

Ilze Luksta

**BIOEKONOMIKAS ILGTSPĒJĪGA ATTĪSTĪBA.
LAUKSAIMNIECĪBA VIRZIENĀ UZ
KLIMATNEITRALITĀTI**

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Dabaszinātņu un tehnoloģiju fakultāte
Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts

Ilze Luksta

Doktora studiju programmas “Vides inženierija” doktorante

BIOEKONOMIKAS ILGTSPĒJĪGA ATTĪSTĪBA. LAUKSAIMNIECĪBA VIRZIENĀ UZ KLIMATNEITRALITĀTI

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskās vadītājas

profesore

Dr. habil. sc. ing. DAGNIJA BLUMBERGA

vadošā pētniece

Ph. D. ILZE VAMŽA

RTU Izdevniecība
Rīga 2025

Luksta, I. Bioekonomikas ilgtspējīga attīstība. Lauksaimniecība virzienā uz klimatneitralitāti. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2025. 54 lpp.

Publicēts saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-19” 2025. gada 29. maija lēmumu, protokols Nr. 240.12.

Šis darbs izstrādāts:

- Ar Eiropas Sociālā fonda projekta Nr. 8.2.2.0/20/I/008 “Rīgas Tehniskās universitātes un Banku augstskolas doktorantu un akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās” atbalstu.
- 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: 1038).



Vāka attēls veidots, izmantojot *ChatGPT*.

<https://doi.org/10.7250/9789934371851>

ISBN 978-9934-37-185-1 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2025. gada 26. jūnijā plkst. 14.00 Rīgas Tehniskās universitātes Dabaszinātņu un tehnoloģiju fakultātē, Āzenes ielā 12/1, 607. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Ainis Lagzdīņš,
Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitāte, Latvija

Vadošā pētniece *Ph. D.* Ilze Beila,
Kaseles Universitāte, Vācija

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

APSTIPRINĀJUMS

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

Ilze Luksta (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 35 attēli, 22 tabulas, 14 pielikumi, kopā 197 lappuses, ieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 127 nosaukumi.

SATURS

IEVADS.....	5
1. METODOLOĢIJA	11
1.1. Siltumnīcefekta gāzu emisiju analīze.....	11
1.2. <i>TIMES</i> modelis	12
Modelēšanas pieeja.....	13
Modeļu robežas un scenāriji.....	13
Datu uzskaitē	15
1.3. Micēlija siltumizolācijas materiāls	16
1.4. Sistēmdinamikas modelis.....	27
Modeļa struktūra.....	28
Datu vākšana	29
Modelēšana.....	30
2. REZULTĀTI.....	33
2.1. Siltumnīcefekta gāzu emisiju analīze.....	33
2.2. <i>TIMES</i> modelis	36
Bāzes scenārijs graudaugiem.....	36
Bāzes scenārijs augu eļļām.....	38
Bāzes scenārijs dārzeņiem.....	39
Alternatīvo scenāriju analīze	41
2.3. Micēlija siltumizolācijas materiāla rezultāti.....	43
2.4. Sistēmdinamikas modeļa rezultāti	47
Akumulētās SEG emisijas.....	48
Akumulētais enerģijas patēriņš.....	49
Atgriezeniskās saites ietekme uz novērstajām emisijām	50
SECINĀJUMI	51
ATSAUCES	52

IEVADS

Bioekonomikas attīstība mūsdienu pasaulē kļūst arvien svarīgāka, jo pieaug vides izaicinājumi un nepieciešamība līdzsvarot ekonomisko izaugsmi ar ekoloģisko ilgtspējību. Bioekonomikas jēdziens aptver dažādas bioloģiskajos resursos balstītas nozares, tostarp lauksaimniecību, mežsaimniecību, zivsaimniecību un rūpniecisko biotehnoloģiju. Šīs nozares būtiski ietekmē gan dabas resursu pieejamību, gan klimata pārmaiņas. Lauksaimniecība ir viens no primārajiem siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisiju avotiem, tāpēc tās pārveide un pielāgošanās klimatneitralitātes mērķiem ir būtisks solis ceļā uz ilgtspējīgu attīstību un bioekonomikas potenciāla pilnīgu izmantošanu.

Eiropas Savienības (ES) un starptautiskās saistības klimata pārmaiņu mazināšanas jomā uzsver pāreju uz klimatam draudzīgām tehnoloģijām un inovatīvu bioresursu izmantošanu, lai samazinātu emisijas un veicinātu oglekļneitrālu attīstību. Viena no efektīvākajām pieejām šo mērķu sasniegšanai ir blakusproduktu izmantošanas veicināšana un videi draudzīgu materiālu izstrāde, aizstājot tradicionālos sintētiskos materiālus. Pāreja uz bioekonomikas principiem lauksaimniecībā ļauj efektīvi izmantot atjaunojamus resursus, vienlaikus veicinot ilgtspējīgu lauksaimniecības sistēmu attīstību.

