jaukšana)
- 3 – Pamatīga esošās līnijas modernizācija, nopietna biomasas priekšapstrāde (piem., sijāšana)

1 2 3

☆☆☆

25. K12. Resursa pieejamība (ražotāja kontekstā) *

Skala:

- 1 – Augsta pieejamība
- 2 – Vidēja pieejamība
- 3 – Zema pieejamība

1 2 3

☆☆☆

26. K13. Resursa iegūšanas sarežģītība (ražotāja kontekstā) *

Skala:

- 1 – Viegli
- 2 – Vidēji
- 3 – Grūti

1 2 3

☆☆☆

27. K14. Sabiedrības pieņemamība (galalietotāja kontekstā) *

Skala:

- 1 – Gatavs izmantot
- 2 – Gatavs izmantot, bet ar nosacījumu
- 3 – Nav gatavs izmantot

1 2 3

☆☆☆

28. K15. Gatavība pielāgot degšanas procesu (galalietotāja kontekstā) *

Skala:

- 1 – Pielāgošanās nav nepieciešama
- 2 – Ir gatavs ieguldīties, lai pielāgotu esošo / iegādāties jaunu katlu alternatīvajām granulām
- 3 – Nav gatavs ieguldīties

1 2 3

☆☆☆

Skip to question 29

A3. Saulespuķu čaumalu granulas (pirktas)

Lūdzu, novērtējiet šo alternatīvu pēc sekojošiem kritērijiem.

29. **K10. Izejvielu īpatnējās izmaksas (ražotāja kontekstā)**

Skala:

- 1 – Resursa īpašnieks piemaksā, lai atbrīvotos no izejvielas
- 2 – Izejviela tiek nodota bez maksas
- 3 – Pircējs maksā par izejvielu

1	2	3
☆	☆	☆

30. **K11. Ražošanas izmaksas (ražotāja kontekstā)**

Skala:

- 1 – Atstrādātā ražošanas tehnoloģija / minimāla esošās līnijas modernizācija
- 2 – Esošās līnijas modernizācija, jaunu starposmu ieviešana (piem., skaidu un biomasas jaukšana)
- 3 – Pamatīga esošās līnijas modernizācija, nopietna biomasas priekšapstrāde (piem., sijāšana)

1	2	3
☆	☆	☆

33. **K14. Sabiedrības pieņemamība (galalietotāja kontekstā) ***

Skala:

- 1 – Gatavs izmantot
- 2 – Gatavs izmantot, bet ar nosacījumu
- 3 – Nav gatavs izmantot

1	2	3
☆	☆	☆

34. **K15. Gatavība pielāgot degšanas procesu (galalietotāja kontekstā) ***

Skala:

- 1 – Pielāgošanās nav nepieciešama
- 2 – Ir gatavs ieguldīties, lai pielāgotu esošo / iegādāties jaunu katlu alternatīvajām granulām
- 3 – Nav gatavs ieguldīties

1	2	3
☆	☆	☆

Skip to question 35

A4. Tekstila granulas (veidotas)

Lūdzu, novērtēiet šo alternatīvu pēc sekojošiem kritērijiem.

31. **K12. Resursa pieejamība (ražotāja kontekstā) ***

Skala:

- 1 – Augsta pieejamība
- 2 – Vidēja pieejamība
- 3 – Zema pieejamība

1	2	3
☆	☆	☆

32. **K13. Resursa iegūšanas sarežģītība (ražotāja kontekstā) ***

Skala:

- 1 – Viegli
- 2 – Vidēji
- 3 – Grūti

1	2	3
☆	☆	☆

35. **K10. Izejvielu īpatnējās izmaksas (ražotāja kontekstā)**

Skala:

- 1 – Resursa īpašnieks piemaksā, lai atbrīvotos no izejvielas
- 2 – Izejviela tiek nodota bez maksas
- 3 – Pircējs maksā par izejvielu

1	2	3
☆	☆	☆

36. **K11. Ražošanas izmaksas (ražotāja kontekstā)**

Skala:

- 1 – Atstrādātā ražošanas tehnoloģija / minimāla esošās līnijas modernizācija
- 2 – Esošās līnijas modernizācija, jaunu starposmu ieviešana (piem., skaidu un biomasas jaukšana)
- 3 – Pamatīga esošās līnijas modernizācija, nopietna biomasas priekšapstrāde (piem., sijāšana)

1	2	3
☆	☆	☆

37. **K12. Resursa pieejamība (ražotāja kontekstā) ***

Skala:
1 – Augsta pieejamība
2 – Vidēja pieejamība
3 – Zema pieejamība

1	2	3
☆	☆	☆

38. **K13. Resursa iegūšanas sarežģītība (ražotāja kontekstā) ***

Skala:
1 – Viegli
2 – Vidēji
3 – Grūti

1	2	3
☆	☆	☆

39. **K14. Sabiedrības pieņemamība (galalietotāja kontekstā) ***

Skala:
1 – Gatavs izmantot
2 – Gatavs izmantot, bet ar nosacījumu
3 – Nav gatavs izmantot

1	2	3
☆	☆	☆

40. **K15. Gatavība pielāgot degšanas procesu (galalietotāja kontekstā) ***

Skala:
1 – Pielāgošanās nav nepieciešama
2 – Ir gatavs ieguldīties, lai pielāgotu esošo / iegādāties jaunu katlu alternatīvajām granulām
3 – Nav gatavs ieguldīties

1	2	3
☆	☆	☆

Skip to question 41

A5. Koksnes granulas (veidotas)

Lūdzu, novērtējiet šo alternatīvu pēc sekojošiem kritērijiem.

41. **K10. Izejvielu īpatnējās izmaksas (ražotāja kontekstā)**

Skala:
1 – Resursa īpašnieks piemaksā, lai atbrīvotos no izejvielas
2 – Izejviela tiek nodota bez maksas
3 – Pircējs maksā par izejvielu

1	2	3
☆	☆	☆

42. **K11. Ražošanas izmaksas (ražotāja kontekstā)**

Skala:
1 – Atstrādātā ražošanas tehnoloģija / minimāla esošās līnijas modernizācija
2 – Esošās līnijas modernizācija, jaunu starposmu ieviešana (piem., skaidu un biomasas jaukšana)
3 – Pamatīga esošās līnijas modernizācija, nopietna biomasas priekšapstrāde (piem., sijāšana)

1	2	3
☆	☆	☆

43. **K12. Resursa pieejamība (ražotāja kontekstā) ***

Skala:
1 – Augsta pieejamība
2 – Vidēja pieejamība
3 – Zema pieejamība

1	2	3
☆	☆	☆

44. **K13. Resursa iegūšanas sarežģītība (ražotāja kontekstā) ***

Skala:
1 – Viegli
2 – Vidēji
3 – Grūti

1	2	3
☆	☆	☆

45. **K14. Sabiedrības pieņemamība (galalietotāja kontekstā) ***

Skala:

- 1 – Gatavs izmantot
- 2 – Gatavs izmantot, bet ar nosacījumu
- 3 – Nav gatavs izmantot

1 2 3

☆ ☆ ☆

46. **K15. Gatavība pielāgot degšanas procesu (galalietotāja kontekstā) ***

Skala:

- 1 – Pielāgošanās nav nepieciešama
- 2 – Ir gatavs ieguldīties, lai pielāgotu esošo / iegādāties jaunu katlu alternatīvajām granulām
- 3 – Nav gatavs ieguldīties

1 2 3

☆ ☆ ☆

Skip to question 47

A6. Drabiņu granulas (veidotas)

Lūdzu, novērtējiet šo alternatīvu pēc sekojošiem kritērijiem.

47. **K10. Izejvielu īpatnējās izmaksas (ražotāja kontekstā)**

Skala:

- 1 – Resursa īpašnieks piemaksā, lai atbrīvotos no izejvielas
- 2 – Izejviela tiek nodota bez maksas
- 3 – Pircējs maksā par izejvielu

1 2 3

☆ ☆ ☆

48. **K11. Ražošanas izmaksas (ražotāja kontekstā)**

Skala:

- 1 – Atstrādātā ražošanas tehnoloģija / minimāla esošās līnijas modernizācija
- 2 – Esošās līnijas modernizācija, jaunu starposmu ieviešana (piem., skaidu un biomasas jaukšana)
- 3 – Pamatīga esošās līnijas modernizācija, nopietna biomasas priekšapstrāde (piem., sijāšana)

1 2 3

☆ ☆ ☆

49. **K12. Resursa pieejamība (ražotāja kontekstā) ***

Skala:

- 1 – Augsta pieejamība
- 2 – Vidēja pieejamība
- 3 – Zema pieejamība

1 2 3

☆ ☆ ☆

50. **K13. Resursa iegūšanas sarežģītība (ražotāja kontekstā) ***

Skala:

- 1 – Viegli
- 2 – Vidēji
- 3 – Grūti

1 2 3

☆ ☆ ☆

51. **K14. Sabiedrības pieņemamība (galalietotāja kontekstā) ***

Skala:

- 1 – Gatavs izmantot
- 2 – Gatavs izmantot, bet ar nosacījumu
- 3 – Nav gatavs izmantot

1 2 3

☆ ☆ ☆

52. **K15. Gatavība pielāgot degšanas procesu (galalietotāja kontekstā) ***

Skala:

- 1 – Pielāgošanās nav nepieciešama
- 2 – Ir gatavs ieguldīties, lai pielāgotu esošo / iegādāties jaunu katlu alternatīvajām granulām
- 3 – Nav gatavs ieguldīties

1 2 3

☆ ☆ ☆

Skip to question 53

A7. Lapu granulas (veidotas)

Lūdzu, novērtējiet šo alternatīvu pēc sekojošiem kritērijiem.

53. **K10. Izejvielu īpatnējās izmaksas (ražotāja kontekstā)**

Skala:

- 1 – Resursa īpašnieks piemaksā, lai atbrīvotos no izejvielas
- 2 – Izejviela tiek nodota bez maksas
- 3 – Pircējs maksā par izejvielu

1	2	3
☆	☆	☆

54. **K11. Ražošanas izmaksas (ražotāja kontekstā)**

Skala:

- 1 – Atstrādātā ražošanas tehnoloģija / minimāla esošās līnijas modernizācija
- 2 – Esošās līnijas modernizācija, jaunu starposmu ieviešana (piem., skaidu un biomasas jaukšana)
- 3 – Pamatīga esošās līnijas modernizācija, nopietna biomasas priekšapstrāde (piem., sijāšana)

1	2	3
☆	☆	☆

57. **K14. Sabiedrības pieņemamība (galalietotāja kontekstā) ***

Skala:

- 1 – Gatavs izmantot
- 2 – Gatavs izmantot, bet ar nosacījumu
- 3 – Nav gatavs izmantot

1	2	3
☆	☆	☆

58. **K15. Gatavība pielāgot degšanas procesu (galalietotāja kontekstā) ***

Skala:

- 1 – Pielāgošanās nav nepieciešama
- 2 – Ir gatavs ieguldīties, lai pielāgotu esošo / iegādāties jaunu katlu alternatīvajām granulām
- 3 – Nav gatavs ieguldīties

1	2	3
☆	☆	☆

Skip to question 59

A8. Zeltslotiņas granulas (veidotas)

Lūdzu, novērtēiet šo alternatīvu pēc sekojošiem kritērijiem.

55. **K12. Resursa pieejamība (ražotāja kontekstā) ***

Skala:

- 1 – Augsta pieejamība
- 2 – Vidēja pieejamība
- 3 – Zema pieejamība

1	2	3
☆	☆	☆

56. **K13. Resursa iegūšanas sarežģītība (ražotāja kontekstā) ***

Skala:

- 1 – Viegli
- 2 – Vidēji
- 3 – Grūti

1	2	3
☆	☆	☆

59. **K10. Izejvielu īpatnējās izmaksas (ražotāja kontekstā)**

Skala:

- 1 – Resursa īpašnieks piemaksā, lai atbrīvotos no izejvielas
- 2 – Izejviela tiek nodota bez maksas
- 3 – Pircējs maksā par izejvielu

1	2	3
☆	☆	☆

60. **K11. Ražošanas izmaksas (ražotāja kontekstā)**

Skala:

- 1 – Atstrādātā ražošanas tehnoloģija / minimāla esošās līnijas modernizācija
- 2 – Esošās līnijas modernizācija, jaunu starposmu ieviešana (piem., skaidu un biomasas jaukšana)
- 3 – Pamatīga esošās līnijas modernizācija, nopietna biomasas priekšapstrāde (piem., sijāšana)

1	2	3
☆	☆	☆

61. **K12. Resursa pieejamība (ražotāja kontekstā) ***

Skala:
1 – Augsta pieejamība
2 – Vidēja pieejamība
3 – Zema pieejamība

1 2 3

☆☆☆

62. **K13. Resursa iegūšanas sarežģītība (ražotāja kontekstā) ***

Skala:
1 – Viegli
2 – Vidēji
3 – Grūti

1 2 3

☆☆☆

63. **K14. Sabiedrības pieņemamība (galalietotāja kontekstā) ***

Skala:
1 – Gatavs izmantot
2 – Gatavs izmantot, bet ar nosacījumu
3 – Nav gatavs izmantot

1 2 3

☆☆☆

64. **K15. Gatavība pielāgot degšanas procesu (galalietotāja kontekstā) ***

Skala:
1 – Pielāgošanās nav nepieciešama
2 – Ir gatavs ieguldīties, lai pielāgotu esošo / iegādāties jaunu katlu alternatīvajām granulām
3 – Nav gatavs ieguldīties

1 2 3

☆☆☆

Skip to question 65

A9. Zāles granulas (veidotas)

Lūdzu, novērtējiet šo alternatīvu pēc sekojošiem kritērijiem.

65. **K10. Izejvielu īpatnējās izmaksas (ražotāja kontekstā)**

Skala:
1 – Resursa īpašnieks piemaksā, lai atbrīvotos no izejvielām
2 – Izejviela tiek nodota bez maksas
3 – Pircējs maksā par izejvielu

1 2 3

☆☆☆

66. **K11. Ražošanas izmaksas (ražotāja kontekstā)**

Skala:
1 – Atstrādātā ražošanas tehnoloģija / minimāla esošās līnijas modernizācija
2 – Esošās līnijas modernizācija, jaunu starposmu ieviešana (piem., skaidu un biomasas jaukšana)
3 – Pamatīga esošās līnijas modernizācija, nopietna biomasas priekšapstrāde (piem., sijāšana)

1 2 3

☆☆☆

67. **K12. Resursa pieejamība (ražotāja kontekstā) ***

Skala:
1 – Augsta pieejamība
2 – Vidēja pieejamība
3 – Zema pieejamība

1 2 3

☆☆☆

68. **K13. Resursa iegūšanas sarežģītība (ražotāja kontekstā) ***

Skala:
1 – Viegli
2 – Vidēji
3 – Grūti

1 2 3

☆☆☆

69. **K14. Sabiedrības pieņemamība (galalietotāja kontekstā) ***

Skala:

- 1 – Gatavs izmantot
- 2 – Gatavs izmantot, bet ar nosacījumu
- 3 – Nav gatavs izmantot

1	2	3
☆	☆	☆

70. **K15. Gatavība pielāgot degšanas procesu (galalietotāja kontekstā) ***

Skala:

- 1 – Pielāgošanās nav nepieciešama
- 2 – Ir gatavs ieguldīties, lai pielāgotu esošo / iegādāties jaunu katlu alternatīvajām granulām
- 3 – Nav gatavs ieguldīties

1	2	3
☆	☆	☆

Skip to question 71

A10. Niedru granulas (veidotas)

Lūdzu, novērtējiet šo alternatīvu pēc sekojošiem kritērijiem.

71. **K10. Izejvielu īpatnējās izmaksas (ražotāja kontekstā)**

Skala:

- 1 – Resursa īpašnieks piemaksā, lai atbrīvotos no izejvielas
- 2 – Izejviela tiek nodota bez maksas
- 3 – Pircējs maksā par izejvielu

1	2	3
☆	☆	☆

72. **K11. Ražošanas izmaksas (ražotāja kontekstā)**

Skala:

- 1 – Atstrādātā ražošanas tehnoloģija / minimāla esošās līnijas modernizācija
- 2 – Esošās līnijas modernizācija, jaunu starposmju ieviešana (piem., skaidu un biomasas jaukšana)
- 3 – Pamatīga esošās līnijas modernizācija, nopietna biomasas priekšapstrāde (piem., sijāšana)

1	2	3
☆	☆	☆

73. **K12. Resursa pieejamība (ražotāja kontekstā) ***

Skala:

- 1 – Augsta pieejamība
- 2 – Vidēja pieejamība
- 3 – Zema pieejamība

1	2	3
☆	☆	☆

74. **K13. Resursa iegūšanas sarežģītība (ražotāja kontekstā) ***

Skala:

- 1 – Viegli
- 2 – Vidēji
- 3 – Grūti

1	2	3
☆	☆	☆

75. **K14. Sabiedrības pieņemamība (galalietotāja kontekstā) ***

Skala:

- 1 – Gatavs izmantot
- 2 – Gatavs izmantot, bet ar nosacījumu
- 3 – Nav gatavs izmantot

1	2	3
☆	☆	☆

76. **K15. Gatavība pielāgot degšanas procesu (galalietotāja kontekstā) ***

Skala:

- 1 – Pielāgošanās nav nepieciešama
- 2 – Ir gatavs ieguldīties, lai pielāgotu esošo / iegādāties jaunu katlu alternatīvajām granulām
- 3 – Nav gatavs ieguldīties

1	2	3
☆	☆	☆

Skip to question 77

A11. Kaņepju granulas (veidotas)

Lūdzu, novērtējiet šo alternatīvu pēc sekojošiem kritērijiem.