Lauksaimniecības nozarei jākoncentrējas uz emisiju samazināšanu, augšnes un ūdens apsaimniekošanas uzlabotas prakses veicināšanu un dažādu blakusproduktu ekonomiskās vērtības un efektivitātes novērtēšanu. Pieaugošais pieprasījums pēc ilgtspējīgiem un videi draudzīgiem produktiem rada nepieciešamību pēc inovācijām, kas ir būtiskas Latvijas ekonomikai, kur lauksaimniecībai ir nozīmīga loma. Šajā kontekstā bioekonomika sniedz iespējas izstrādāt risinājumus, kas ir saskaņoti ar klimatneitralitātes mērķiem, vienlaikus nodrošinot ekonomiskos ieguvumus. Lauksaimniecības nozarei jāpielāgojas jauniem apstākļiem un jātiecas uz lielāku ilgtspējību, vienlaikus saglabājot ražošanas efektivitāti un konkurētspēju.

Šajā pētījumā analizētas dažādas ilgtspējīgas pieejas bioresursiem. Pētījums ir vērsts uz dažādu lauksaimniecības blakusproduktu iespējamo lietojumu izvērtēšanu un videi draudzīgu materiālu izstrādi. Šie risinājumi potenciāli var radīt alternatīvus materiālus, kas ir ekonomiski dzīvotspējīgi un atbilst klimatneitralitātes mērķiem.

Problēmas aktualitāte

Lauksaimniecība ir nozīmīgs ietekmes uz vidi avots, kas rada aptuveni 10 % no kopējām SEG emisijām ES. Daļa no šīm emisijām rodas nepietiekami efektīvas lauksaimniecības blakusproduktu apsaimniekošanas dēļ. Lai samazinātu emisijas un optimizētu resursu izmantošanu, ir jāizstrādā ilgtspējīgākas blakusproduktu apstrādes un izmantošanas stratēģijas, tā veicinot klimata mērķu sasniegšanu.

Hipotēze

Bioloģisko resursu optimizācijas modelis *TIMES* (integrētas *MARKAL-EFOM* sistēmas modelis) var kalpot kā analītisks rīks efektīvākai bioresursu izmantošanai un pārejai uz augstākas pievienotās vērtības produktu ražošanu. Turklāt micēlija materiāla izmantošana ilgtspējīgas izolācijas ražošanai varētu būt nozīmīgs solis SEG emisiju samazināšanā.

Izvirzītās tēzes

1. Lauksaimniecības SEG emisiju intensitāte ES būtiski atšķiras, un tās ietekmē ne tikai lauksaimniecības prakse, bet arī politikas instrumenti, iedzīvotāju blīvums un iekšzemes kopprodukts (IKP) uz vienu iedzīvotāju. Efektīvākas emisiju pārvaldības pieejas iespējamas, ņemot vērā valstu specifisko kontekstu.
2. Optimizācijas modelis *TIMES* ir piemērots bioresursu analīzei. Modelis ļauj identificēt potenciālos risinājumus ar augstāku pievienoto vērtību, bet tā lietojums nākotnē jāpaplašina, iekļaujot reģionālu un tehnoloģiski precīzāku datubāzi.
3. Eksperimentāli izstrādātais micēlija siltumizolācijas materiāls ir perspektīvs videi draudzīgs risinājums. Tā sastāva proporciju ietekme uz siltumvadītspēju un izturību ir statistiski nozīmīga.
4. Sistēmdinamikas modelis liecina, ka micēlija materiālam ir potenciāls SEG emisiju samazināšanā ilgtermiņā, jo tas spēj piesaistīt CO₂ un aizstāt sintētiskos materiālus. Tomēr pašreizējais ražošanas process ir energoietilpīgs un prasa tālāku optimizāciju.

Pētījuma mērķis un uzdevumi

Pētījuma galvenais **mērķis** ir izstrādāt un izvērtēt ilgtspējīgus bioekonomikas risinājumus lauksaimniecības nozarē, pievēršoties bioresursu pievienotās vērtības optimizēšanai un inovācijām siltumizolācijas materiālu ražošanā, lai veicinātu pāreju uz klimatneitrālu ekonomiku.

Pētījuma galvenie **uzdevumi** ir:

- novērtēt un salīdzināt ES valstu SEG emisijas lauksaimniecības sektorā;
- analizēt bioresursu pievienoto vērtību augkopības nozarē, izmantojot *TIMES* modeli;
- eksperimentāli izstrādāt micēliju siltumizolācijas materiālu;
- salīdzināt izstrādāto micēliju un tradicionālos materiālus, ņemot vērā ietverto enerģiju un SEG emisijas.

Novitāte

Pētījuma novitāte balstīta sistēmdinamikas un *TIMES* modeļa pielāgošanā lauksaimniecības nozarei, lai ikviens varētu izmantot šos modeļus, analizējot bioloģiskos resursus un materiālus. Pētījums piedāvā jaunas iespējas lauksaimniecības blakusproduktu pārstrādei augstvērtīgos produktos, veicinot klimatneitralitātes mērķu sasniegšanu un bioekonomikas principu attīstību.

Praktiskā nozīme

Promocijas darba praktiskā nozīme izpaužas kā ieguldījums ilgtspējīgas lauksaimniecības attīstībā, sniedzot konkrētas vadlīnijas SEG emisiju samazināšanai un efektīvākai bioloģisko resursu izmantošanai. Rezultāti palīdz veicināt klimatneitralitātes mērķu sasniegšanu un izstrādāt inovatīvus videi draudzīgus produktus, vienlaikus veicinot ekonomisko izaugsmi un konkurētspēju.

Struktūra

Promocijas darbs ir strukturēts četrās galvenajās tematiskajās jomās, kas kopā veido ietvaru ceļam uz klimatneitralitāti, izmantojot ilgtspējīgas lauksaimniecības prakses un inovatīvu materiālu izstrādi.

1. Esošā situācija emisijās lauksaimniecībā. Darbs sākas ar SEG emisiju salīdzinošo analīzi Eiropas Savienības lauksaimniecības nozarē, nosakot reģionālās atšķirības un emisiju tendences.

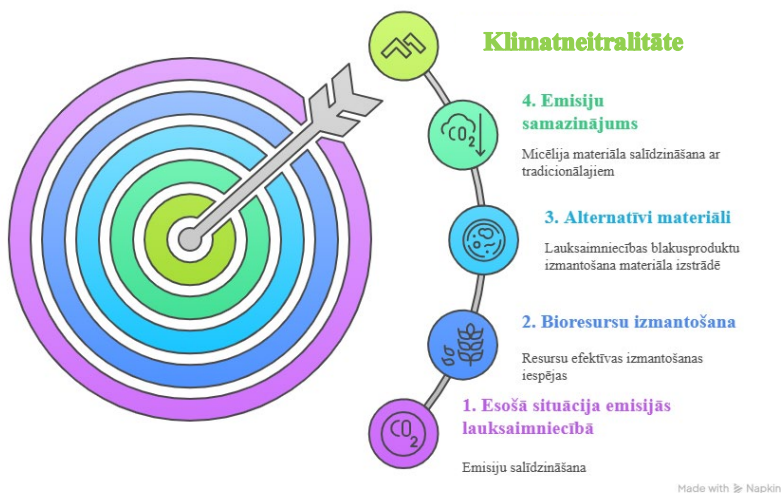
2. Bioresursu izmantošana. Tiek pētītas iespējas izmantot lauksaimniecības blakusproduktus, īpaši izmantojot *TIMES* modeli. Analizēti dažādi augu izcelsmes produkti un blakusprodukti ar potenciālu augstas pievienotās vērtības produktu ražošanai:

- šķiedras pulveris no graudaugu blakusproduktiem;
- bioplastmasa no augu atlikumiem;
- biodīzeļdegviela un bioetanolis no graudiem, eļļas augu sēklām un dārzeņu atkritumiem.

3. Alternatīvs materiāls. Eksperimentāli izstrādāts siltumizolācijas materiāls uz micēlija bāzes, izmantojot lauksaimniecības blakusproduktus. Šajā jomā tiek pētīts micēlija materiālu potenciāls kā videi draudzīgai alternatīvai tradicionālajiem izolācijas materiāliem.

4. Emisiju samazināšana. Izmantojot sistēmdinamikas analīzi, salīdzināts micēlija bāzes izolācijas materiāls ar sintētiskajiem materiāliem.

Kopā šīs četras jomas veido vienotu konceptuālo ietvaru, kas apvieno aprites ekonomikas principus un tehnoloģiskās inovācijas, lai veicinātu ilgtspējīgu lauksaimniecību un bioekonomikas attīstību.



1. attēls. Promocijas darba struktūra.