77. **K10. Izejvielu īpatnējās izmaksas (ražotāja kontekstā)**

Skala:

- 1 – Resursa īpašnieks piemaksā, lai atbrīvotos no izejvielām
- 2 – Izejviela tiek nodota bez maksas
- 3 – Pircējs maksā par izejvielu

1	2	3
☆	☆	☆

78. **K11. Ražošanas izmaksas (ražotāja kontekstā)**

Skala:

- 1 – Atstrādātā ražošanas tehnoloģija / minimāla esošās līnijas modernizācija
- 2 – Esošās līnijas modernizācija, jaunu starposmu ieviešana (piem., skaidu un biomasas jaukšana)
- 3 – Pamatīga esošās līnijas modernizācija, nopietna biomasas priekšapstrāde (piem., sijāšana)

1	2	3
☆	☆	☆

79. **K12. Resursa pieejamība (ražotāja kontekstā) ***

Skala:

- 1 – Augsta pieejamība
- 2 – Vidēja pieejamība
- 3 – Zema pieejamība

1	2	3
☆	☆	☆

80. **K13. Resursa iegūšanas sarežģītība (ražotāja kontekstā) ***

Skala:

- 1 – Viegli
- 2 – Vidēji
- 3 – Grūti

1	2	3
☆	☆	☆

81. **K14. Sabiedrības pieņemamība (galalietotāja kontekstā) ***

Skala:

- 1 – Gatavs izmantot
- 2 – Gatavs izmantot, bet ar nosacījumiem
- 3 – Nav gatavs izmantot

1	2	3
☆	☆	☆

82. **K15. Gatavība pielāgot degšanas procesu (galalietotāja kontekstā) ***

Skala:

- 1 – Pielāgošanās nav nepieciešama
- 2 – Ir gatavs ieguldīties, lai pielāgotu esošo / iegādāties jaunu katlu alternatīvajām granulām
- 3 – Nav gatavs ieguldīties

1	2	3
☆	☆	☆

Skip to question 83

A12. Griķu čaumalu granulas (veidotas)

Lūdzu, novērtējiet šo alternatīvu pēc sekojošiem kritērijiem.

83. **K10. Izejvielu īpatnējās izmaksas (ražotāja kontekstā)**

Skala:

- 1 – Resursa īpašnieks piemaksā, lai atbrīvotos no izejvielām
- 2 – Izejviela tiek nodota bez maksas
- 3 – Pircējs maksā par izejvielu

1	2	3
☆	☆	☆

84. **K11. Ražošanas izmaksas (ražotāja kontekstā)**

Skala:

- 1 – Atstrādātā ražošanas tehnoloģija / minimāla esošās līnijas modernizācija
- 2 – Esošās līnijas modernizācija, jaunu starposmu ieviešana (piem., skaidu un biomasas jaukšana)
- 3 – Pamatīga esošās līnijas modernizācija, nopietna biomasas priekšapstrāde (piem., sijāšana)

1	2	3
☆	☆	☆

85. **K12. Resursa pieejamība (ražotāja kontekstā) ***

Skala:
1 – Augsta pieejamība
2 – Vidēja pieejamība
3 – Zema pieejamība

1	2	3
☆	☆	☆

86. **K13. Resursa iegūšanas sarežģītība (ražotāja kontekstā) ***

Skala:
1 – Viegli
2 – Vidēji
3 – Grūti

1	2	3
☆	☆	☆

87. **K14. Sabiedrības pieņemamība (galalietotāja kontekstā) ***

Skala:
1 – Gatavs izmantot
2 – Gatavs izmantot, bet ar nosacījumu
3 – Nav gatavs izmantot

1	2	3
☆	☆	☆

88. **K15. Gatavība pielāgot degšanas procesu (galalietotāja kontekstā) ***

Skala:
1 – Pielāgošanās nav nepieciešama
2 – Ir gatavs ieguldīties, lai pielāgotu esošo / iegādāties jaunu katlu alternatīvajām granulām
3 – Nav gatavs ieguldīties

1	2	3
☆	☆	☆

Skip to question 89

A13. Salmu granulas (veidotas)

Lūdzu, novērtējiet šo alternatīvu pēc sekojošiem kritērijiem.

89. **K10. Izejvielu īpatnējās izmaksas (ražotāja kontekstā)**

Skala:
1 – Resursa īpašnieks piemaksā, lai atbrīvotos no izejvielas
2 – Izejviela tiek nodota bez maksas
3 – Pircējs maksā par izejvielu

1	2	3
☆	☆	☆

90. **K11. Ražošanas izmaksas (ražotāja kontekstā)**

Skala:
1 – Atstrādātā ražošanas tehnoloģija / minimāla esošās līnijas modernizācija
2 – Esošās līnijas modernizācija, jaunu starposmu ieviešana (piem., skaidu un biomasas jaukšana)
3 – Pamatīga esošās līnijas modernizācija, nopietna biomasas priekšapstrāde (piem., sijāšana)

1	2	3
☆	☆	☆

91. **K12. Resursa pieejamība (ražotāja kontekstā) ***

Skala:
1 – Augsta pieejamība
2 – Vidēja pieejamība
3 – Zema pieejamība

1	2	3
☆	☆	☆

92. **K13. Resursa iegūšanas sarežģītība (ražotāja kontekstā) ***

Skala:
1 – Viegli
2 – Vidēji
3 – Grūti

1	2	3
☆	☆	☆

93. **K14. Sabiedrības pieņemamība (galalietotāja kontekstā) ***

Skala:

- 1 – Gatavs izmantot
- 2 – Gatavs izmantot, bet ar nosacījumu
- 3 – Nav gatavs izmantot

1 2 3

☆ ☆ ☆

94. **K15. Gatavība pielāgot degšanas procesu (galalietotāja kontekstā) ***

Skala:

- 1 – Pielāgošanās nav nepieciešama
- 2 – Ir gatavs ieguldīties, lai pielāgotu esošo / iegādāties jaunu katlu alternatīvajām granulām
- 3 – Nav gatavs ieguldīties

1 2 3

☆ ☆ ☆

Skip to question 95

A14. Ābolu izspaidu granulas (veidotas)

Lūdzu, novērtējiet šo alternatīvu pēc sekojošiem kritērijiem.

95. **K10. Izejvielu īpatnējās izmaksas (ražotāja kontekstā)**

Skala:

- 1 – Resursa īpašnieks piemaksā, lai atbrīvotos no izejvielas
- 2 – Izejviela tiek nodota bez maksas
- 3 – Pircējs maksā par izejvielu

1 2 3

☆ ☆ ☆

96. **K11. Ražošanas izmaksas (ražotāja kontekstā)**

Skala:

- 1 – Atstrādātā ražošanas tehnoloģija / minimāla esošās līnijas modernizācija
- 2 – Esošās līnijas modernizācija, jaunu starposmu ieviešana (piem., skaidu un biomasas jaukšana)
- 3 – Pamatīga esošās līnijas modernizācija, nopietna biomasas priekšapstrāde (piem., sijāšana)

1 2 3

☆ ☆ ☆

97. **K12. Resursa pieejamība (ražotāja kontekstā) ***

Skala:

- 1 – Augsta pieejamība
- 2 – Vidēja pieejamība
- 3 – Zema pieejamība

1 2 3

☆ ☆ ☆

98. **K13. Resursa iegūšanas sarežģītība (ražotāja kontekstā) ***

Skala:

- 1 – Viegli
- 2 – Vidēji
- 3 – Grūti

1 2 3

☆ ☆ ☆

99. **K14. Sabiedrības pieņemamība (galalietotāja kontekstā) ***

Skala:

- 1 – Gatavs izmantot
- 2 – Gatavs izmantot, bet ar nosacījumu
- 3 – Nav gatavs izmantot

1 2 3

☆ ☆ ☆

100. **K15. Gatavība pielāgot degšanas procesu (galalietotāja kontekstā) ***

Skala:

- 1 – Pielāgošanās nav nepieciešama
- 2 – Ir gatavs ieguldīties, lai pielāgotu esošo / iegādāties jaunu katlu alternatīvajām granulām
- 3 – Nav gatavs ieguldīties

1 2 3

☆ ☆ ☆

Skip to question 101

A15. Nederīgo graudu granulas (veidotas)

Lūdzu, novērtējiet šo alternatīvu pēc sekojošiem kritērijiem.

101. **K10. Izejvielu īpatnējās izmaksas (ražotāja kontekstā)**

Skala:

- 1 – Resursa īpašnieks piemaksā, lai atbrīvotos no izejvielas
- 2 – Izejviela tiek nodota bez maksas
- 3 – Pircējs maksā par izejvielu

1	2	3
☆	☆	☆

102. **K11. Ražošanas izmaksas (ražotāja kontekstā)**

Skala:

- 1 – Atstrādātā ražošanas tehnoloģija / minimāla esošās līnijas modernizācija
- 2 – Esošās līnijas modernizācija, jaunu starposmu ieviešana (piem., skaidu un biomasas jaukšana)
- 3 – Pamatīga esošās līnijas modernizācija, nopietna biomasas priekšapstrāde (piem., sijāšana)

1	2	3
☆	☆	☆

103. **K12. Resursa pieejamība (ražotāja kontekstā) ***

Skala:

- 1 – Augsta pieejamība
- 2 – Vidēja pieejamība
- 3 – Zema pieejamība

1	2	3
☆	☆	☆

104. **K13. Resursa iegūšanas sarežģītība (ražotāja kontekstā) ***

Skala:

- 1 – Viegli
- 2 – Vidēji
- 3 – Grūti

1	2	3
☆	☆	☆

105. **K14. Sabiedrības pieņemamība (galalietotāja kontekstā) ***

Skala:

- 1 – Gatavs izmantot
- 2 – Gatavs izmantot, bet ar nosacījumiem
- 3 – Nav gatavs izmantot

1	2	3
☆	☆	☆

106. **K15. Gatavība pielāgot degšanas procesu (galalietotāja kontekstā) ***

Skala:

- 1 – Pielāgošanās nav nepieciešama
- 2 – Ir gatavs ieguldīt, lai pielāgotu esošo / iegādāties jaunu katlu alternatīvajām granuļām
- 3 – Nav gatavs ieguldīt

1	2	3
☆	☆	☆

Skip to question 107

A16. Egles skuju granulas (veidotas)

Lūdzu, novērtējiet šo alternatīvu pēc sekojošiem kritērijiem.

107. **K10. Izejvielu īpatnējās izmaksas (ražotāja kontekstā)**

Skala:

- 1 – Resursa īpašnieks piemaksā, lai atbrīvotos no izejvielas
- 2 – Izejviela tiek nodota bez maksas
- 3 – Pircējs maksā par izejvielu

1	2	3
☆	☆	☆

108. **K11. Ražošanas izmaksas (ražotāja kontekstā)**

Skala:

- 1 – Atstrādātā ražošanas tehnoloģija / minimāla esošās līnijas modernizācija
- 2 – Esošās līnijas modernizācija, jaunu starposmu ieviešana (piem., skaidu un biomasas jaukšana)
- 3 – Pamatīga esošās līnijas modernizācija, nopietna biomasas priekšapstrāde (piem., sijāšana)

1	2	3
☆	☆	☆

109. **K12. Resursa pieejamība (ražotāja kontekstā) ***

Skala:
1 – Augsta pieejamība
2 – Vidēja pieejamība
3 – Zema pieejamība

1 2 3

☆☆☆

110. **K13. Resursa iegūšanas sarežģītība (ražotāja kontekstā) ***

Skala:
1 – Viegli
2 – Vidēji
3 – Grūti

1 2 3

☆☆☆

111. **K14. Sabiedrības pieņemamība (galalietotāja kontekstā) ***

Skala:
1 – Gatavs izmantot
2 – Gatavs izmantot, bet ar nosacījumu
3 – Nav gatavs izmantot

1 2 3

☆☆☆

112. **K15. Gatavība pielāgot degšanas procesu (galalietotāja kontekstā) ***

Skala:
1 – Pielāgošanās nav nepieciešama
2 – Ir gatavs ieguldīties, lai pielāgotu esošo / iegādāties jaunu katlu alternatīvajām granulām
3 – Nav gatavs ieguldīties

1 2 3

☆☆☆

Skip to question 113

A17. Kafijas izspaidu granulas (veidotas)

Lūdzu, novērtējiet šo alternatīvu pēc sekojošiem kritērijiem.

113. **K10. Izejvielu ipatnējās izmaksas (ražotāja kontekstā)**

Skala:
1 – Resursa īpašnieks piemaksā, lai atbrīvotos no izejvielas
2 – Izejviela tiek nodota bez maksas
3 – Pircējs maksā par izejvielu

1 2 3

☆☆☆

114. **K11. Ražošanas izmaksas (ražotāja kontekstā)**

Skala:
1 – Atstrādātā ražošanas tehnoloģija / minimāla esošās līnijas modernizācija
2 – Esošās līnijas modernizācija, jaunu starpposmu ieviešana (piem., skaidu un biomasas jaukšana)
3 – Pamatīga esošās līnijas modernizācija, nopietna biomasas priekšapstrāde (piem., sijāšana)

1 2 3

☆☆☆

115. **K12. Resursa pieejamība (ražotāja kontekstā) ***

Skala:
1 – Augsta pieejamība
2 – Vidēja pieejamība
3 – Zema pieejamība

1 2 3

☆☆☆

116. **K13. Resursa iegūšanas sarežģītība (ražotāja kontekstā) ***

Skala:
1 – Viegli
2 – Vidēji
3 – Grūti

1 2 3

☆☆☆

117. **K14. Sabiedrības pieņemamība (galalietotāja kontekstā) ***

Skala:

- 1 – Gatavs izmantot
- 2 – Gatavs izmantot, bet ar nosacījumu
- 3 – Nav gatavs izmantot

1 2 3

☆☆☆

118. **K15. Gatavība pielāgot degšanas procesu (galalietotāja kontekstā) ***

Skala:

- 1 – Pielāgošanās nav nepieciešama
- 2 – Ir gatavs ieguldīties, lai pielāgotu esošo / iegādāties jaunu katlu alternatīvajām granulām
- 3 – Nav gatavs ieguldīties

1 2 3

☆☆☆

Skip to question 119

A18. Kūdras granulas (veidotas)

Lūdzu, novērtējiet šo alternatīvu pēc sekojošiem kritērijiem.

119. **K10. Izejvielu īpatnējās izmaksas (ražotāja kontekstā)**

Skala:

- 1 – Resursa īpašnieks piemaksā, lai atbrīvotos no izejvielas
- 2 – Izejviela tiek nodota bez maksas
- 3 – Pircējs maksā par izejvielu

1 2 3

☆☆☆

120. **K11. Ražošanas izmaksas (ražotāja kontekstā)**

Skala:

- 1 – Atstrādātā ražošanas tehnoloģija / minimāla esošās līnijas modernizācija
- 2 – Esošās līnijas modernizācija, jaunu starposmu ieviešana (piem., skaidu un biomasas jaukšana)
- 3 – Pamatīga esošās līnijas modernizācija, nopietna biomasas priekšapstrāde (piem., sijāšana)

1 2 3

☆☆☆

121. **K12. Resursa pieejamība (ražotāja kontekstā) ***

Skala:

- 1 – Augsta pieejamība
- 2 – Vidēja pieejamība
- 3 – Zema pieejamība

1 2 3

☆☆☆

122. **K13. Resursa iegūšanas sarežģītība (ražotāja kontekstā) ***

Skala:

- 1 – Viegli
- 2 – Vidēji
- 3 – Grūti

1 2 3

☆☆☆

123. **K14. Sabiedrības pieņemamība (galalietotāja kontekstā) ***

Skala:

- 1 – Gatavs izmantot
- 2 – Gatavs izmantot, bet ar nosacījumu
- 3 – Nav gatavs izmantot

1 2 3

☆☆☆

124. **K15. Gatavība pielāgot degšanas procesu (galalietotāja kontekstā) ***

Skala:

- 1 – Pielāgošanās nav nepieciešama
- 2 – Ir gatavs ieguldīties, lai pielāgotu esošo / iegādāties jaunu katlu alternatīvajām granulām
- 3 – Nav gatavs ieguldīties

1 2 3

☆☆☆

This content is neither created nor endorsed by Google.