1. tabula

Darba struktūra un publikācijas

Metode	Publikācijas numurs	Publikācijas nosaukums
SEG emisiju analīze	1.	Lauksaimniecības emisiju salīdzinošā analīze Eiropas valstīs
<i>TIMES</i> modelis	2.	Bioresursu vērtības modelis: augkopība
Ekspērimētālā izpēte	3.	Micēlija siltumizolācijas materiāls
Sistēmdinamikas modelis	4.	Atjaunojamā izolācijas materiāla ražošana – jauns bioekonomikas biznesa modelis pārejai uz tīru enerģiju

ZINĀTNISKĀ APROBĀCIJA

1. I. Luksta, I. Pakere, I. Vamža, V. Liberova, D. Blumberga, “Comparative Analysis of Agricultural Emissions Across European Countries,” *Environmental and Climate Technologies*, 2024, Vol. 28, No. 1, 738.–748. lpp. ISSN 1691-5208, doi: 10.2478/rtuct-2024-0057.
2. I. Luksta, P. Asaris, M. Feofilovs, D. Blumberga, “Bioresource Value Model: Case of Crop Production,” *Environmental and Climate Technologies*, 2022, Vol. 26, No. 1, pp.1128-1144. e-ISSN 2255-8837, doi: 10.2478/rtuct-2022-0085.
3. I. Luksta, I. Vamža, D. Blumberga, “Development of a mycelium-based thermal insulation material,” *Environmental and Climate Technologies* 2025, Vol. 29, no. 1, pp. 201–211. e-ISSN 2255-8837, <https://doi.org/10.2478/rtuct-2025-0014>

4. I. Luksta, Ģ. Bohvalovs, G. Bažbauers, K. Spalviņš, A. Blumberga, D. Blumberga, "Production of Renewable Insulation Material – New Business Model of Bioeconomy for Clean Energy Transition," *Environmental and Climate Technologies*, 2021, Vol. 25, No. 1, pp. 1061–1074. ISSN 1691-5208. e-ISSN 2255-8837, doi: 10.2478/rtuect-2021-0080.
5. I. Luksta, K. Spalviņš "Methods for Extraction of Bioactive Compounds from Products: A Review," *Environmental and Climate Technologies*, 2023, Vol. 27, No. 1, pp. 422–437. ISSN 1691-5208. e-ISSN 2255-8837, doi: 10.2478/rtuect-2023-0031.

Konferences, kurās apspriesti un prezentēti pētījuma rezultāti

1. I. Luksta, Ģ. Bohvalovs, G. Bažbauers, K. Spalviņš, A. Blumberga, D. Blumberga, "Production of Renewable Insulation Material – New Business Model of Bioeconomy for Clean Energy Transition," *International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies, CONECT 2021*, May 12–14, 2021, Riga, Latvia.
2. I. Luksta, P. Asaris, M. Feofilovs, D. Blumberga, "Bioresource Value Model: Case of Crop Production," *International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies, CONECT 2022*, May 11–13, 2022, Riga, Latvia.
3. I. Luksta, K. Spalviņš "Methods for Extraction of Bioactive Compounds from Products: A Review," *International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies, CONECT 2023*, May 10–12, 2023, Riga, Latvia.
4. I. Luksta, I. Pakere, I. Vamža, V. Liberova, D. Blumberga, "Comparative Analysis of Agricultural Emissions Across European Countries," *International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies, CONECT 2024*, May 15–17, 2024, Riga, Latvia.
5. I. Luksta, I. Vamža, D. Blumberga, "Development of a mycelium-based thermal insulation material," *International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies, CONECT 2025*, May 14–16, 2025, Riga, Latvia.

Citas publikācijas

1. I. Vamža, K. Valters, I. Luksta, P. Resnais, D. Blumberga, "Complete Circularity in Cross-Laminated Timber Production," *Environmental and Climate Technologies*, 2021, Vol. 25, No. 1, pp. 1101–1113. ISSN 1691-5208. e-ISSN 2255-8837, doi:10.2478/rtuect-2021-0083
2. G. Valdmanis, M. Rieksta, I. Luksta, G. Bažbauers, "Solar Energy Based Charging for Electric Vehicles at Fuel Stations," *Environmental and Climate Technologies*, 2022, Vol. 26, No. 1, pp. 1169–1181. e-ISSN 2255-8837, doi:10.2478/rtuect-2022-0088
3. I. Luksta, T. Mika, K. Spalviņš, "Extraction of Apple Pomace Using Supercritical CO₂ Extraction," *Environmental and Climate Technologies*, 2023, Vol. 27, No. 1, pp. 980–988. ISSN 1691-5208. e-ISSN 2255-8837, doi:10.2478/rtuect-2023-0071
4. I. Luksta, T. Mika, K. Spalviņš, "Supercritical CO₂ Extraction of Wine and Beer Yeast Residues for Sustainable Bioproduct Recovery," *Environmental and Climate Technologies*, 2024, Vol. 28, No. 1, pp. 356–366. ISSN 1691-5208. e-ISSN 2255-8837, doi:10.2478/rtuect-2024-0028