Google Forms

LITERATŪRAS SARAKSTS

1. Our Solar System: Facts. Formation. National Aeronautics and Space Administration (NASA) of United States. Accessed June 26, 2024. <https://science.nasa.gov/solar-system/solar-system-facts/>
2. Pfalzner S, Davies MB, Gounelle M, et al. The formation of the solar system. *Phys Scr. Institute of Physics Publishing*. 2015;90(6). doi:10.1088/0031-8949/90/6/068001
3. Russell SS. The Formation of the Solar System. *J Geol Soc London*. 2007;164(3):481-492. doi:10.1144/0016-76492006-054
4. Oró J, Miller SL, Urey HC. ENERGY CONVERSION IN THE CONTEXT OF THE ORIGIN OF LIFE. In: Buvet R, Allen MJ, Massué JP, eds. *Living Systems As Energy Converters*. Elsevier; 1977:7-19. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-7204-0629-0.50006-3>
5. Adamov E, ed. Chapter 1 - Power generation and sustainable development: 1.8 Thermonuclear fusion energy. In: *Closed Nuclear Fuel Cycle with Fast Reactors*. Academic Press; 2022:3-35. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99308-1.00040-4>
6. Ahmed U, Anwar A. Chapter 3 - Application of natural dyes in dye-sensitized solar cells: 3.1.2 Solar energy. In: Pandey AK, Shahabuddin S, Ahmad MS, eds. *Dye-Sensitized Solar Cells*. Academic Press; 2022:45-73. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818206-2.00008-6>
7. Meseguer J, Pérez-Grande I, Sanz-Andrés A. 5 - Thermal radiation heat transfer: 5.1 Nature of thermal radiation. In: Meseguer J, Pérez-Grande I, Sanz-Andrés A, eds. *Spacecraft Thermal Control*. Woodhead Publishing; 2012:73-86. doi:<https://doi.org/10.1533/9780857096081.73>
8. Müller M. 2.12 - Heat Transfer in Bioreactors: 2.12.2 Forms of Heat Transfer. In: Moo-Young M, ed. *Comprehensive Biotechnology (Third Edition)*. Third Edition. Pergamon; 2019:133-150. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64046-8.00140-3>
9. Epstein Y, Moran DS. 41 - Extremes of Temperature and Hydration: Dry Heat Exchange. In: Keystone JS, Freedman DO, Kozarsky PE, Connor BA, Nothdurft HD, eds. *Travel Medicine (Third Edition)*. Third Edition. Elsevier; 2013:381-390. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-1076-8.00041-7>
10. Yenkie KM, Wu W, Clark RL, Pflieger BF, Root TW, Maravelias CT. A roadmap for the synthesis of separation networks for the recovery of bio-based chemicals: Matching biological and process feasibility. *Biotechnol Adv*. 2016;34(8):1362-1383. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2016.10.003>
11. Hüner NPA, Grodzinski B. 1.23 - Photosynthesis and Photoautotrophy. In: Moo-Young M, ed. *Comprehensive Biotechnology (Second Edition)*. Second Edition. Academic Press; 2011:315-322. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-088504-9.00036-2>
12. Gwinnup AL, Schnoor JL. Water Quality in the Mississippi River and Gulf Hypoxia: 1.1 Water in living organisms. In: *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. Elsevier; 2014. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09134-X>
13. Julca I, Alaminos M, González-López J, Manzanera M. Xeroprotectants for the stabilization of biomaterials: 1.1 Water in living organisms. *Biotechnol Adv*. 2012;30(6):1641-1654. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.07.002>
14. Leegood RC. Photosynthesis. In: Lennarz WJ, Lane MD, eds. *Encyclopedia of Biological Chemistry (Second Edition)*. Second Edition. Academic Press; 2013:492-496. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-378630-2.00049-9>
15. Jagannathan B, Golbeck JH. Photosynthesis: Microbial. In: Schaechter M, ed. *Encyclopedia of Microbiology (Third Edition)*. Third Edition. Academic Press; 2009:325-341. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-012373944-5.00352-7>
16. Lopez FB, Barclay GF. Chapter 4 - Plant Anatomy and Physiology: 4.2.1 Photosynthesis. In: Badal S, Delgoda R, eds. *Pharmacognosy*. Academic Press; 2017:45-60.

- doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802104-0.00004-4>
17. Minagawa J. Chapter 14 - Light-Harvesting Proteins. In: Harris EH, Stern DB, Witman GB, eds. *The Chlamydomonas Sourcebook (Second Edition)*. Second Edition. Academic Press; 2009:503-539. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-370873-1.00022-8>
18. Reichle DE. Chapter 4 - Biological energy transformations by plants. In: Reichle DE, ed. *The Global Carbon Cycle and Climate Change (Second Edition)*. Second Edition. Elsevier; 2023:59-74. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18775-9.00005-X>
19. Stephen AM, Merrifield EH. CARBOHYDRATES | Overview: Heavy Industry. In: Worsfold P, Townshend A, Poole C, eds. *Encyclopedia of Analytical Science (Second Edition)*. Second Edition. Elsevier; 2005:392-408. doi:<https://doi.org/10.1016/B0-12-369397-7/00051-0>
20. Tcherkez G, Carroll A, Abadie C, Mainguet S, Davanture M, Zivy M. Protein synthesis increases with photosynthesis via the stimulation of translation initiation. *Plant Science*. 2020;291:110352. doi:<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.110352>
21. Galili G, Avin-Wittenberg T, Angelovici R, Fernie AR. The role of photosynthesis and amino acid metabolism in the energy status during seed development. *Front Plant Sci*. 2014;5. doi:10.3389/fpls.2014.00447
22. Sasaki Y, Kozaki A, Hatano M. Link between light and fatty acid synthesis: Thioredoxin-linked reductive activation of plastidic acetyl-CoA carboxylase. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 1997;94(20):11096-11101. doi:10.1073/pnas.94.20.11096
23. Hua D, Hendriks W, Xiong B, Pellikaan WF. Starch and Cellulose Degradation in the Rumen and Applications of Metagenomics on Ruminant Microorganisms. *Animals*. 2022;12:3020. doi:10.3390/ani12213020
24. Brook I. Anaerobic Bacteria: Volatile Fatty Acids. In: Cohen J, Powderly WG, Opal SM, eds. *Infectious Diseases (Fourth Edition)*. Fourth Edition. Elsevier; 2017:1628-1644.e2. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-7020-6285-8.00184-2>
25. Nafikov RA, Beitz DC. Carbohydrate and Lipid Metabolism in Farm Animals. *J Nutr*. 2007;137(3):702-705. doi:<https://doi.org/10.1093/jn/137.3.702>
26. Bergen WG. Contribution of Research with Farm Animals to Protein Metabolism Concepts: A Historical Perspective. *J Nutr*. 2007;137(3):706-710. doi:<https://doi.org/10.1093/jn/137.3.706>
27. Yang J, Ueharu H, Mishina Y. Energy metabolism: A newly emerging target of BMP signaling in bone homeostasis. *Bone*. 2020;138:115467. doi:<https://doi.org/10.1016/j.bone.2020.115467>
28. Lund AK. 6.14 - Oxidants and Endothelial Dysfunction: 6.14.2.5.1 Mitochondrial electron transport chain. In: McQueen CA, ed. *Comprehensive Toxicology (Second Edition)*. Second Edition. Elsevier; 2010:243-274. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-046884-6.00712-0>
29. Afzal U, Aslam M. Chapter 9 - A study of human respiration rate through neutrosophic statistics: 9.1 Introduction and motivation. In: Smarandache F, Aslam M, eds. *Cognitive Intelligence with Neutrosophic Statistics in Bioinformatics*. Cognitive Data Science in Sustainable Computing. Academic Press; 2023:173-187. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99456-9.00021-0>
30. Toms R, Singh R. CHAPTER 37 - Cardiac Defects: Anatomy and Physiology. In: Maheshwari A, ed. *Principles of Neonatology*. Elsevier; 2024:299-316. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-69415-5.00037-0>
31. Hannouch A, Lemenand T, Khoury K, Habchi C. Heat and mass transfer of preterm neonates nursed inside incubators - A review. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2020;18:100553. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100553>
32. Li H. Chapter 13 - Impacts of Pavement Strategies on Human Thermal Comfort: 13.4.8 Metabolic Rate. In: Li H, ed. *Pavement Materials for Heat Island Mitigation*. Butterworth-Heinemann; 2016:281-306. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803476-7.00013-1>
33. Djongyang N, Tchinda R, Njomo D. Thermal comfort - A review paper: 4.2.5 Metabolic effect. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010;14(9):2626-2640. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.040>

34. Rossi R. I - Comfort and thermoregulatory requirements in cold weather clothing: 1.1 Introduction. In: Williams JT, ed. *Textiles for Cold Weather Apparel*. Woodhead Publishing Series in Textiles. Woodhead Publishing; 2009:3-18. doi:<https://doi.org/10.1533/9781845697174.1.3>
35. Saltveit ME. MEASURING RESPIRATION. In: 2003. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:51776013>
36. Ķīmiskā rūpniecība un tās saskarnozares – ķīmija, farmācija, biotehnoloģija, vide profesionālās kvalifikācijas “Vides tehniks.” Valsts izglītības centrs. Accessed June 26, 2024. https://registri.visc.gov.lv/profizglitiba/dokumenti/pke/mod/ki_404pp_mp.pdf
37. Renschler CS, Doyle MW, Thoms M. Geomorphology and ecosystems: Challenges and keys for success in bridging disciplines. *Geomorphology*. 2007;89(1):1-8. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.07.011>
38. Mackey KRM, Paytan A. Phosphorus Cycle. In: Schaechter M, ed. *Encyclopedia of Microbiology (Third Edition)*. Third Edition. Academic Press; 2009:322-334. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-012373944-5.00056-0>
39. Takai K. The nitrogen cycle: A large, fast, and mystifying cycle. *Microbes Environ*. 2019;34(3):223-225. doi:10.1264/jsme2.ME3403rh
40. Borduas N, Donahue NM. Chapter 3.1 - The Natural Atmosphere. In: Török B, Dransfield T, eds. *Green Chemistry*. Elsevier; 2018:131-150. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809270-5.00006-6>
41. Yaman C. A Review on the Process of Greenhouse Gas Inventory Preparation and Proposed Mitigation Measures for Reducing Carbon Footprint. *Gases*. 2024;4(1):18-40. doi:10.3390/gases4010002
42. Ye X, Zhang B, Dawson J, et al. Arctic Oceanic Carbon Cycle: A Comprehensive Review of Mechanisms, Regulations, and Models. *Water (Switzerland)*. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. 2024;16(12). doi:10.3390/w16121667
43. Zitscher T, Kaltschmitt M. Sustainable Carbon Utilization for a Climate-Neutral Economy—Framework Necessities and Assessment Criteria. *Energies (Basel)*. 2024;17(16). doi:10.3390/en1716118
44. Murphy DJ. Biological Carbon Sequestration: From Deep History to the Present Day. *Earth (Switzerland)*. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. 2024;5(2):195-213. doi:10.3390/earth5020010
45. Gowlett JAJ. The discovery of fire by humans: A long and convoluted process. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. *Royal Society of London*. 2016;371(1696). doi:10.1098/rstb.2015.0164
46. Redlin M, Gries T. Anthropogenic climate change: the impact of the global carbon budget. *Theor Appl Climatol*. 2021;146(1-2):713-721. doi:10.1007/s00704-021-03764-0
47. Florides GA, Christodoulides P. Global warming and carbon dioxide through sciences. *Environ Int*. 2009;35(2):390-401. doi:10.1016/j.envint.2008.07.007
48. Kabir M, Habiba UE, Khan W, et al. Climate change due to increasing concentration of carbon dioxide and its impacts on environment in 21st century; a mini review. *J King Saud Univ Sci*. 2023;35(5):102693. doi:10.1016/j.jksus.2023.102693
49. Speck O, Speck T. Is a Forest Fire a Natural Disaster? Investigating the Fire Tolerance of Various Tree Species-An Educational Module. Published online 2024. doi:10.3390/biomimetics
50. Castro PJ, Araújo JMM, Martinho G, Pereira AB. Waste Management Strategies to Mitigate the Effects of Fluorinated Greenhouse Gases on Climate Change. *Applied Sciences*. 2021;11(10). doi:10.3390/app11104367
51. Dadkhah M, Tulliani JM. Nanostructured Metal Oxide Semiconductors towards Greenhouse Gas Detection. *Chemosensors*. 2022;10(2). doi:10.3390/chemosensors10020057
52. Lu QB. Major Contribution of Halogenated Greenhouse Gases to Global Surface Temperature Change. *Atmosphere (Basel)*. 2022;13(9). doi:10.3390/atmos13091419
53. Yoro KO, Daramola MO. Chapter 1 - CO2 emission sources, greenhouse gases, and the global warming effect. In: Rahimpour MR, Farsi M, Makarem MA, eds. *Advances in Carbon Capture*. Woodhead Publishing; 2020:3-28. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819657-1.00001-3>
54. Zhang X, Shen L, Zhang L. Life cycle assessment of the air emissions during building construction process: A case study in Hong Kong. *Renewable and Sustainable*

- Energy Reviews*. 2013;17:160-169. doi:10.1016/j.rser.2012.09.024
55. Caro D. Carbon Footprint. In: *Encyclopedia of Ecology*. Elsevier; 2019:252-257. doi:10.1016/B978-0-12-409548-9.10752-3
56. ESRS E1: klimata pārmaiņas – klimata pārmaiņu mazināšana 1/16/24. 2024. Accessed April 14, 2026. <https://mindlink.lv/esrs-e1-klimata-parmainas-klimata-parmainu-mazinasana-11624>
57. Moore GA. Technology and social communication. *Technol Soc*. 1996;18(2):253-260. doi:[https://doi.org/10.1016/0160-791X\(96\)00002-4](https://doi.org/10.1016/0160-791X(96)00002-4)
58. Rosell J, Blasco R. The early use of fire among Neanderthals from a zooarchaeological perspective. *Quat Sci Rev*. 2019;217:268-283. doi:<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.03.002>
59. Carroll LSL. A comprehensive definition of technology from an ethological perspective. *Soc Sci*. 2017;6(4). doi:10.3390/socsci6040126
60. Jaber JO. Prospects of energy savings in residential space heating. *Energy Build*. 2002;34(4):311-319. doi:[https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00118-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00118-9)
61. Huang Y, Xiao D, Burton-Freeman BM, Edirisinghe I. Chemical Changes of Bioactive Phytochemicals during Thermal Processing. In: *Reference Module in Food Science*. Elsevier; 2016. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.03055-9>
62. Johnson S, Burns D. 5.21 - Space Reactor Technology Development. In: Konings RJM, Stoller RE, eds. *Comprehensive Nuclear Materials (Second Edition)*. Second Edition. Elsevier; 2020:707-734. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11610-8>
63. Karpovich E, Kombaev T, Gueraiche D, Evdokimova D, Alexandrov K. Long-Endurance Mars Exploration Flying Vehicle: A Project Brief. *Aerospace*. 2023;10(11). doi:10.3390/aerospace10110965
64. Toklu E, Güney MS, Işık M, Comaklı O, Kaygusuz K. Energy production, consumption, policies and recent developments in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010;14(4):1172-1186. doi:10.1016/j.rser.2009.12.006
65. Pudasainee D, Kurian V, Gupta R. 2 - Coal: Past, Present, and Future Sustainable Use. In: Letcher TM, ed. *Future Energy (Third Edition)*. Third Edition. Elsevier; 2020:21-48. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102886-5.00002-5>
66. Yin C. 4 - Coal and biomass cofiring: CFD modeling. In: Suárez-Ruiz I, Díez MA, Rubiera F, eds. *New Trends in Coal Conversion*. Woodhead Publishing; 2019:89-116. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102201-6.00004-2>
67. Caillat S, Vakkilainen E. 9 - Large-scale biomass combustion plants: an overview. In: Rosendahl L, ed. *Biomass Combustion Science, Technology and Engineering*. Woodhead Publishing Series in Energy. Woodhead Publishing; 2013:189-224. doi:<https://doi.org/10.1533/9780857097439.3.189>
68. Zhou L. Chapter 3 - Fundamentals of Combustion Theory. In: Zhou L, ed. *Theory and Modeling of Dispersed Multiphase Turbulent Reacting Flows*. Butterworth-Heinemann; 2018:15-70. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813465-8.00003-X>
69. Chong CT, Ng JH. Chapter 4 - Combustion performance of biojet fuels. In: Chong CT, Ng JH, eds. *Biojet Fuel in Aviation Applications*. Elsevier; 2021:175-230. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822854-8.00002-0>
70. Okawa T, Asano H, Ito K, et al. 3 - Fundamentals for power engineering. In: Koizumi Y, Okawa T, Mori S, eds. *Fundamentals of Thermal and Nuclear Power Generation*. Vol 1. JSME Series in Thermal and Nuclear Power Generation. Elsevier; 2021:77-226. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820733-8.00003-0>
71. Jenkins RG. Chapter 16 - Thermal Gasification of Biomass – A Primer. In: Dahiya A, ed. *Bioenergy*. Academic Press; 2015:261-286. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407909-0.00016-X>
72. Morales-Máximo M, López-Sosa LB, Alvarado-Flores JJ, et al. Multifactorial Assessment of the Bioenergetic Potential of Residual Biomass of Pinus spp. in a Rural Community: From Functional Characterization to Mapping of the Available Energy Resource. *Fire*. 2023;6(8). doi:10.3390/fire6080317
73. Funahashi N. 22 - Steam turbine roles and necessary technologies for stabilization of the electricity grid in the