5. I. Luksta, T. Mika, K. Spalviņš, “Supercritical CO₂ Extraction of Fish Roe,” *Environmental and Climate Technologies*, 2024, Vol. 28, No. 1, pp. 12–20. ISSN 1691-5208, doi:10.2478/rtuct-2024-0002
6. L. Balode, I. Pakere, I. Luksta, D. Blumberga, “Organic versus Conventional Agriculture: Comparison of Economic and Environmental Sustainability,” *Environmental and Climate Technologies*, 2025, Vol. 29, doi: 10.2478/rtuct-2025-0001

1. METODOLOĢIJA

Lai sasniegtu pētījuma mērķi, izmantotas vairākas zinātniskās pieejas un metodes. Šajā nodaļā detalizēti aprakstīta SEG emisiju analīzes metodoloģija, *TIMES* modeļa lietojums bioekonomikas potenciāla novērtēšanai, dabīga siltumizolācijas materiāla izstrāde un sistēmdinamikas modeļa lietojums izstrādāto materiālu salīdzināšanai ar sintētiskiem materiāliem.

1.1. Siltumnīcefekta gāzu emisiju analīze

Lauksaimniecības nozare ir nozīmīgs SEG emisiju avots ES, tāpēc ir vajadzīgas precīzas un salīdzinošas emisiju analīzes metodes, lai izprastu šo emisiju intensitāti un piedāvātu risinājumus to samazināšanai.

Darbā analizēti SEG emisiju apjomi lauksaimniecības sektorā visās ES valstīs [1], kopējais iedzīvotāju skaits [2] un valsts IKP uz vienu iedzīvotāju [3]. ES lauksaimniecība ir nozīmīgs emisiju avots, īpaši tādām SEG emisiju kā metāns un slāpekļa oksīdi, amonjaks un sēra dioksīds. SEG emisiju aprēķinos uz IKP un iedzīvotājiem bieži izmanto metodoloģiskās normalizēšanas un salīdzināšanas pieejas. Šajā procesā SEG emisijas izsaka kā emisijas uz vienu iedzīvotāju vai IKP vienību. Tas ļauj objektīvi salīdzināt valstis vai reģionus neatkarīgi no to iedzīvotāju skaita vai ekonomikas lieluma.

Analīzei izmantotā pieeja ietver emisiju normalizēšanu pēc iedzīvotāju skaita un ekonomiskās produkcijas. Šī metode ņem vērā dažādu valstu iedzīvotāju skaitu un ekonomiskās iespējas, nodrošinot, ka šie faktori nesamērīgi neietekmē emisiju datus.

Emisijas uz vienu iedzīvotāju – šis rādītājs aprēķināts, dalot kopējo lauksaimniecības SEG emisiju daudzumu ar kopējo iedzīvotāju skaitu katrā valstī. Šādi normalizējot emisiju rādītājus, analīzē tiek ņemts vērā iedzīvotāju skaits, ļaujot vieglāk salīdzināt, kā lauksaimniecības emisijas ir saistītas ar katras valsts iedzīvotāju skaitu. Lielākas emisijas uz vienu iedzīvotāju liecina par augstāku lauksaimniecības emisiju intensitāti valstī attiecībā pret iedzīvotāju skaitu.

$$\text{Emisijas uz vienu iedzīvotāju, t CO}_2 \text{ ekv} = \text{emisijas} / \text{iedzīvotāju skaits.} \quad (1.1.)$$

Emisijas uz IKP – šī vērtība iegūta, dalot kopējās lauksaimniecības emisijas ar katras valsts IKP, lai iegūtu skaidrāku priekšstatu par emisiju intensitāti saistībā ar ekonomikas produkcijas apjomu. Šis aprēķins parāda, kurām valstīm ir lielākas vai mazākas emisijas, salīdzinot ar to ekonomikas lielumu. Tas ļauj vērtēt valstu lauksaimniecības nozares efektivitāti emisiju pārvaldībā attiecībā pret to ekonomisko produktivitāti.

$$\text{Emisijas uz IKP, t CO}_2 \text{ ekv/miljons EUR} = \text{emisijas/IKP.} \quad (1.2.)$$

Emisijas uz IKP uz vienu iedzīvotāju – šis rādītājs iegūts, dalot SEG emisijas gan ar IKP, gan ar iedzīvotāju skaitu. Tas sniedz detalizētāku ieskatu emisijās gan attiecībā pret ekonomikas produkcijas apjomu, gan iedzīvotāju individuālo ieguldījumu ekonomikā. Šī metode atspoguļo gan lauksaimniecības nozares vides, gan ekonomisko efektivitāti dažādās valstīs, ļaujot veikt niansētu salīdzinājumu visā ES.

Emisijas uz IKP uz iedzīvotāju skaitu, kt CO₂ ekv./EUR = emisija/IKP uz 1 iedzīvotāju.
(1.3.)

Kopumā lauksaimniecība rada aptuveni 10–12 % no ES kopējām SEG emisijām, un tas var atšķirties atkarībā no valsts, lauksaimniecības prakses un politikas. Intensīvāka lauksaimniecība, piemēram, lopkopība un rūpnieciskā lauksaimniecība, rada vairāk emisiju [4].

ES ir ieviesusi dažādas politikas iniciatīvas, lai samazinātu lauksaimniecības radītās emisijas un veicinātu ilgtspējīgāku praksi. Tādu iniciatīvu kā Kopējā lauksaimniecības politika [5] un Zaļais kurss [6] mērķis ir veicināt vides un klimata mērķus lauksaimniecībā. Pētniecība un tehnoloģiju attīstība, piemēram, efektīvākas mēslošanas metodes vai tehnoloģijas metāna emisiju samazināšanai, var būt nozīmīgi faktori emisiju samazināšanā ES lauksaimniecības nozarē. Darbā salīdzinātas ES valstu lauksaimniecības emisijas 2022. gadā.

Papildus SEG emisiju analīzei pētījumā galvenā uzmanība pievērsta lauksaimniecības blakusproduktu izmantošanai, kas varētu samazināt emisijas un veicinātu ilgtspējīgāku resursu izmantošanu. Lauksaimniecības nozarē būtiski ir analizēt lielākās produktu plūsmas, lai varētu identificēt prioritāros blakusproduktus turpmākai izmantošanai, tāpēc ir vērtīgi, izmantojot modeli *TIMES*, meklēt labākos augstas pievienotās vērtības produktus, ko var iegūt no lauksaimniecības blakusproduktiem.

1.2. *TIMES* modelis

TIMES modelis ir lineārās programmēšanas rīks, kas tiek izmantots ilgtspējīgu stratēģiju izstrādei bioekonomikas attīstībai. Šajā apakšnodaļā aplūkota tā pielietošana lauksaimniecības sektorā, īpašu uzmanību pievēršot emisiju mazināšanai un ekonomiskās vērtības pieaugumam.

Tas kalpo kā instruments enerģijas sistēmu ilgtermiņa plānošanai un optimizācijai, nodrošinot pieprasījuma un piedāvājuma līdzsvaru, vienlaikus minimizējot kopējās izmaksas noteiktā periodā. Modelī tiek iekļauti dažādi enerģijas ražošanas un patēriņa tehnoloģiju aspekti, kā arī analizēti attīstības scenāriji, ņemot vērā resursu plūsmu struktūru un tehnoloģiskās izvēles iespējas.

Promocijas darbā *TIMES* modelis adaptēts Latvijas lauksaimniecības nozarei, lai modelētu bioresursu un tehnoloģiju plūsmas bioekonomikas attīstībai līdz 2030. gadam. Analizēti vairāki scenāriji, t. sk. bāzes scenārijs un alternatīvie scenāriji ar jaunu tehnoloģiju ieviešanu un produktu ar pievienoto vērtību ražošanu, piemēram, bioplastmasas, šķiedras pulvera un otrās paaudzes biodegvielas ieviešanu.