- renewable energy era. In: Tanuma T, ed. *Advances in Steam Turbines for Modern Power Plants*. Woodhead Publishing; 2017:521-537. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100314-5.00022-1>
74. Schili Y, Loubar K, Tarabet L, Cerdoun M, Lacroix C. Computational Investigation of the Influence of Combustion Chamber Characteristics on a Heavy-Duty Ammonia Diesel Dual Fuel Engine. *Energies (Basel)*. 2024;17(5):1231. doi:10.3390/en17051231
75. Tolley A. 10 - Heavy-duty vehicles and powertrains: technologies and systems that enable 'zero' air quality and greenhouse gas emissions with enhanced levels of efficiency**Q. Xin and C. F. Pinzon are the original authors of the previous edition and not contributing to this edition. In: Folkson R, Sapsford S, eds. *Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance (Second Edition)*. Second Edition. Woodhead Publishing Series in Energy. Woodhead Publishing; 2022:263-289. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90979-2.00014-7>
76. Yıldız İ. 1.12 Fossil Fuels. In: Dincer I, ed. *Comprehensive Energy Systems*. Elsevier; 2018:521-567. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00111-5>
77. SINGH J. ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL ASPECTS OF BIO-ENERGY PRODUCTIVITY. In: Chartier P, Ferrero GL, Henius UM, Hultberg S, Sachau J, Wiinblad M, eds. *Biomass for Energy and the Environment*. Pergamon; 1996:1865-1868. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-042849-9.50072-0>
78. Mishra P, Krishnan S, Rana S, Singh L, Sakinah M, Ab Wahid Z. Outlook of fermentative hydrogen production techniques: An overview of dark, photo and integrated dark-photo fermentative approach to biomass. *Energy Strategy Reviews*. 2019;24:27-37. doi:<https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.01.001>
79. Bhatia SC. 1 - Energy resources and their utilisation. In: Bhatia SC, ed. *Advanced Renewable Energy Systems*. Woodhead Publishing India; 2014:1-31. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-269-3.50001-2>
80. Taipabu MI, Viswanathan K, Wu W, Aziz M, Kuo PC, Madhankumar S. Co-production of Bi-methanol From Biomass. In: *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*. Elsevier; 2024. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15740-0.00036-7>
81. Han JS. *Properties of Nonwood Fiber*. 1998. Accessed September 12, 2024. <https://www.fpl.fs.usda.gov/documnts/pdf1998/han98a.pdf>
82. Jahan MS, Gunter BG, Rahman AFMA. Substituting Wood with Nonwood Fibers in Papermaking: A Win-Win Solution for Bangladesh. *SSRN Electronic Journal*. Published online December 28, 2011. doi:10.2139/ssrn.1322292
83. Demirbas A. Biodiesel production from vegetable oils via catalytic and non-catalytic supercritical methanol transesterification methods. *Prog Energy Combust Sci*. 2005;31(5):466-487. doi:<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2005.09.001>
84. Balat M. Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: A review. *Energy Convers Manag*. 2011;52(2):858-875. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.08.013>
85. Amin N, Aslam M, Khan Z, et al. Municipal solid waste treatment for bioenergy and resource production: Potential technologies, techno-economic-environmental aspects and implications of membrane-based recovery. *Chemosphere*. 2023;323:138196. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138196>
86. Rifna EJ, Dwivedi M, Seth D, Pradhan RC, Sarangi PK, Tiwari BK. Transforming the potential of renewable food waste biomass towards food security and supply sustainability. *Sustain Chem Pharm*. 2024;38:101515. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101515>
87. DePaolo DJ. Erratum to: Sustainable carbon emissions: The geologic perspective — CORRIGENDUM. *MRS Energy & Sustainability*. 2015;2(1):14. doi:10.1557/mre.2015.15
88. Becker S, Bouzdine-Chameeva T, Jaegler A. The carbon neutrality principle: A case study in the French spirits sector. *J Clean Prod*. 2020;274:122739. doi:10.1016/j.jclepro.2020.122739
89. Maduta C, Melica G, D'Agostino D, Bertoldi P. Towards a decarbonised building stock by 2050: The

- meaning and the role of zero emission buildings (ZEBs) in Europe. *Energy Strategy Reviews*. 2022;44:101009. doi:10.1016/j.esr.2022.101009
90. Nwokolo SC, Singh R, Khan S, Kumar A. Key players in net zero technology. In: *Technological Pathways for Africa's Net-Zero Economy*. Elsevier; 2025:193-215. doi:10.1016/B978-0-443-31486-5.00007-0
91. United Nations Framework Convention on Climate Change. A Beginner's Guide to Climate Neutrality. February 2021. Accessed October 2, 2025. <https://unfccc.int/news/a-beginner-s-guide-to-climate-neutrality>
92. Xie W, Aryanpur V, Deane P, Daly HE. Negative emissions technologies in energy system models and mitigation scenarios - a systematic review. *Appl Energy*. 2025;380:125064. doi:10.1016/j.apenergy.2024.125064
93. Pour N. Status of bioenergy with carbon capture and storage—potential and challenges. In: *Bioenergy with Carbon Capture and Storage*. Elsevier; 2019:85-107. doi:10.1016/B978-0-12-816229-3.00005-3
94. Barbarossa V, Vanga G, Viscardi R, Gattia DM. CO₂ as Carbon Source for Fuel Synthesis. *Energy Procedia*. 2014;45:1325-1329. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.138>
95. Green C, Byrne KA. Biomass: Impact on Carbon Cycle and Greenhouse Gas Emissions. In: *Encyclopedia of Energy*. Elsevier; 2004:223-236. doi:10.1016/B0-12-176480-X/00418-6
96. Islam MM, Hasanuzzaman M, Pandey AK, Rahim NA. Chapter 2 - Modern energy conversion technologies. In: Hasanuzzaman MD, Rahim NA, eds. *Energy for Sustainable Development*. Academic Press; 2020:19-39. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814645-3.00002-X>
97. Steinbach J, Ragwitz M, Kranzl L, Wien TU. Mapping and analyses of the current and future (2020-2030) heating/cooling fuel deployment (fossil/renewables) Work package 1: Final energy consumption for the year 2012 Final repo. Published online 2020. doi:10.13140/RG.2.2.29193.75361
98. Ritchie H. Primary, secondary, final, and useful energy: Why are there different ways of measuring energy? *Our World in Data*. Published online 2022.
99. Suzanne Hulscher. Chapter 1 - Basic energy concepts. University of Twente The Netherlands. Accessed October 8, 2024. <https://www.fao.org/4/u2246e/u2246e02.htm#:~:text=Pprimary%20energy%20is%20the%20energy,in%20an%20end%2Duse%20application.>
100. Altawell N, ed. 12 - Energy technologies and energy storage systems for sustainable development. In: *Rural Electrification*. Academic Press; 2021:231-248. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822403-8.00012-6>
101. Zbroński D, Otwinowski H, Górecka-Zbrońska A, Urbaniak D, Wyleciał T. Analysis of Changes in Electricity Generation from Renewable Energy Sources after Poland's Accession to Structures of the European Union. *Energies (Basel)*. 2023;16(12). doi:10.3390/en16124794
102. Keiner D, Barbosa LDSNS, Bogdanov D, et al. Global-local heat demand development for the energy transition time frame up to 2050. *Energies (Basel)*. 2021;14(13). doi:10.3390/en14133814
103. Santamouris M, Vasilakopoulou K. Present and future energy consumption of buildings: Challenges and opportunities towards decarbonisation. *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*. 2021;1:100002. doi:<https://doi.org/10.1016/j.prime.2021.100002>
104. Hasanuzzaman M, Islam MA, Rahim NA, Yanping Y. Chapter 3 - Energy demand. In: Hasanuzzaman MD, Rahim NA, eds. *Energy for Sustainable Development*. Academic Press; 2020:41-87. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814645-3.00003-1>
105. Ding Y, Dreimol CH, Zboray R, et al. Passive climate regulation with transpiring wood for buildings with increased energy efficiency. *Mater Horiz*. 2022;10(1):257-267. doi:10.1039/d2mh01016j
106. Mcmillan C, Boardman R, Mckellar M, Sabharwall P, Ruth M, Bragg-Sitton S. *Generation and Use of Thermal Energy in the U.S. Industrial Sector and Opportunities to Reduce Its Carbon Emissions*. 2016. <http://www.inl.gov>
107. Ong BHY, Bhadbhade N, Olsen DG, Wellig B. Characterizing sector-wide thermal energy profiles for industrial sectors. *Energy*. 2023;282:129028. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129028>

108. Zhang S, Yang F, Liu C, et al. Study on global industrialization and industry emission to achieve the 2 °C goal based on message model and LMDI approach. *Energies (Basel)*. 2020;13(4). doi:10.3390/en13040825
109. Chanthakett A, Arif MT, Khan MMK, Subhani M. Chapter 4 - Hydrogen production from municipal solid waste using gasification method. In: Khan MMK, Azad AK, Oo AMT, eds. *Hydrogen Energy Conversion and Management*. Elsevier; 2024:103-131. doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15329-7.00012-0
110. Li J, Yang L, Long H. Climatic impacts on energy consumption: Intensive and extensive margins. *Energy Econ*. 2018;71:332-343. doi:https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.03.010
111. Botzen WJW, Nees T, Estrada F. Temperature effects on electricity and gas consumption: Empirical evidence from Mexico and projections under future climate conditions. *Sustainability (Switzerland)*. 2021;13(1):1-28. doi:10.3390/su13010305
112. Hepf C, Gottkehaschamp B, Miller C, Auer T. International Comparison of Weather and Emission Predictive Building Control. *Buildings*. 2024;14(1). doi:10.3390/buildings14010288
113. Geikins A, Borodinecs A, Daksa G, Bogdanovics R, Zajecs D. Typology of Unclassified Buildings and Specifics of Input Parameters for Energy Audits in Latvia. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol 290. Institute of Physics Publishing; 2019. doi:10.1088/1755-1315/290/1/012131
114. Olsson D, Filipsson P, Trüschel A. Weather Forecast Control for Heating of Multi-Family Buildings in Comparison with Feedback and Feedforward Control. *Energies (Basel)*. 2024;17(1). doi:10.3390/en17010261
115. Bumanis G, Bajare D. Case Study of EPS Aggregate Insulation Material Used in Construction Sites. *Environmental and Climate Technologies*. 2024;28(1):21-31. doi:10.2478/rtuect-2024-0003
116. Selivanovs J, Blumberga D, Ziemele J, Blumberga A, Barisa A. Research of woody biomass drying process in pellet production. *Environmental and Climate Technologies*. 2012;10(1):46-50. doi:10.2478/v10145-012-0017-7
117. Polikarpova I, Lauka D, Blumberga D, Vigants E. Multi-Criteria Analysis to Select Renewable Energy Solution for District Heating System. *Environmental and Climate Technologies*. 2019;23(3):101-109. doi:10.2478/rtuect-2019-0082
118. Stennikov V, Mednikova E, Postnikov I, Penkovskii A. Optimization of the Effective Heat Supply Radius for the District Heating Systems. *Environmental and Climate Technologies*. 2019;23(2):207-221. doi:10.2478/rtuect-2019-0064
119. Interreg. *District Heating in North-West Europe: A Guide for Energy Consumers*. 2020.
120. Liu C, Tang Y, Sun L, et al. Effects of local heating of body on human thermal sensation and thermal comfort. *Journal of Building Engineering*. 2022;53:104543. doi:https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104543
121. Hooshmand SM, Zhang H, Javidanfar H, Zhai Y, Wagner A. A review of local radiant heating systems and their effects on thermal comfort and sensation. *Energy Build*. 2023;296:113331. doi:https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113331
122. Balode L, Zlaugotne B, Gravelins A, et al. Carbon Neutrality in Municipalities: Balancing Individual and District Heating Renewable Energy Solutions. *Sustainability (Switzerland)*. 2023;15(10). doi:10.3390/su15108415
123. Kramens J, Svedovs O, Sturmane A, Vigants E, Kirsanovs V, Blumberga D. Exploring Energy Security and Independence for Small Energy Users: A Latvian Case Study on Unleashing Stirling Engine Potential. *Sustainability (Switzerland)*. 2024;16(3). doi:10.3390/su16031224
124. Dincer I, Bicer Y. Fundamentals of energy systems. In: *Integrated Energy Systems for Multigeneration*. Elsevier; 2020:33-83. doi:10.1016/B978-0-12-809943-8.00002-9
125. Kubba S. Impact of Energy and Atmosphere. In: *Handbook of Green Building Design and Construction*. Elsevier; 2012:385-492. doi:10.1016/B978-0-12-385128-4.00009-3
126. Zhang J, Cho H, Mago PJ. Energy conversion systems and Energy storage systems. In: *Energy Services Fundamentals and Financing*. Elsevier; 2021:155-179. doi:10.1016/B978-0-12-820592-1.00007-5

127. Jacques Joyard. Distribution of biomass on the planet. In: *Encyclopedia of the Environment*. 2025.
128. Santoro M, Cartus O, Carvalhais N, et al. The global forest above-ground biomass pool for 2010 estimated from high-resolution satellite observations. *Earth Syst Sci Data*. 2021;13(8):3927-3950. doi:10.5194/essd-13-3927-2021
129. Wigneron JP, Ciais P, Li X, et al. Global carbon balance of the forest: satellite-based L-VOD results over the last decade. *Frontiers in Remote Sensing*. 2024;5. doi:10.3389/frsen.2024.1338618
130. *The State of the World's Forests 2024*. FAO; 2024. doi:10.4060/cd1211en
131. Bar-On YM, Phillips R, Milo R. The biomass distribution on Earth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2018;115(25):6506-6511. doi:10.1073/pnas.1711842115
132. Peng L, Searchinger TD, Zions J, Waite R. The carbon costs of global wood harvests. *Nature*. 2023;620(7972):110-115. doi:10.1038/s41586-023-06187-1
133. Ahuja SC, Ahuja U. Traditional utilization of paddy straw, husk, and bran. In: *AsianAgri-History*. Vol 17. 2013. <https://www.researchgate.net/publication/293082476>
134. Klemczak B, Kucharczyk-Brus B, Sulimowska A, Radziejewicz-Winnicki R. Historical Evolution and Current Developments in Building Thermal Insulation Materials—A Review. *Energies (Basel)*. 2024;17(22):5535. doi:10.3390/en17225535
135. Sikhosana TS, Malebo NJ, Mofokeng TG, Motloung MP, Mochane MJ. Sawdust as a Byproduct of Wood Processing: Properties, Applications and a Reinforcing Filler in Hybrid Polymer Composites. *Polymers (Basel)*. 2025;17(11):1523. doi:10.3390/polym17111523
136. Ahmed ATMF, Islam MZ, Mahmud MS, Sarker ME, Islam MR. Hemp as a potential raw material toward a sustainable world: A review. *Heliyon*. 2022;8(1):e08753. doi:10.1016/j.heliyon.2022.e08753
137. *Global Forest Resources Assessment 2020*. FAO; 2020. doi:10.4060/ca8753en
138. The Research Agency of the Forestry Commission. *Forestry Statistics 2025 Chapter 9: International Forestry*. 2025. Accessed November 5, 2025. https://cdn.forestresearch.gov.uk/2025/09/FS2025_Ch9.pdf
139. Scarlat N, Martinov M, Dallemand JF. Assessment of the availability of agricultural crop residues in the European Union: Potential and limitations for bioenergy use. *Waste Management*. 2010;30(10):1889-1897. doi:10.1016/j.wasman.2010.04.016
140. Soumare A, Diedhiou AG, Thuita M, et al. Exploiting Biological Nitrogen Fixation: A Route Towards a Sustainable Agriculture. *Plants*. 2020;9(8):1011. doi:10.3390/plants9081011
141. Schreefel L, Schulte RPO, de Boer IJM, Schrijver AP, van Zanten HHE. Regenerative agriculture – the soil is the base. *Glob Food Sec*. 2020;26:100404. doi:10.1016/j.gfs.2020.100404
142. Food and Agriculture Organization of the United Nations. *Voluntary Guidelines for Sustainable Soil Management*. 2017.
143. Valsts meža dienests. Meža īpašniekiem. Accessed November 5, 2025. https://www.vmd.gov.lv/lv/meza-ipasniekiem?utm_source=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F
144. Ingka Investments completes forestland acquisition in the Baltics from Södra. 2026. Accessed March 31, 2026. <https://www.ingka.com/newsroom/ingka-investments-completes-forestland-acquisition-in-the-baltics-from-sodra/>
145. Lursoft IT. TOP 20 lielākie mežu īpašnieki. 2021. Accessed November 5, 2025. <https://blog.lursoft.lv/2021/09/23/top-20-lielakie-mezu-ipasnieki/>
146. Centrālās statistikas pārvalde. Lauksaimniecībā izmantojamās zemes platības reģionos, novados un pagastos (ha). Oficiālās statistikas portāls. Accessed October 4, 2025. https://data.stat.gov.lv/pxweb/lv/OSP_OD/OSP_OD__skait_apsek_zeme_laukskait_20/LSK20-II01_01.px/
147. Abolina E, Volk TA, Lazdina D. GIS based agricultural land availability assessment for the establishment of short rotation woody crops in Latvia. *Biomass Bioenergy*. 2015;72:263-272. doi:10.1016/j.biombioe.2014.10.026
148. Centrālās statistikas pārvalde. Enerģobilance, TJ, tūkst.toe (NACE 2. red.) 2008 - 2024. Oficiālās statistikas portāls. Accessed October 2, 2025.