Modelēšanas pieeja

Resursu pievienotā vērtība atšķiras atkarībā no tā, kādam mērķim tos izmanto, piemēram, enerģijas vai materiālu ražošanai utt. Vēsturiski virzība uz bioekonomiku aizsākās, liekot lielu uzsvāri uz bioenerģiju. Mūsdienās bioekonomika virzās uz bioresursu progresīvāku izmantošanu dažādām tehnoloģijām un materiālu ieguvei. Līdz ar to aktuāls jautājums politikas plānotājiem, lēmumu pieņēmējiem un citām ieinteresētajām pusēm ir optimālo resursu izmantošanas scenāriju ar augstāko pievienoto vērtību atrašana. Ņemot vērā minēto, izstrādātais instruments paredz palielināt lauksaimniecības bioresursu pievienoto vērtību valsts līmenī par vismaz 30 % līdz 2030. gadam, ieviešot jaunas tehnoloģijas. *TIMES* modelī produktu pievienotā vērtība aprēķināta, izmantojot produkta kopējo vērtību un dalot to ar saražoto apjomu. No bioresursiem iegūto energoresursu enerģijas izmantošanas jomā viena no atzītākajām metodēm ir *TIMES*. Šajā pētījumā *TIMES* modelēšanas pieeja ir izvēlēta un pielāgota Latvijas lauksaimniecības nozarei. *TIMES* Lauksaimniecības bioresursu vērtības modelis ir izstrādāts, lai modelētu bioresursu plūsmas un tehnoloģijas bioekonomikas attīstībai un bioresursu pievienotās vērtības pieaugumam līdz 2030. gadam. Izvēlētais pieejas pamatā ir investīciju un tehnoloģiju darbība, resursu plūsma un galapieprasījuma izmaksu optimizācija. Vēsturiskais pieprasījums pēc augkopības produktiem ņemts no *FAOSTAT* datubāzes, pieprasījums 2030. gadam aprēķināts, pamatojoties uz turpmākajām iedzīvotāju skaita izmaiņām Latvijā. Tādā veidā *TIMES* ļauj izvērtēt optimālos scenārijus bioresursu izmantošanai enerģētikā un biorafinēšanas rūpnīcās augstākas pievienotās vērtības produktu ražošanai. Biorafinēšanas rūpnīcu attīstību iespējams aplūkot, izvērtējot resursu izmantošanas kapacitātes dabiskās robežas, tehnoloģiju un to ekspluatācijas un uzturēšanas izmaksu ekonomisko iespējamību un sociālekonomiskos aspektus algu un netiešo nodokļu izteiksmē. Modeļa koncepcijas un hipotēzes pierādījums pārbaudīts, izmantojot Latvijas augkopības nozares gadījuma izpēti.

Modeļu robežas un scenāriji

Modeļa robežas noteiktas, balstoties *TIMES* modeļa komponentu klasifikācijā, strukturējot analīzi atbilstoši preču un tehnoloģiju elementiem, kas savstarpēji sasaistīti ar materiālu plūsmām.

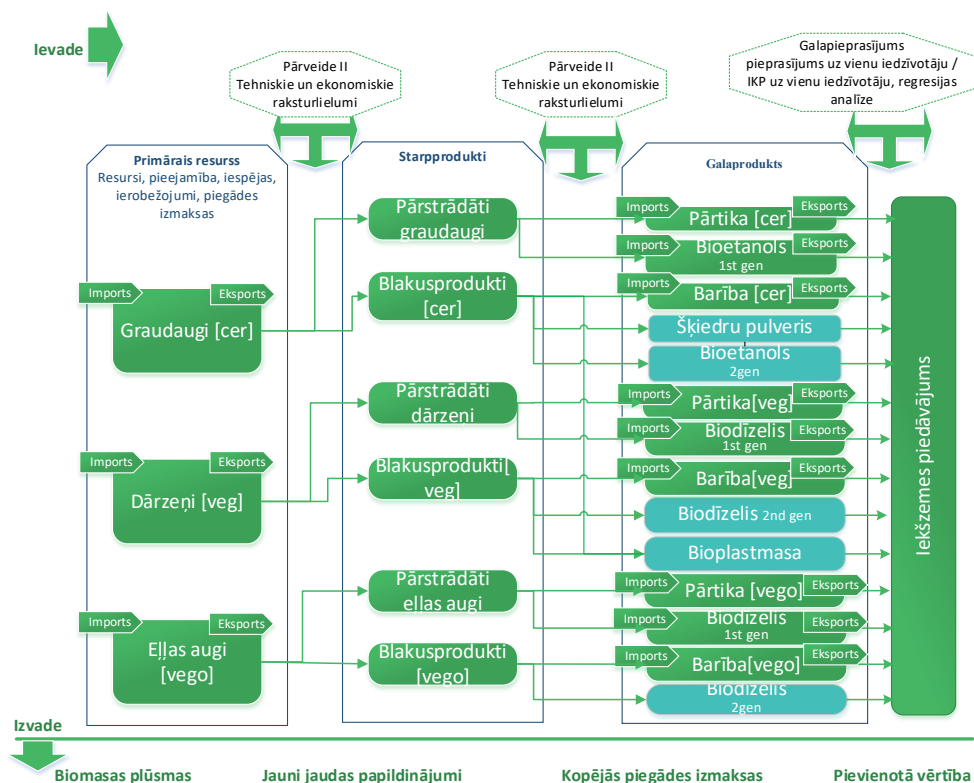
Preces šajā kontekstā definētas kā bioresursu nesēji, materiāli vai produkti, kas modelī tiek traktēti kā tehnoloģisko procesu ievades (izejvielas) vai izvades (produkti). Preču plūsmas atspoguļo materiālu virzību caur dažādiem transformācijas posmiem un to pārvērtību citās precēs. Analizētajā gadījumā plūsmas veido biomasa, kas tiek kvantificēta masas vienībās. Ražošanas procesos notiek izejvielu pārstrāde, rezultējoties jaunos materiālos vai produktos, piemēram, pārtikas vai energoresursu veidā.