- https://data.stat.gov.lv/pxweb/lv/OSP_PUB/START_NOZ_EN_ENB/ENB060/
149. *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future*. 1987.
 150. Mesa JA, Sierra-Fontalvo L, Ortegon K, Gonzalez-Quiroga A. Advancing circular bioeconomy: A critical review and assessment of indicators. *Sustain Prod Consum*. 2024;46:324-342. doi:10.1016/j.spc.2024.03.006
 151. Choi HS, Grethe H, Entenmann SK, Wiesmeth M, Blesl M, Wagner M. Potential trade-offs of employing perennial biomass crops for the bioeconomy in the EU by 2050: Impacts on agricultural markets in the EU and the world. *GCB Bioenergy*. 2019;11(3):483-504. doi:10.1111/gcbb.12596
 152. Jarre M, Petit-Boix A, Priefer C, Meyer R, Leipold S. Transforming the bio-based sector towards a circular economy - What can we learn from wood cascading? *For Policy Econ*. 2020;110:101872. doi:10.1016/j.forpol.2019.01.017
 153. Eiropas Komisija. Biomāsas kaskādveida izmantošanas vadlīnijas ar izvēlētiem labas prakses piemēriem, kā izmantot koksnes biomasu. doi:10.2873/580364
 154. Muscat A, de Olde EM, de Boer IJM, Ripoll-Bosch R. The battle for biomass: A systematic review of food-feed-fuel competition. *Glob Food Sec*. 2020;25:100330. doi:10.1016/j.gfs.2019.100330
 155. Petersen AM, Aneke MC, Görgens JF. Techno-economic comparison of ethanol and electricity coproduction schemes from sugarcane residues at existing sugar mills in Southern Africa. *Biotechnol Biofuels*. 2014;7(1):105. doi:10.1186/1754-6834-7-105
 156. Cheng G, Zhao Y, Pan S, Wang X, Dong C. A comparative life cycle analysis of wheat straw utilization modes in China. *Energy*. 2020;194:116914. doi:10.1016/j.energy.2020.116914
 157. Zanetti M, Costa C, Greco R, Grigolato S, Ottaviani Aalmo G, Cavalli R. How Wood Fuels' Quality Relates to the Standards: A Class-Modelling Approach. *Energies (Basel)*. 2017;10(10):1455. doi:10.3390/en10101455
 158. ENplus kvalitātes sistēma. Accessed October 4, 2025. <https://enplus-pellets.eu/language/lv/a-quality-scheme-lv/>
 159. Toscano G, De Francesco C, Gasperini T, Fabrizi S, Duca D, Ilari A. Quality Assessment and Classification of Feedstock for Bioenergy Applications Considering ISO 17225 Standard on Solid Biofuels. *Resources*. 2023;12(6):69. doi:10.3390/resources12060069
 160. Drobniak A, Jelonek Z, Mastalerz M, Jelonek I, Widziewicz-Rzońca K. Quality assessment of biomass pellets available on the market; example from Poland. *Environmental Science and Pollution Research*. 2024;31(23):33942-33959. doi:10.1007/s11356-024-33452-1
 161. Bozell JJ, Landucci R. *Alternative Feedstocks Program Technical and Economic Assessment: Thermal/Chemical and Bioprocessing Components*. 1993. doi:10.2172/939508
 162. Jones JM, Lea-Langton AR, Ma L, Pourkashanian M, Williams A. The Combustion of Solid Biomass. In: 2014:25-43. doi:10.1007/978-1-4471-6437-1_3
 163. Van Loo Sjaak, Koppejan Jaap. *The Handbook of Biomass Combustion and Co-Firing*. First edition. (Van Loo Sjaak, Koppejan Jaap, eds.). 2008. Accessed June 17, 2024. <https://renewable-carbon.eu/news/book-presentation-the-handbook-of-biomass-combustion-and-co-firing/>
 164. Agrela F, Cabrera M, Morales MM, Zamorano M, Alshaaer M. Biomass fly ash and biomass bottom ash. In: *New Trends in Eco-Efficient and Recycled Concrete*. Elsevier; 2018:23-58. doi:10.1016/B978-0-08-102480-5.00002-6
 165. Cid N, Patiño D, Pérez-Orozco R, Porteiro J. Performance analysis of a small-scale electrostatic precipitator with biomass combustion. *Biomass Bioenergy*. 2022;162. doi:10.1016/j.biombioe.2022.106500
 166. Zhang L, Zhai H, He J, Yang F, Wang S. Application of Exergy Analysis in Flue Gas Condensation Waste Heat Recovery System Evaluation. *Energies (Basel)*. 2022;15(20). doi:10.3390/en15207525
 167. Feng Y, Li Y, Cui L, Yan L, Zhao C, Dong Y. Cold condensing scrubbing method for fine particle reduction from saturated flue gas. *Energy*. 2019;171:1193-1205. doi:10.1016/j.energy.2019.01.065
 168. Sung JH, Kim S, Kim S, Han B, Kim YJ, Kim H. Development of an Integrated Electrostatic Precipitator and Wet Scrubber System for Controlling No x and

- Particulate Matter Emissions From a Semiconductor Manufacturing Process. *IEEE Trans Ind Appl.* 2020;PP:1. doi:10.1109/TIA.2020.3023670
169. Vassilev S V, Baxter D, Andersen LK, Vassileva CG, Morgan TJ. An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass. *Fuel.* 2012;94:1-33. doi:https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.09.030
170. Johnson DM. *Biomass Combustion.* https://www.uaex.uada.edu
171. VETO 100: TESTS RESULTS OF THE BOILER TESTING ACCORDING TO EN 303-5:2012. Accessed March 23, 2026. https://energiteknik.net/wp-content/uploads/2019/02/EN303_5_report_VETO-100_hake_VTT-S-01297_17.pdf
172. Nussbaumer T. Primary and Secondary Measures for the Reduction of Nitric Oxide Emissions from Biomass Combustion. In: *Developments in Thermochemical Biomass Conversion.* Springer Netherlands; 1997:1447-1461. doi:10.1007/978-94-009-1559-6_113
173. Zhakupov D, Kulmukanova L, Sarbassov Y, Shah D. Flue gas analysis for biomass and coal co-firing in fluidized bed: process simulation and validation. *Int J Coal Sci Technol.* 2022;9(1):59. doi:10.1007/s40789-022-00531-y
174. Halvorsen BM, Adhikari U, Eikeland MS. Gasification of Biomass for Production of Syngas for Biofuel. In: *Proceedings of the 56th Conference on Simulation and Modelling (SIMS 56), October, 7-9, 2015, Linköping University, Sweden.* Vol 119. Linköping University Electronic Press; 2015:255-260. doi:10.3384/ecp15119255
175. Basu P. Pyrolysis. In: *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction.* Elsevier; 2018:155-187. doi:10.1016/B978-0-12-812992-0.00005-4
176. Khan A, Arif M, Sharma K, Salama ES. Bio-oil and aviation production: applications and upgradation. In: *Artificial Intelligence in Biofuels Production.* Elsevier; 2026:123-154. doi:10.1016/B978-0-443-26718-5.00007-5
177. BIO-OIL MARKET OVERVIEW. 2026. Accessed March 23, 2026. https://www.businessresearchinsights.com/market-reports/bio-oil-market-118915
178. Bird JO, Chivers PJ. 40 - Heat energy. In: Bird JO, Chivers PJ, eds. *Newnes Engineering and Physical Science Pocket Book.* Newnes; 1993:307-313. doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-1683-6.50043-6
179. Belyakov N. Chapter One - Concept of energy. In: Belyakov N, ed. *Sustainable Power Generation.* Academic Press; 2019:3-22. doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817012-0.00010-4
180. Akram MW, Hasanuzzaman M. Chapter 1 - Fundamentals of thermal energy and solar system integration. In: Hasanuzzaman M, ed. *Technologies for Solar Thermal Energy.* Academic Press; 2022:1-24. doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823959-9.00003-9
181. Islas J, Manzini F, Masera O, Vargas V. Chapter Four - Solid Biomass to Heat and Power. In: Lago C, Caldes N, Lechón Y, eds. *The Role of Bioenergy in the Bioeconomy.* Academic Press; 2019:145-177. doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813056-8.00004-2
182. Fitts CR. Chapter 12 - Subsurface heat flow and geothermal energy. In: Fitts CR, ed. *Groundwater Science (Third Edition).* Third Edition. Academic Press; 2024:581-612. doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811455-1.00018-6
183. Kud K, Woźniak M, Badora A. Impact of the energy sector on the quality of the environment in the opinion of energy consumers from southeastern poland. *Energies (Basel).* 2021;14(17). doi:10.3390/en14175551
184. Syrtsova E, Pyzhev A, Zander E. Social, Economic, and Environmental Effects of Electricity and Heat Generation in Yenisei Siberia: Is there an Alternative to Coal? *Energies (Basel).* 2023;16(1). doi:10.3390/en16010212
185. KLAVINS M, BISTERS V, BURLAKOV J. Small scale gasification application and perspectives in circular economy. *Environmental and Climate Technologies.* 2020;22(1):42-54. doi:10.2478/rtuct-2018-0003
186. Bohvalovs G, Vanaga R, Brakovska V, Freimanis R, Blumberga A. Energy Community Measures Evaluation via Differential Evolution Optimization. *Environmental and Climate Technologies.* 2022;26(1):606-615. doi:10.2478/rtuct-2022-0046

187. Narbutis J, Vanaga R. Revolutionizing the Building Envelope: A Comprehensive Scientific Review of Innovative Technologies for Reduced Emissions. *Environmental and Climate Technologies*. 2023;27(1):724-737. doi:10.2478/rtuct-2023-0053
188. Albatayneh A, Alterman D, Page A, Moghtaderi B. The significance of temperature based approach over the energy based approaches in the buildings thermal assessment. *Environmental and Climate Technologies*. 2017;19(1):39-50. doi:10.1515/rtuct-2017-0004
189. Nagpal H, Spriet J, Murali MK, McNabola A. Heat recovery from wastewater—a review of available resource. *Water (Switzerland)*. 2021;13(9). doi:10.3390/w13091274
190. Wehbi Z, Taher R, Faraj J, Lemenand T, Mortazavi M, Khaled M. Waste Water Heat Recovery Systems types and applications: Comprehensive review, critical analysis, and potential recommendations. *Energy Reports*. 2023;9:16-33. doi:https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.05.243
191. Abugabbara M. *Modelling and Simulation of the Fifth-Generation District Heating and Cooling*. 2021. doi:10.13140/RG.2.2.18483.96809
192. Yuan X, Liang Y, Hu X, Xu Y, Chen Y, Kosonen R. Waste heat recoveries in data centers: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023;188:113777. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113777
193. Narloch P, Rosicki Ł. Using waste heat from data centers in different climate zones. *BUILDER*. 2020;272(3):56-59. doi:10.5604/01.3001.0013.8482
194. Lazarou S, Christodoulou C, Vita V. Global Change Assessment Model (GCAM) considerations of the primary sources energy mix for an energetic scenario that could meet Paris agreement. In: *2019 54th International Universities Power Engineering Conference, UPEC 2019 - Proceedings*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2019. doi:10.1109/UPEC.2019.8893507
195. Russia's War on Ukraine: Analysing the impacts on energy markets and energy security. Accessed March 31, 2026. <https://www.iea.org/topics/russias-war-on-ukraine>
196. How the Iran war could trigger a European energy crisis. 2026. Accessed March 31, 2026. <https://www.atlanticcouncil.org/dispatches/how-the-iran-war-could-trigger-a-european-energy-crisis/>
197. Ekpeni LEN, Benyounis KY, Nkem-Ekpeni F, Stokes J, Olabi AG. Energy Diversity through Renewable Energy Source (RES) – A Case Study of Biomass. *Energy Procedia*. 2014;61:1740-1747. doi:https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.202
198. Andreev O, Lomakina O, Aleksandrova A. Diversification of structural and crisis risks in the energy sector of the ASEAN member countries. *Energy Strategy Reviews*. 2021;35:100655. doi:https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100655
199. Ślusarz G, Gołębiewska B, Cierpiał-Wolan M, Gołębiewski J, Twaróg D, Wójcik S. Regional diversification of potential, production and efficiency of use of biogas and biomass in Poland. *Energies (Basel)*. 2021;14(3). doi:10.3390/en14030742
200. District Heating. Accessed March 31, 2026. <https://www.iea.org/energy-system/buildings/district-heating>
201. JASPERS guide to decarbonisation of district heating systems. Accessed March 31, 2026. <https://jaspers.eib.org/files/library/2024/jaspers-guide-to-decarbonisation-of-district-heating-systems.pdf>
202. IEA Bioenergy. *Implementation of bioenergy in the European Union – 2024*. 2024.
203. Centrālās statistikas pārvalde. Katlumājās patērētais kurināmais un saražotā siltumenerģija, TJ 2012 - 2024. Oficiālās statistikas portāls. Accessed March 31, 2026. https://data.stat.gov.lv/pxweb/lv/OSP_PUB/START__NOZ__EN__ENB/ENB110/
204. Ministru kabineta 2021. gada 7. janvāra noteikumi Nr. 17 “Noteikumi par gaisa piesārņojuma ierobežošanu no sadedzināšanas iekārtām.” Accessed March 31, 2026. <https://likumi.lv/ta/id/320182>
205. Centrālās statistikas pārvalde. Katlumāju skaits, siltumenerģijas jauda un saražotā siltumenerģija 2007 - 2024. Oficiālās statistikas portāls. Accessed March 31, 2026. https://data.stat.gov.lv/pxweb/lv/OSP_PUB/START__NOZ__EN__ENB/ENB090/
206. Centrālās statistikas pārvalde. Koģenerācijas stacijās patērētais kurināmais, saražotā siltumenerģija un elektroenerģija 2012 - 2024. Oficiālās statistikas portāls. Accessed March 31, 2026.

- https://data.stat.gov.lv/pxweb/lv/OSP_PUB/START_NOZ_EN_ENB/ENB140/
207. Centrālās statistikas pārvalde. Mājokļu sadalījums pēc ēkas tipa un īpašuma formas (%). Oficiālās statistikas portāls. Accessed March 31, 2026. https://data.stat.gov.lv/pxweb/lv/OSP_OD/OSP_OD_a_psekojumi_energ_pat/EPM120.px/
 208. Centrālās statistikas pārvalde. Apsekojumā novērtēto mājokļu skaits, tūkst. Oficiālās statistikas portāls. Accessed March 31, 2026. https://data.stat.gov.lv/pxweb/lv/OSP_OD/OSP_OD_a_psekojumi_energ_pat/EPM100.px/
 209. Centrālās statistikas pārvalde. Apkurināmā platība un mājokļu skaits, kas saņem siltumu no ārējā piegādātāja. Oficiālās statistikas portāls. Accessed March 31, 2026. https://data.stat.gov.lv/pxweb/lv/OSP_OD/OSP_OD_a_psekojumi_energ_pat/EPM180.px/
 210. Yuan R, Pu J, Wu D, et al. Research Priorities and Trends on Bioenergy: Insights from Bibliometric Analysis. *Int J Environ Res Public Health*. 2022;19(23):15881. doi:10.3390/ijerph192315881
 211. Ferrari G, Pezzuolo A, Nizami AS, Marinello F. Bibliometric analysis of trends in biomass for bioenergy research. *Energies (Basel)*. MDPI AG. 2020;13(14). doi:10.3390/en13143714
 212. Keles S, Kar T, Bahadır A, Kaygusuz K. *Renewable Energy from Woody Biomass in Turkey*. 2017. www.journaleras.com
 213. Wei Z, Cheng Z, Shen Y. Recent development in production of pellet fuels from biomass and polyethylene (PE) wastes. *Fuel*. 2024;358:130222. doi:10.1016/j.fuel.2023.130222
 214. World Bioenergy Association. GLOBAL BIOENERGY STATISTICS 2022. Accessed April 16, 2026. <https://www.worldbioenergy.org/uploads/221223%20WBA%20GBS%202022.pdf>
 215. Licite L, Cunsakis J. Analysis of wood pellet production in Latvia. In: 2019:168-176. doi:10.22616/ESRD.2019.072
 216. Logan Clow. *Wood Pellets Annual*. 2024. Accessed April 16, 2026. https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Wood%20Pellets%20Annual_London_United%20Kingdom_UK2024-0033
 217. Matheus TT, Farrapo AC, Lagunes RM, Filleti R, Garcia DP, Lopes Silva DA. The effect of transportation choices for mitigating climate-related impacts: The case of solid biofuels exported to Europe produced by Latin American countries. *Sustain Prod Consum*. 2024;45:551-566. doi:10.1016/j.spc.2024.01.022
 218. *Pellets: Bioenergy Europe Statistical Report*. 2025. www.bioenergyeurope.org
 219. Centrālās statistikas pārvaldes. *Foreign Trade in Goods. Wood Pellets. Main Export Partners*. Accessed April 16, 2026. <https://eksports.csb.gov.lv/en/years/products-selected/export/2005-2023-2021/TOTAL-IX-44-4401-440131/TOTAL>
 220. Centrālās statistikas pārvalde. Kurināmā koksne sadalījumā pa veidiem, ražošana, imports, eksports un patēriņš, naturālās mērvienībās (NACE 2.red.). Accessed April 16, 2026. <https://stat.gov.lv/lv/statistikas-temas/noz/energetika/tabulas/ena030-kurinama-koksne-sadalijuma-pa-veidiem-razosana>
 221. Baiba Krastiņa. Granulu cenas atslābušas. Cik daudz straujā kāpuma laikā nopelnījusi ražotāji . 2024. Accessed April 16, 2026. https://www.delfi.lv/bizness/37264250/biznesa_vidē/56254680/granulu-cenas-atslabusas-cik-daudz-straucha-kapuma-laika-nopelnijusi-razotaji#google_vignette
 222. Centrālās statistikas pārvalde. Latvijas ārējā tirdzniecība. Latvijas ārējā tirdzniecība pēc valsts. Baltkrievija. Accessed April 16, 2026. <https://eksports.csb.gov.lv/lv/months/countries-selected/import/2023M10/TOTAL-IX-44-4401-440131/BY>
 223. Centrālās statistikas pārvalde. Latvijas ārējā tirdzniecība. Latvijas ārējā tirdzniecība pēc valsts. Krievija. Accessed April 16, 2026. <https://eksports.csb.gov.lv/lv/months/countries-selected/import/2023M10/TOTAL-IX-44-4401-440131/RU>
 224. Centrālās statistikas pārvalde. Energoresursu vidējās cenas gala patērētājiem (bez PVN). Accessed April 16, 2026. <https://stat.gov.lv/lv/statistikas-temas/noz/energetika/tabulas/enc010-energoresursu-videjas-cenas-gala-pateretajiem-bez>
 225. Directorate-General for Communication. Types of legislation. Accessed November 3, 2025.

- https://european-union.europa.eu/institutions-law-budget/law/types-legislation_en
226. The European Green Deal: Striving to be the first climate-neutral continent. European Commission 2023. 2020. Accessed October 25, 2023. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
227. European Climate Law. European Commission 2023. 2021. Accessed October 25, 2023. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/european-climate-law_en
228. Circular economy action plan. European Commission 2023. 2020. Accessed October 25, 2023. https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en
229. Ari I, Yikmaz RF. Chapter 4 - Greening of industry in a resource- and environment-constrained world. In: Acar S, Yeldan E, eds. *Handbook of Green Economics*. Academic Press; 2019:53-68. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816635-2.00004-3>
230. Deutz P. Circular Economy. In: Kobayashi A, ed. *International Encyclopedia of Human Geography (Second Edition)*. Second Edition. Elsevier; 2020:193-201. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102295-5.10630-4>
231. Hysa E, Çela A. Circularity, environment, and sustainable development. In: *Reference Module in Social Sciences*. Elsevier; 2023. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-44-313776-1.00096-9>
232. Kirchherr J, Yang NHN, Schulze-Spüntrup F, Heerink MJ, Hartley K. Conceptualizing the Circular Economy (Revisited): An Analysis of 221 Definitions. *Resour Conserv Recycl*. 2023;194:107001. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107001>
233. Revision of the Renewable Energy Directive: Fit for 55 package. 2023. Accessed March 23, 2026. [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI\(2021\)698781](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI(2021)698781)
234. EU policymakers agree on new restrictions on forest biomass in the Renewable Energy Directive. 2023. Accessed March 23, 2026. <https://forestdefenders.org/eu-policymakers-agree-on-new-restrictions-on-forest-biomass-in-the-renewable-energy-directive/>
235. Bognar J, Springer K. *THE RENEWABLE ENERGY DIRECTIVE & FOREST MONITORING*. 2023.
236. *Guidance for Implementation of the RED Forest Biomass Criteria*. 2024.
237. Komisijas Regula (ES) 2015/1189 (2015. gada 28. aprīlis), ar ko Eiropas Parlamenta un Padomes Direktīvu 2009/125/EK īsteno attiecībā uz ekodizaina prasībām cietā kurināmā katliem . April 28, 2015.
238. Komisijas Deleģētā Regula (ES) 2015/1187 (2015. gada 27. aprīlis), ar ko Eiropas Parlamenta un Padomes Direktīvu 2010/30/ES papildina attiecībā uz cietā kurināmā katlu un cietā kurināmā katla, papildu sildītāju, temperatūras regulatoru un saules enerģijas iekārtu komplektu energomarkējumu . April 27, 2015.
239. Energy Labelling Directive. 2024. Accessed March 30, 2026. <https://www.eceec.org/policy-areas/directives-regulations/energy-labelling/>
240. Solid fuel boilers. Accessed March 30, 2026. <https://eprel.ec.europa.eu/screen/product/solidfuelboilers>
241. Latvian Bioeconomy Strategy 2030. 2017. Accessed March 30, 2026. <https://leap.unep.org/en/countries/lv/national-legislation/latvian-bioeconomy-strategy-2030>
242. Latvia's path to energy transition: Expanding renewable energy and investing in storage solutions. 2025. Accessed March 30, 2026. <https://interreg-baltic.eu/project-posts/energy-equilibrium/latvias-path-to-energy-transition-expanding-renewable-energy-and-investing-in-storage-solutions/>
243. Informācija par Emisijas kvotu izsolīšanas instrumentu. Accessed March 30, 2026. <https://ekii.lv/index.php?page=par-ekii>
244. Komisijas Deleģētā regula (ES) 2023/2830 (2023. gada 17. oktobris), ar ko papildina Eiropas Parlamenta un Padomes Direktīvu 2003/87/EK, nosakot noteikumus par siltumnīcefekta gāzu emisijas kvotu izsolīšanas laika grafiku, administrēšanu un citiem aspektiem. 2023. Accessed March 30, 2026. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/lv/ALL/?uri=CELEX:32023R2830>
245. Likums "Par piesārņojumu." Accessed March 30, 2026. <https://likumi.lv/ta/id/6075>

246. Ministru kabineta 2012. gada 25. septembra noteikumi Nr. 657 "Latvijai piešķirto emisijas kvotu izsolišanas kārtība." Accessed March 30, 2026. <https://likumi.lv/ta/id/251851>
247. Public procurement. Accessed March 30, 2026. https://policy.trade.ec.europa.eu/help-exporters-and-importers/accessing-markets/public-procurement_en
248. Padomes secinājumi par ilgtspējīga publiskā iepirkuma attīstību (2022/C 236/02). 2022. Accessed March 30, 2026. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LV/TXT/HTML/?uri=CELEX:52022XG0620\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LV/TXT/HTML/?uri=CELEX:52022XG0620(01))
249. Green Public Procurement.
250. Zaļais publiskais iepirkums. 2024. Accessed March 30, 2026. <https://www.varam.gov.lv/lv/zalais-publiskais-iepirkums#:~:text=Za%C4%BCais%20publiskais%20iepirkums%20Latvij%C4%81, pie%C5%86emti%20Ministru%20kabineta%20noteikumi%20Nr.>
251. Ministru kabineta 2017. gada 20. jūnija noteikumi Nr. 353 "Prasības zaļajam publiskajam iepirkumam un to piemērošanas kārtība." Accessed March 30, 2026. <https://likumi.lv/ta/id/291867>
252. Viedās administrācijas un reģionālās attīstības ministrija. Aprites cikla izmaksu kalkulators. Accessed March 30, 2026. <https://zpiacik.varam.gov.lv/>
253. Awasthi AK, Cheela VRS, D'Adamo I, et al. Zero waste approach towards a sustainable waste management. *Resources, Environment and Sustainability. Elsevier B.V.* 2021;3. doi:10.1016/j.resenv.2021.100014
254. *World Without Waste Report*. 2021. Accessed October 27, 2023. <https://www.coca-colacompany.com/content/dam/company/us/en/reports/pdf/coca-cola-world-without-waste-report-2021.pdf#page-6>
255. EIROPAS PARLAMENTA UN PADOMES DIREKTĪVA (ES) 2018/2001 par no atjaunojamajiem energoresursiem iegūtas enerģijas izmantošanas veicināšanu (RED II). 2018. Accessed April 2, 2026. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LV/TXT/HTML/?uri=CELEX:32018L2001>
256. Eiropas Komisija. Voluntary schemes. Accessed April 16, 2026. https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/bioenergy/voluntary-schemes_en
257. Sustainability assurance for biomass according to the current Renewable Energy Directive (EU) 2018/2001 (RED). Accessed April 16, 2026. <https://sure-system.org/en-us/sure-eu>
258. KOMISIJAS ĪSTENOŠANAS LĒMUMS (ES) 2024/3191, ar kuru brīvprātīgo shēmu Sustainable Biomass Program atzīst par tādu, kas attiecībā uz biomasas kurināmajiem/degvielām spēj pierādīt atbilstību Eiropas Parlamenta un Padomes Direktīvas (ES) 2018/2001 prasībām, un ar kuru atceļ Īstenošanas lēmumu (ES) 2022/1657. 2024. Accessed April 16, 2026. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LV/TXT/HTML/?uri=OJ:L_202403191
259. SBP reports 19% volume growth as certified biomass tops 22 million tonnes. 2026. Accessed April 16, 2026. <https://www.bioenergy-news.com/news/sbp-reports-19-volume-growth-as-certified-biomass-tops-22-million-tonnes/>
260. Eiropas Parlamenta un Padomes Regula (ES) 2020/852 par regulējuma izveidi ilgtspējīgu ieguldījumu veicināšanai un ar ko groza Regulu (ES) 2019/2088. 2020. Accessed April 16, 2026. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LV/TXT/?uri=CELEX:32020R0852>
261. KC R, Aalto M, Korpinen OJ, Ranta T, Proskurina S. Lifecycle Assessment of Biomass Supply Chain with the Assistance of Agent-Based Modelling. *Sustainability*. 2020;12(5):1964. doi:10.3390/su12051964
262. Rincione R, Longo S, Cellura M, Guarino F, Brunetti A. Life Cycle Assessment of Wood Chips from Residual Biomass: A Case Study. *International Journal of Sustainable Development and Planning*. 2023;18(7):2253-2258. doi:10.18280/ijdp.180730
263. Saelee S, Paweewan B, Tongpool R, Wittoon T, Takada J, Manusboonpurmpool K. Biomass Type Selection for Boilers Using TOPSIS Multi-Criteria Model. *International Journal of Environmental Science and Development*. Published online 2014:181-186. doi:10.7763/IJESD.2014.V5.474
264. Romero-Perdomo F, González-Curbelo MÁ. Integrating Multi-Criteria Techniques in Life-Cycle Tools for the Circular Bioeconomy Transition of Agri-Food Waste Biomass: A Systematic Review. *Sustainability*. 2023;15(6):5026. doi:10.3390/su15065026
265. Martín-Gamboa M, Dias LC, Quinteiro P, Freire F, Arroja L, Dias AC. Multi-Criteria and Life Cycle Assessment of Wood-Based Bioenergy Alternatives for

- Residential Heating: A Sustainability Analysis. *Energies (Basel)*. 2019;12(22):4391. doi:10.3390/en12224391
266. Agar DA, Hansen P, Rudolfsson M, Blagojević B. Combining behavioural TOPSIS and six multi-criteria weighting methods to rank biomass fuel pellets for energy use in Sweden. *Energy Reports*. 2023;10:706-718. doi:10.1016/j.egyr.2023.07.007
 267. Picchio R, Latterini F, Venanzi R, et al. Pellet Production from Woody and Non-Woody Feedstocks: A Review on Biomass Quality Evaluation. *Energies (Basel)*. 2020;13(11):2937. doi:10.3390/en13112937
 268. Jach-Nocoń M, Pełka G, Luboń W, Mirowski T, Nocoń A, Pachtyl P. An Assessment of the Efficiency and Emissions of a Pellet Boiler Combusting Multiple Pellet Types. *Energies (Basel)*. 2021;14(15):4465. doi:10.3390/en14154465
 269. Pinho R, Borges ADS. Comprehensive Evaluation of Combustion Performance and Emissions from Commercial Pellets in Small-Scale Boilers. *Energies (Basel)*. 2025;18(13):3545. doi:10.3390/en18133545
 270. Sgarbossa A, Boschiero M, Pierobon F, Cavalli R, Zanetti M. Comparative Life Cycle Assessment of Bioenergy Production from Different Wood Pellet Supply Chains. *Forests*. 2020;11(11):1127. doi:10.3390/f11111127
 271. Martín-Gamboa M, Marques P, Freire F, Arroja L, Dias AC. Life cycle assessment of biomass pellets: A review of methodological choices and results. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020;133:110278. doi:10.1016/j.rser.2020.110278
 272. Sadaghiani S, Mafakheri F, Chen Z. Life Cycle Assessment of Bioenergy Production Using Wood Pellets: A Case Study of Remote Communities in Canada. *Energies (Basel)*. 2023;16(15):5697. doi:10.3390/en16155697
 273. Kubule A, Klavina K, Romagnoli F, Kenga K, Rosa M, Blumberga D. *Study on Availability of Herbaceous Resources for Production of Solid Biomass Fuels in Latvia*. Vol 11. 2013.
 274. Dzikveics M, Sturmane A, Svedovs O, et al. Sankey-Based Material Flow Analysis of Residual Biomass for Combustion: A Case Study of Latvia. *Environmental and Climate Technologies*. 2025;29(1):483-499. doi:10.2478/rtuct-2025-0033
 275. Eller F, Guo X, Ye S, Mozdzer TJ, Brix H. Suitability of Wild Phragmites australis as Bio-Resource: Tissue Quality and Morphology of Populations from Three Continents. *Resources*. 2020;9(12):143. doi:10.3390/resources9120143
 276. Köbbing JF, Thevs N, Zerbe S. The Utilisation of Reed (Phragmites Australis): A Review. *Mires and Peat*. 2013;13. doi:10.19189/001c.129325
 277. Baute K, Van Eerd LL, Robinson DE, Sikkema PH, Mushtaq M, Gilroyed BH. Comparing the Biomass Yield and Biogas Potential of Phragmites australis with Miscanthus x giganteus and Panicum virgatum Grown in Canada. *Energies (Basel)*. 2018;11(9):2198. doi:10.3390/en11092198
 278. Čubars E, Noviks G. EVALUATION OF REED RECOURCES IN THE LUBANS LAKE AND SUBSTANTIATION OF THEIR USE IN ENERGY PRODUCTION. *Environment Technology Resources Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. 2015;1:66. doi:10.17770/etr2009vol1.1092
 279. Čubars E, Noviks G. EVALUATION OF REED RESOURCES IN KURZEME REGION IN LATVIA. 2012.
 280. Izejviela, kuru nemākam novērtēt. Plašās salmu izmantošanas iespējas. 2020. Accessed March 13, 2026. <https://www.la.lv/salmus-izmantot-var-plasak>
 281. Kviešu salmu bezvadu datorpele V8326. Accessed March 13, 2026. <https://www.idejudruka.lv/prece/elektronika/datorpeles/kviesu-salmu-bezvadu-datorpele-v8326/>
 282. Ahmed ATMF, Islam MZ, Mahmud MS, Sarker ME, Islam MR. Hemp as a potential raw material toward a sustainable world: A review. *Heliyon. Elsevier Ltd*. 2022;8(1). doi:10.1016/j.heliyon.2022.e08753
 283. Ranalli P, Venturi G. Hemp as a raw material for industrial applications. *Euphytica*. 2004;140(1-2):1-6. doi:10.1007/s10681-004-4749-8
 284. Branca C, Di Blasi C. Thermal degradation behavior and kinetics of industrial hemp stalks and shives. *Thermochim Acta*. 2021;697:178878. doi:10.1016/j.tca.2021.178878
 285. Shewalul YW, Quiroz NF, Streicher D, Walls R. Fire behavior of hemp blocks: A biomass-based construction material. *Journal of Building Engineering*. 2023;80:108147. doi:10.1016/j.jobe.2023.108147

286. Hemp. Accessed March 16, 2026. https://agriculture.ec.europa.eu/farming/crop-productions-and-plant-based-products/hemp_en
287. Narkotisko un psihotropo vielu un zāļu, kā arī prekursoru likumīgās aprites likums. Latvijas Vēstnesis. 1996. Accessed September 16, 2023. <https://likumi.lv/ta/id/40283>
288. *OECD-FAO Agricultural Outlook 2025-2034*. OECD Publishing; 2025. doi:10.1787/601276cd-en
289. Solanki C, Mridula D, Kudos SKA, Gupta RK. Buckwheat Dehuller and Optimization of Dehulling Parameters. *Int J Curr Microbiol Appl Sci*. 2018;7(11):1041-1052. doi:10.20546/ijcmas.2018.711.120
290. 2024. gadā iegūta par 16,1 % lielāka graudu kopražā nekā gadu iepriekš. 2025. Accessed March 13, 2026. <https://stat.gov.lv/lv/statistikas-temas/noz/lauksaimn/preses-reizes/22353-lauksaimniecibas-kulturaugu-sejumu-platibas-un>
291. Sunflower seed production, 2024. 2025. Accessed March 19, 2026. <https://ourworldindata.org/grapher/sunflower-seed-production>
292. Sunflower hulls and sunflower screenings. 2018. Accessed March 19, 2026. <https://www.feedipedia.org/node/733>
293. Bianco A, Melito S, Garau M, et al. The potential use of brewers' spent grain-based substrates as horticultural bio-fertilizers. *Front Sustain Food Syst*. 2024;8. doi:10.3389/fsufs.2024.1404914
294. López-Aguilar HA, Pérez-Hernández A, Monreal-Romero HA, Meléndez CL, Peralta-Pérez M del R, Serna FJZD de la. Anaerobic Co-Digestion of Brewers' Spent Grain from Craft Beer and Cattle Manure for Biogas Production. *World*. 2025;6(3):118. doi:10.3390/world6030118
295. DRABIŅU NAŠĶIS LR11-B. Accessed March 13, 2026. https://saldaismirkklis.lv/index.php?route=product/product&product_id=10052
296. Drabiņu cepumi – SIA VALMIERMUIŽAS ALUS. Accessed March 13, 2026. <https://valmiermuiza.lv/products/drabinu-cepumi>
297. Dancker P, Glas K, Gastl M. Potential utilisation methods for brewer's spent grain: a review. *Int J Food Sci Technol*. 2025;60(1). doi:10.1093/ijfood/vvae022
298. Agrawal D, Gopaliya D, Willoughby N, Khare SK, Kumar V. Recycling potential of brewer's spent grains for circular biorefineries. *Curr Opin Green Sustain Chem*. 2023;40:100748. doi:10.1016/j.cogsc.2022.100748
299. Latvijas uzņēmumu saraksts. 11.05 | Alus ražošana. Accessed March 16, 2026. <https://nace.lursoft.lv/2.1/11.05/alus-razosana/companies?year=2025>
300. Arranz JI, Sepúlveda FJ, Montero I, Romero P, Miranda MT. Feasibility Analysis of Brewers' Spent Grain for Energy Use: Waste and Experimental Pellets. *Applied Sciences*. 2021;11(6):2740. doi:10.3390/app11062740
301. Invasive Alien Species Fact Sheet Solidago Canadensis. 2010. Accessed March 19, 2026. <https://docslib.org/doc/7580836/invasive-alien-species-fact-sheet-solidago-canadensis>
302. Zhang F, Wan F. Canada Goldenrod Solidago canadensis L. In: *Biological Invasions and Its Management in China*. Springer Singapore; 2017:143-151. doi:10.1007/978-981-10-3427-5_10
303. Priede A. Invasive Non-Native Solidago Species in Latvia: Expansion History and Current Distribution. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences, Section B: Natural, Exact, and Applied Sciences*. 2008;62(1-2):78-83. doi:10.2478/v10046-008-0003-4
304. Solidago canadensis (SOOCA): Distribution details in Latvia. 2022. Accessed March 19, 2026. <https://gd.eppo.int/taxon/SOOCA/distribution/LV>
305. *Assessment of Invasive Alien Species in Latvia Part I: A Cost-Efficiency Analysis of Piloted Control Methods for Five Invasive Species*.
306. Nurmatov N, Leon Gomez D, Hensgen F, Böhle L, Wachendorf M. High-Quality Solid Fuel Production from Leaf Litter of Urban Street Trees. *Sustainability*. 2016;8(12):1249. doi:10.3390/su8121249
307. Piepenschneider M, Nurmatov N, Böhle L, Hensgen F, Wachendorf M. Chemical Properties and Ash Slagging Characteristics of Solid Fuels from Urban Leaf Litter. *Waste Biomass Valorization*. 2016;7(3):625-633. doi:10.1007/s12649-015-9457-1

308. Zianis D, Muukkonen P, Mäkipää R, Mencuccini M. SILVA FENNICA Monographs 4 · 2005 Biomass and Stem Volume Equations for Tree Species in Europe. <http://www.metla.fi/silvafennica/full/smf/smf004.pdf>
309. Selbig WR. Evaluation of leaf removal as a means to reduce nutrient concentrations and loads in urban stormwater. *Science of The Total Environment*. 2016;571:124-133. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.07.003
310. Czubaszek R, Wysocka-Czubaszek A, Banaszuk P, Zajac G, Wassen MJ. Grass from Road Verges as a Substrate for Biogas Production. *Energies (Basel)*. 2023;16(11):4488. doi:10.3390/en16114488
311. Kumar S, Das R, Parida SK. Potential of grass families as reinforcement material in composites: A review. In: 2023:050006. doi:10.1063/5.0144142
312. Springer TL. Biomass yield from an urban landscape. *Biomass Bioenergy*. 2012;37:82-87. doi:10.1016/j.biombioe.2011.12.029
313. Sittig DF. 1 - Category Definitions. In: Sittig DF, ed. *Clinical Informatics Literacy*. Academic Press; 2017:1-170. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803206-0.00001-8>
314. Koo M, Lin SC. An analysis of reporting practices in the top 100 cited health and medicine-related bibliometric studies from 2019 to 2021 based on a proposed guidelines. *Heliyon*. 2023;9(6):e16780. doi:10.1016/j.heliyon.2023.e16780
315. Prince George's Community College. Bibliographic Information. June 26, 2024. Accessed September 16, 2024. <https://pgcc.libguides.com/c.php?g=60038&p=385730>
316. Shahwani H, Attique Shah S, Ashraf M, Akram M, Jeong J (Paul), Shin J. A comprehensive survey on data dissemination in Vehicular Ad Hoc Networks. *Vehicular Communications*. 2022;34:100420. doi:<https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2021.100420>
317. Yuan R, Pu J, Wu D, et al. Research Priorities and Trends on Bioenergy: Insights from Bibliometric Analysis. *Int J Environ Res Public Health*. 2022;19(23). doi:10.3390/ijerph192315881
318. Dzikevics M, Jaunzems D, Terauds M. Bibliometric Analysis of the Solar Thermal System Control Methods. *Environmental and Climate Technologies*. 2021;25:1114-1127. doi:10.2478/rtuct-2021-0084
319. Donthu N, Kumar S, Mukherjee D, Pandey N, Lim WM. How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *J Bus Res*. 2021;133:285-296. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>
320. Svedovs O, Dzikevics M, Kirsanovs V. Bibliometric Analysis of the Alternative Biomass Types and Biomass Combustion Technologies. *Environmental and Climate Technologies*. 2023;27(1):559-569. doi:10.2478/rtuct-2023-0041
321. Cucari N, Tutore I, Montera R, Profita S. A bibliometric performance analysis of publication productivity in the corporate social responsibility field: Outcomes of SciVal analytics. *Corp Soc Responsib Environ Manag. John Wiley and Sons Ltd*. 2023;30(1):1-16. doi:10.1002/csr.2346
322. Bota-Avram C. Bibliometrics Performance Analysis. In: *Science Mapping of Digital Transformation in Business: A Bibliometric Analysis and Research Outlook*. Springer Nature Switzerland; 2023:15-22. doi:10.1007/978-3-031-26765-9_3
323. Aria M, Cuccurullo C. bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *J Informetr*. 2017;11(4):959-975. doi:10.1016/j.joi.2017.08.007
324. Wang L, Zhang G, Wang Z, Liu J, Shang J, Liang L. Bibliometric analysis of remote sensing research trend in crop growth monitoring: A case study in China. *Remote Sens (Basel)*. 2019;11(7). doi:10.3390/rs11070809
325. Liu JS, Lu LYY, Lu WM. Research fronts in data envelopment analysis. *Omega (United Kingdom). Elsevier Ltd*. 2016;58:33-45. doi:10.1016/j.omega.2015.04.004
326. Kişi N. Bibliometric Analysis and Visualization of Global Research on Employee Engagement. *Sustainability (Switzerland)*. 2023;15(13). doi:10.3390/su151310196
327. Chen G, Xiao L. Selecting publication keywords for domain analysis in bibliometrics: A comparison of three methods. *J Informetr*. 2016;10(1):212-223. doi:<https://doi.org/10.1016/j.joi.2016.01.006>
328. Pesta B, Fuerst J, Kirkegaard EOW. Bibliometric keyword analysis across seventeen years (2000–2016) of intelligence articles. *J Intell*. 2018;6(4):1-12. doi:10.3390/jintelligence6040046

329. Okubo Y. Bibliometric indicators and analysis of research systems : methods and examples. In: 1997. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:116373669>
330. Toom K. Chapter 10 - Indicators. In: Andersen J, Toom K, Poli S, Miller PF, eds. *Research Management*. Academic Press; 2018:213-230. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805059-0.00010-9>
331. Prancutė R. Web of Science (WoS) and Scopus: the titans of bibliographic information in today's academic world. *Publications. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. 2021;9(1). doi:10.3390/publications9010012
332. Moral-Munoz J, Herrera-Viedma E, Espejo A, Cobo M. Software tools for conducting bibliometric analysis in science: An up-to-date review. *El Profesional de la Información*. 2020;29. doi:10.3145/epi.2020.ene.03
333. Alexander JO. Library Applications. In: Bidgoli H, ed. *Encyclopedia of Information Systems*. Elsevier; 2003:55-76. doi:<https://doi.org/10.1016/B0-12-227240-4/00104-0>
334. Ullah R, Asghar I, Griffiths MG. An Integrated Methodology for Bibliometric Analysis: A Case Study of Internet of Things in Healthcare Applications. *Sensors*. 2023;23(1). doi:10.3390/s23010067
335. Kirby A. Exploratory Bibliometrics: Using VOSviewer as a Preliminary Research Tool. *Publications*. 2023;11(1). doi:10.3390/publications11010010
336. Allesch A, Brunner PH. Material flow analysis as a decision support tool for waste management: A literature review. *J Ind Ecol*. 2015;19(5):753-764. doi:10.1111/jiec.12354
337. Blengini G, Andrea, Haas Willi, Mayer Andreas, Nita Viorel, Nuss Philip, Pennington David. *Development of a Sankey Diagram of Material Flows in the EU Economy Based on Eurostat Data : Monitoring of Non-Energy & Non-Food Material Flows in the EU-28 for the EC Raw Materials Information System (RMIS)*. Publications Office of the European Union; 2017.
338. Lauka D, Barisa A, Blumberga D. Assessment of the availability and utilization potential of low-quality biomass in Latvia. *Energy Procedia*. 2018;147:518-524. doi:10.1016/j.egypro.2018.07.065
339. Gonçalves M, Freire F, Garcia R. Material flow analysis of forest biomass in Portugal to support a circular bioeconomy. *Resour Conserv Recycl*. 2021;169:105507. doi:10.1016/j.resconrec.2021.105507
340. Xavier LH, Ottoni M, Abreu LPP. A comprehensive review of urban mining and the value recovery from e-waste materials. *Resour Conserv Recycl*. 2023;190:106840. doi:10.1016/j.resconrec.2022.106840
341. Scarlat N, Fahl F, Lugato E, Monforti-Ferrario F, Dallemand JF. Integrated and spatially explicit assessment of sustainable crop residues potential in Europe. *Biomass Bioenergy*. 2019;122:257-269. doi:10.1016/j.biombioe.2019.01.021
342. Guido RE, Rodríguez CR, Javi VM, Oviedo OA. A Multicriteria Gis-based Approach for Mapping Biomass Agricultural Residues Availability for Bioenergy Facilities. Preprint posted online March 30, 2023. doi:10.21203/rs.3.rs-2752086/v1
343. Weldesemayat Sileshi G, Barrios E, Lehmann J, Tubiello FN. An organic matter database (OMD): consolidating global residue data from agriculture, fisheries, forestry and related industries. *Earth Syst Sci Data*. 2025;17(2):369-391. doi:10.5194/essd-17-369-2025
344. Cencic O, Rechberger H. Material flow analysis with Software STAN. *Journal of Environmental Engineering and Management*. 2008;18:3-7.
345. Cencic O. Nonlinear data reconciliation in material flow analysis with software STAN. *Sustainable Environment Research*. 2016;26(6):291-298. doi:10.1016/j.serj.2016.06.002
346. Deshpande PC, Philis G, Brattebø H, Fet AM. Using Material Flow Analysis (MFA) to generate the evidence on plastic waste management from commercial fishing gears in Norway. *Resources, Conservation & Recycling: X*. 2020;5:100024. doi:10.1016/j.rcrx.2019.100024
347. Abiti B, Hartard S, Bradl HB, Pishva D, Ahiakpa JK. Resource Prospects of Municipal Solid Wastes Generated in the Ga East Municipal Assembly of Ghana. *J Health Pollut*. 2017;7(14):37-47. doi:10.5696/2156-9614-7.14.37
348. Klotz M, Haupt M. A high-resolution dataset on the plastic material flows in Switzerland. *Data Brief*. 2022;41:108001. doi:10.1016/j.dib.2022.108001
349. Amicarelli V, Fiore M, Bux C. Hidden flows assessment in the agri-food sector: evidence from the Italian beef

- system. *British Food Journal*. 2021;123(13):384-403. doi:10.1108/BFJ-05-2021-0547
350. Schneider JM, Ghannadzadeh A, van der Meer Y. Material flow analysis of a post-consumer plastic packaging recycling system in The Netherlands: a focus on beverage carton. *Clean Technol Environ Policy*. 2025;27(11):6099-6110. doi:10.1007/s10098-022-02342-w
351. LVS/STK/38 Kokmateriāli. *Cietais Biokurināmais. Paraugu Sagatavošana (ISO 14780:2017)*. 2017. Accessed February 2, 2026. <https://www.lvs.lv/products/135440>
352. ISO/TC 238 Solid biofuels. *Solid Biofuels Determination of Moisture Content Oven Dry Method*. 2017. Accessed February 2, 2026. <https://www.lvs.lv/lv/products/135109>
353. ISO/TC 238 Solid biofuels. *Solid Biofuels Determination of Moisture Content Oven Dry Method (ISO 18134-3:2015)*. 2015. Accessed February 2, 2026. <https://www.lvs.lv/products/94692>
354. LVS/STK/38 Kokmateriāli. *Cietais Biokurināmais. Pelnu Satura Noteikšana (ISO 18122:2015)*. 2016. Accessed February 2, 2026. <https://www.lvs.lv/lv/products/97630>
355. ISO/TC 238 Solid biofuels. *Solid Biofuels — Determination of Volatile Matter (ISO 18123:2023)*. 2023. Accessed February 2, 2026. <https://www.lvs.lv/products/158138>
356. Brockway DJ, Higgins RS. BROWN COAL SAMPLING, ANALYSIS AND COMPOSITION. In: *The Science of Victorian Brown Coal*. Elsevier; 1991:247-278. doi:10.1016/B978-0-7506-0420-8.50010-5
357. de Oliveira JL, da Silva JN, Graciosa Pereira E, Oliveira Filho D, Rizzo Carvalho D. Characterization and mapping of waste from coffee and eucalyptus production in Brazil for thermochemical conversion of energy via gasification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013;21:52-58. doi:10.1016/j.rser.2012.12.025
358. ISO/TC 238 Solid biofuels. *Solid Biofuels Determination of Total Content of Carbon, Hydrogen and Nitrogen (ISO 16948:2015)*. 2015. Accessed February 2, 2026. <https://www.lvs.lv/lv/products/93516>
359. LVS/STK/38 Kokmateriāli. *Cietais Biokurināmais. Kopējā Sēra Un Hlora Satura Noteikšana (ISO 16994:2016)*. 2016. Accessed February 2, 2026. <https://www.lvs.lv/products/132954>
360. ISO/TC 238 Solid biofuels. *Solid Biofuels Conversion of Analytical Results from One Basis to Another (ISO 16993:2016)*. 2016. Accessed February 2, 2026. <https://www.lvs.lv/products/129014>
361. LVS/STK/38 Kokmateriāli. *Cietais Biokurināmais. Siltumspējas Noteikšana (ISO 18125:2017)*. 2017. Accessed February 2, 2026. <https://www.lvs.lv/products/135427>
362. CEN/TC 335 Solid biofuels. *Cietais Biokurināmais. Pelnu Kušanas Īpašības (ISO 21404:2020)*. 2020. Accessed February 2, 2026. <https://www.lvs.lv/products/146874>
363. LVS/STK/38 Kokmateriāli. *Cietais Biokurināmais. Tilpuma Blīvuma Noteikšana (ISO 17828:2015)*. 2016. Accessed February 2, 2026. <https://www.lvs.lv/lv/products/119533>
364. LVS/STK/38 Kokmateriāli. *Cietais Biokurināmais. Granulu Un Briekšu Mehāniskās Izturības Noteikšana. 1.Daļa: Granulas (ISO 17831-1:2015)*. 2016. Accessed February 2, 2026. <https://www.lvs.lv/lv/products/97881>
365. LVS/STK/38 Kokmateriāli. *Cietais Biokurināmais. Daļiņu Izmēru Sadalījumu Noteikšana Nesaspiestajam Kurināmajam. 1.Daļa: Oscilējoša Sieta Metode Ar Sieta Atverēm Sākot No 3,15 Mm Un Lielākām (ISO 17827-1:2016)*. 2016. Accessed February 2, 2026. <https://www.lvs.lv/products/128803>
366. CEN/CLC/JWG NAWI Non automatic weighing instruments. *Neautomātisko Svaru Metroloģiskie Aspekti (LVS EN 45501:2015)*. 2015. Accessed February 5, 2026. <https://www.lvs.lv/lv/products/93859>
367. CEN/TC 57 Central heating boilers. *Apkures Katli. 5.Daļa: Cietā Kurināmā Apkures Katli Ar Manuālu Un Automātisku Kurināmā Padevi Un Nominālo Siltumatdevi Līdz 500 KW. Terminoloģija, Prasības, Testēšana Un Marķēšana (LVS EN 303-5:2021)*. 2021. Accessed February 5, 2026. <https://www.lvs.lv/lv/products/152052>
368. Kokalj F, Zadravec T, Jovovic A, Samec N. Small wood pellet boiler 3-D CFD study for improved flue gas emissions employing flue gas recirculation and air staging. *Thermal Science*. 2023;27(1 Part A):89-101. doi:10.2298/TSCI2301089K

369. CEN/TC 264 - Air quality. *Stationary Source Emissions - Determination of Volume Concentration of Oxygen - Standard Reference Method: Paramagnetism (EN 14789:2017)*. 2017. Accessed February 6, 2026. https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/327932c0-0015-462c-983b-263aa0b540b0/en-14789-2017?srsId=AfmBOooPKDcLGY2HsYEmTys_iZwXamBRojc9FpU1Dz_Zld9y6LJTZ9a1
370. CEN/TC 264 - Air quality. *Stationary Source Emissions - Determination of the Mass Concentration of Carbon Monoxide - Standard Reference Method: Non-Dispersive Infrared Spectrometry (EN 15058:2017)*. 2017. Accessed February 6, 2026. <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/7140d556-c352-4b7f-a109-b597f1040076/en-15058-2017?srsId=AfmBOoqKtCs5JTvp12rLoviQiiiYWV-oE5kGp6WQ10rekZyphklerXC>
371. ISO/TC 146/SC 1. *Stationary Source Emissions — Determination of the Mass Concentration of Nitrogen Oxides in Flue Gas — Performance Characteristics of Automated Measuring Systems (ISO 10849:2022)*. 2022. Accessed February 6, 2026. <https://www.iso.org/standard/79892.html>
372. Performance criteria and test procedures for measuring devices for monitoring emissions at small firing installations - Measuring devices for the determination of particulate emissions (VDI 4206-2:2015). Published online 2015. Accessed February 6, 2026. <https://www.vdi.de/en/home/vdi-standards/details/vdi-4206-blatt-2-performance-criteria-and-test-procedures-for-measuring-devices-for-monitoring-emissions-at-small-firing-installations-measuring-devices-for-the-determination-of-particulate-emissions>
373. Testo. *TESTO 380: Fine Particle Measuring System*. Accessed February 6, 2026. https://gastech.com/sites/default/files/Testo%20380%20datasheet_Gastech.pdf
374. Dyakov I V., Bergmans B, Idczak F, et al. Intercomparative measurements of particle emission from biomass pellet boiler with portable and stationary dilution devices. *Aerosol Science and Technology*. 2021;55(6):665-680. doi:10.1080/02786826.2021.1888865
375. CEN/TC 264 - Air quality. *Stationary Source Emissions - Determination of Low Range Mass Concentration of Dust - Part 1: Manual Gravimetric Method (EN 13284-1:2017)*. 2017. Accessed February 6, 2026. https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/39eb0f35-645e-460b-993c-6ff2a69af16c/en-13284-1-2017?srsId=AfmBOoo951Bc75n3Jv3eK7lpg_OT7n21m8buf5HP3FVxhP-xdBk4SueO
376. Ozgen S. Methods for particulate matter emission reduction from pellet boilers. *Biomass Convers Biorefin*. 2024;14(7):8189-8213. doi:10.1007/s13399-022-03045-4
377. OBAÏDULLAH Md. Particle mass and gaseous emissions from small scale modern wood stoves. *International Journal of Energy Applications and Technologies*. 2019;6(2):57-64. doi:10.31593/ijeat.518973
378. Vitoussia T, Leyssens G, Trouvé G, et al. Analysis of the combustion of pellets made with three Cameroonian biomass in a domestic pellet stove. *Fuel*. 2020;276:118105. doi:10.1016/j.fuel.2020.118105
379. Thabit Q, Nassour A, Nelles M. Flue Gas Composition and Treatment Potential of a Waste Incineration Plant. *Applied Sciences*. 2022;12(10):5236. doi:10.3390/app12105236
380. Vassilev S V., Vassileva CG, Vassilev VS. Advantages and disadvantages of composition and properties of biomass in comparison with coal: An overview. *Fuel*. 2015;158:330-350. doi:10.1016/j.fuel.2015.05.050
381. Vassilev S V, Vassileva CG, Song YC, Li WY, Feng J. Ash contents and ash-forming elements of biomass and their significance for solid biofuel combustion. *Fuel*. 2017;208:377-409. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.07.036>
382. Rodrigues A, Nunes LJR. Evaluation of ash composition and deposition tendencies of biomasses and torrefied products from woody and shrubby feedstocks: SRC poplar clones and common broom. *Fuel*. 2020;269:117454. doi:10.1016/j.fuel.2020.117454
383. Jeremy Karl Cockcroft. Instrument X-ray Optics I. Reflection Geometry. Accessed March 12, 2026. <http://pd.chem.ucl.ac.uk/pdnn/inst1/optics1.htm>
384. Bruker D8 Advance. Accessed March 17, 2026. <https://www.xray.cz/kfkl-osa/eng/d8/default.htm>
385. Crystallography Open Database. Accessed March 12, 2026. <https://www.crystallography.net/cod/>

386. Doebelin N, Kleeberg R. Profe: a graphical user interface for the Rietveld refinement program BGMN. *J Appl Crystallogr.* 2015;48(5):1573-1580. doi:10.1107/S1600576715014685
387. Sharp Dan S., Gahlinger Paul M. Regression analysis in biological research: sample size and statistical power. *Med Sci Sports Exerc.* 1988;20(6):605-610.
388. Ahmed SN. Essential statistics for data analysis. In: *Physics and Engineering of Radiation Detection.* Elsevier; 2015:541-593. doi:10.1016/B978-0-12-801363-2.00009-7
389. Trauner T, Kay C, Furniss B. *Productivity in Construction Projects.* Wiley; 2022. doi:10.1002/9781119910831
390. Palmer PB, O'Connell DG. Research Corner: Regression Analysis for Prediction: Understanding the Process. *Cardiopulm Phys Ther J.* 2009;20(3):23-26. doi:10.1097/01823246-200920030-00004
391. Laake P, Fagerland MW. Statistical Inference. In: *Research in Medical and Biological Sciences.* Elsevier; 2015:379-430. doi:10.1016/B978-0-12-799943-2.00011-2
392. Vivita Priedniece. *Mazas Jaudas Katlu Dūmgāzu Atīrīšanas Un Siltuma Atgaves Eksperimentālā Izpēte Un Modelēšana.* 2022.
393. West SG, Aiken LS, Cham H, Liu Y. *Multiple Regression.* Oxford University Press; 2013. doi:10.1093/oxfordhb/9780199793549.013.0013
394. Jankovic S. The Multivariate Statistical Analysis – Multiple Linear Regression. *International Journal on Biomedicine and Healthcare.* 2022;10(4):173. doi:10.5455/ijbh.2022.10.173-175
395. Ross SM. Regression. In: *Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientists.* Elsevier; 2021:365-451. doi:10.1016/B978-0-12-824346-6.00018-1
396. Statgraphics Technologies, Inc. Accessed April 1, 2026. <https://www.statgraphics.com/about>
397. STATGRAPHICS® Centurion 19 User Manual. 2020. Accessed April 1, 2026. https://402067.fs1.hubspotusercontent-na1.net/hubfs/402067/Manuals%20/Statgraphics_Centurion_19_User_Guide.pdf
398. Zyoud SH, Fuchs-Hanusch D. A bibliometric-based survey on AHP and TOPSIS techniques. *Expert Syst Appl.* 2017;78:158-181. doi:10.1016/j.eswa.2017.02.016
399. Erdogan S, Sayin C. Selection of the Most Suitable Alternative Fuel Depending on the Fuel Characteristics and Price by the Hybrid MCDM Method. *Sustainability.* 2018;10(5):1583. doi:10.3390/su10051583
400. Sultana A, Kumar A. Ranking of biomass pellets by integration of economic, environmental and technical factors. *Biomass Bioenergy.* 2012;39:344-355. doi:10.1016/j.biombioe.2012.01.027
401. Taherdoost H. Analysis of Simple Additive Weighting Method (SAW) as a MultiAttribute Decision-Making Technique: A Step-by-Step Guide. *Journal of Management Science & Engineering Research.* 2023;6(1):21-24. doi:10.30564/jmsr.v6i1.5400
402. Chanpuypetch W, Niemsakul J, Atthirawong W, Supeekit T. An integrated AHP-TOPSIS approach for bamboo product evaluation and selection in rural communities. *Decision Analytics Journal.* 2024;12:100503. doi:10.1016/j.dajour.2024.100503
403. Brauers WKM, Zavadskas EK. Robustness of MULTIMOORA: A Method for Multi-Objective Optimization. *Informatica.* 2012;23(1):1-25. doi:10.15388/Informatica.2012.346
404. Krishnan AR, Hamid MR, Tanakinjal GH, Asli MF, Boniface B, Ghazali MF. An investigation to offer conclusive recommendations on suitable benefit/cost criteria-based normalization methods for TOPSIS. *MethodsX.* 2023;10:102227. doi:10.1016/j.mex.2023.102227
405. Chatterjee S, Chakraborty S. A study on the effects of objective weighting methods on TOPSIS-based parametric optimization of non-traditional machining processes. *Decision Analytics Journal.* 2024;11:100451. doi:10.1016/j.dajour.2024.100451
406. Chidozie B, Ramos A, Vasconcelos J, Ferreira LP, Gomes R. Highlighting Sustainability Criteria in Residual Biomass Supply Chains: A Dynamic Simulation Approach. *Sustainability.* 2024;16(22):9709. doi:10.3390/su16229709
407. Hafezalkotob A, Hafezalkotob A, Liao H, Herrera F. An overview of MULTIMOORA for multi-criteria decision-making: Theory, developments, applications, and challenges. *Information Fusion.* 2019;51:145-177. doi:10.1016/j.inffus.2018.12.002

408. Hafezalkotob A, Hafezalkotob A, Liao H, Herrera F. Interval MULTIMOORA Method Integrating Interval Borda Rule and Interval Best–Worst-Method-Based Weighting Model: Case Study on Hybrid Vehicle Engine Selection. *IEEE Trans Cybern.* 2020;50(3):1157-1169. doi:10.1109/TCYB.2018.2889730
409. Qin J, Ma X. An IT2FS-PT3 based emergency response plan evaluation with MULTIMOORA method in group decision making. *Appl Soft Comput.* 2022;122:108812. doi:10.1016/j.asoc.2022.108812
410. Yang S, Ma K, Liu Z, Ren J, Man Y. Development and applicability of life cycle impact assessment methodologies. In: *Life Cycle Sustainability Assessment for Decision-Making.* Elsevier; 2020:95-124. doi:10.1016/B978-0-12-818355-7.00005-1
411. Liu N, Wang Y, Bai Q, et al. Road life-cycle carbon dioxide emissions and emission reduction technologies: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition).* 2022;9(4):532-555. doi:10.1016/j.jtte.2022.06.001
412. Prasad S, Singh A, Korres NE, Rathore D, Sevda S, Pant D. Sustainable utilization of crop residues for energy generation: A life cycle assessment (LCA) perspective. *Bioresour Technol.* 2020;303:122964. doi:10.1016/j.biortech.2020.122964
413. Seigné-Itoiz E, Mwabonje O, Panoutsou C, Woods J. Life cycle assessment (LCA): informing the development of a sustainable circular bioeconomy? *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences.* 2021;379(2206). doi:10.1098/rsta.2020.0352
414. Silva VL, Sanjuán N. Opening up the black box: A systematic literature review of life cycle assessment in alternative food processing technologies. *J Food Eng.* 2019;250:33-45. doi:10.1016/j.jfoodeng.2019.01.010
415. Wernet G, Bauer C, Steubing B, Reinhard J, Moreno-Ruiz E, Weidema B. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *International Journal of Life Cycle Assessment.* 2016;21(9):1218-1230. doi:10.1007/s11367-016-1087-8
416. Kuka E, Cirule D, Andersone I, Miklasevics Z, Andersons B. Life cycle inventory for currently produced pine roundwood. *J Clean Prod.* 2019;235:613-625. doi:10.1016/j.jclepro.2019.07.004
417. Dahms T. *LIFE CYCLE ASSESSMENT OF ENERGY BIOMASS FROM REWETTED PEATLANDS.*
418. Jukić Ž, Kovačev I, Čoga L, Koronc Z, Matković A, Zmaić A. *POTENTIAL AND ACTUAL QUANTITIES OF WHEAT STRAW THAT CAN BE COLLECTED ON FAMILY FARM.* <https://cabidigitallibrary.org>
419. Todde G, Carboni G, Marras S, Caria M, Sirca C. Industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) for phytoremediation: Energy and environmental life cycle assessment of using contaminated biomass as an energy resource. *Sustainable Energy Technologies and Assessments.* 2022;52:102081. doi:10.1016/j.seta.2022.102081
420. Van Meerbeek K, Appels L, Dewil R, et al. Biomass of invasive plant species as a potential feedstock for bioenergy production. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining.* 2015;9(3):273-282. doi:10.1002/bbb.1539
421. Papandrea SF, Palma A, Carnevale M, et al. Characterization of Several Pellets from Agroforestry Residues: A Comparative Analysis of Physical and Energy Efficiency. *Fire.* 2024;7(7):239. doi:10.3390/fire7070239
422. Sikkema R, Junginger M, Pichler W, Hayes S, Faaij APC. The international logistics of wood pellets for heating and power production in Europe: Costs, energy-input and greenhouse gas balances of pellet consumption in Italy, Sweden and the Netherlands. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining.* 2010;4(2):132-153. doi:10.1002/bbb.208
423. Anne T, Julia B, Rémy B, et al. Bio-waste: A Unique and Valuable Resource with Significant Recovery, Prevention and Management Challenges. *Waste Biomass Valorization.* 2025;16(6):2985-2998. doi:10.1007/s12649-024-02841-5
424. Murugan P, Dhanushkodi S, Sudhakar K, H. Wilson V. Industrial and Small-Scale Biomass Dryers: An Overview. *Energy Engineering.* 2021;118(3):435-446. doi:10.32604/EE.2021.013491
425. Turns Stephen R. *An Introduction To Combustion: Concepts and Applications.* Second edition. (Holman Jack, Lloyd John, eds.). 2000. Accessed June 17, 2024. [https://fenix.ciencias.ulisboa.pt/downloadFile/1126037345803917/An%20Introduction%20To%20Combustion.n.hm\(booksformechn.blogspot.com\).pdf](https://fenix.ciencias.ulisboa.pt/downloadFile/1126037345803917/An%20Introduction%20To%20Combustion.n.hm(booksformechn.blogspot.com).pdf)

426. Jenkins BM, Baxter LL, Miles TR, Miles TR. Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology*. 1998;54(1-3):17-46. doi:10.1016/S0378-3820(97)00059-3
427. Quinteiro P, Greco F, da Cruz Tarelho LA, Righi S, Arroja L, Dias AC. A comparative life cycle assessment of centralised and decentralised wood pellets production for residential heating. *Science of The Total Environment*. 2020;730:139162. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.139162
428. Rybaczewska-Błażejowska M, Jezierski D. Comparison of ReCiPe 2016, ILCD 2011, CML-IA baseline and IMPACT 2002+ LCIA methods: a case study based on the electricity consumption mix in Europe. *Int J Life Cycle Assess*. 2024;29(10):1799-1817. doi:10.1007/s11367-024-02326-6
429. Salazar-Sogamoso LM, Gómez-García MÁ, Dobrosz-Gómez I. Comparative life cycle assessment of sequential chemical and electrochemical processes for the treatment of industrial textile wastewater. *Journal of Solid State Electrochemistry*. 2025;29(8):3379-3399. doi:10.1007/s10008-024-05976-6
430. J G, A A, R E, L M. *Solid and Gaseous Bioenergy Pathways: Input Values and GHG Emissions: Calculated According to Methodology Set in COM(2016) 767: Version 2*. Publications Office of the European Union; 2017. doi:10.2790/98297 (print),10.2790/27486 (online)
431. *User Manual for the BioGrace Greenhouse Gas Calculation Tool for Electricity, Heating and Cooling*. Accessed June 29, 2026. <https://www.ai-raben.nl/wp-content/uploads/BioGrace-II-user-manual-version-2.pdf>
432. Ferrari G, Shi Z, Marinello F, Pezzuolo A. From biogas to biomethane: Comparison of sustainable scenarios for upgrading plant location based on greenhouse gas emissions and cost assessments. *J Clean Prod*. 2024;478:143936. doi:10.1016/j.jclepro.2024.143936
433. Kodba A, Pukšec T, Duić N. Analysis of Specific Greenhouse Gas Emissions Savings from Biogas Production Based on Agricultural Residues and Industrial By-Products. *Energies (Basel)*. 2023;16(9). doi:10.3390/en16093721
434. HURTIG Oliver, BOUTER Anne, BESSEAU Romain, BUFFI Marco, SCARLAT Nicolae. Updating GHG emission values of biofuels and biomass fuels in Annex V & VI of Directive (EU) 2018/2001. *Publications Office of the European Union*. Published online 2026. Accessed April 17, 2026. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC142012>
435. Hilgers M, Achenbach W. Vehicle and Energy Loss. In: *Fuel Consumption and Consumption Optimization*. Springer Berlin Heidelberg; 2021:5-8. doi:10.1007/978-3-662-60841-8_2
436. Siltumņīfekta gāzu emisiju aprēķina metodika. 2025. Accessed April 3, 2026. <https://www.kem.gov.lv/siltumnicekta-gazu-emisiju-aprekina-metodika>
437. Broekaert Stijn, Fontaras Georgios. *CO2 Emissions of the European Heavy-Duty Vehicle Fleet : Analysis of the 2019-2020 Reference Year Data*. Publications Office of the European Union; 2022.
438. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: CHAPTER 2 STATIONARY COMBUSTION. Accessed April 15, 2026. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_2_C_h2_Stationary_Combustion.pdf
439. Trozzi C, Jurich K, Kuenen J, et al. *EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2023 1 Category Title NFR 1.A*.
440. Munts V, Munts Y, Proshin A, Khudyakova V. Formation and reduction of nitrogen oxides in the combustion of fuels in a circulating fluidized bed. In: 2014:1173-1182. doi:10.2495/EQ141092
441. IPCC Global Warming Potential Values. Preprint posted online 2024. Accessed April 15, 2026. <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2024-08/Global-Warming-Potential-Values%20%28August%202024%29.pdf>
442. Svedovs O, Sturman A, Feofilovs M, Kirsanovs V, Romagnoli F. Comparative cradle-to-grave life cycle assessment of wood and alternative biomass pellet feedstocks for decentralized heating using experimental data. *Biomass Bioenergy*. 2026;208:108880. doi:10.1016/j.biombioe.2025.108880



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.