Tehnoloģiju komponents aptver procesus, kas īsteno preču pārveidi, un tiek klasificēts divās galvenajās kategorijās.

1. Primārās ražošanas procesi, kas ietver bioresursu ieguvei (tai skaitā arī importu).
2. Transformācijas procesi, kas saistīti ar izejvielu pārstrādi, biorafinēšanu un galaproduktu ražošanu.

Galapreču patēriņu modelī nosaka sektora galapieprasījums. Šis pieprasījums tiek interpretēts kā transformācijas procesu rezultāts, kas strukturē resursu plūsmu virzību un ietekmē tehnoloģisko procesu izvietojumu modelī.

TIMES modelī tiek precīzi definētas preču ražošanas robežas atsevišķiem bioresursiem – graudaugiem, dārzeņiem un eļļas augiem (pamatojoties uz audzēšanas un novākšanas rezultātiem), kā arī dažādiem produktu veidiem, tostarp pārtikai (gan svaigai, gan termiski apstrādātai), lopbarībai un alternatīvajiem degvielas produktiem (bioetanalam, biodīzeļdegvielai). Šīs preces un ar tām saistītās materiālu plūsmas tiek sasaistītas ar attiecīgajām transformācijas tehnoloģijām, nodrošinot visaptverošu resursu izmantošanas un plūsmas dinamikas analīzi (1.1. att.).



1.1. attēls. Definētas modeļa robežas *TIMES* modelī.

Definējot plūsmas, kas saista preces un tehnoloģijas, par pamatu ņemta pašreizējā Latvijas augkopības nozare, kurā galvenā augkopības produktu ieguve ir vietēji audzēti produkti. Augkopības produktus, piemēram, graudaugus, dārzeņus un augu eļļas, izmanto, lai ražotu pārtiku, barību un citus produktus (biodegvielu). Graudaugus, dārzeņus un augu eļļas galvenokārt izmanto pārtikas un arī pirmās paaudzes biodegvielas ražošanai. Blakusproduktus izmanto lopbarības ražošanai. Tiek apsvērta jaunu pārtikas un nepārtikas produktu ražošana no

augkopības produktiem, tostarp šķiedrvielu pulvera ražošana no graudu klijām, bioplastmasas ražošana no dārzeņu un labības blakusproduktiem un otrās paaudzes biodegvielas ražošana no graudaugu, dārzeņu un augu eļļu blakusproduktiem.

Pamatojoties uz pieejamo informāciju, uzskatāms, ka ne visi augkopības produkti Latvijā tiek pārstrādāti pārtikas produktos, daži tiek izmantoti bioetanola un biodīzeļdegvielas ražošanā. Graudu pārstrādes procesā (malšana) rodas atlikumi, kas netiek izmantoti pārtikas ražošanā. Kultūraugu pārstrādes blakusproduktus izmanto lopbarības ražošanai. Lai no graudaugiem iegūtu pārtiku, izmanto maizes ražošanas tehnoloģijas. Dārzeņu pārstrādē izmantotās tehnoloģijas ir saistītas ar dārzeņu konservēšanu un augu eļļu ražošanu. Bioetanola (graudi) un biodīzeļdegvielas (dārzeņi un eļļa) ražošana tika apsvērta no citiem augkopības produktiem.

Lai palielinātu bioresursu pievienoto vērtību augkopības nozarē, *TIMES* modelī ieviestas četras jaunas tehnoloģijas un produktu ar pievienoto vērtību ražošana – šķiedras pulveris, bioplastmasa, biodīzelis un bioetanol. Kopumā izpētīti šādi scenāriji: 1) bāzes scenārijs bez jaunu tehnoloģiju ieviešanas; 2) atsevišķs scenārijs katrai jaunajai tehnoloģijai (kopā trīs jaunas tehnoloģijas); 3) apvienotais scenārijs visām jaunajām tehnoloģijām. Scenārijā šķiedras pulvera ražošanai no kultūraugiem jauna produkta ražošanai tiek izmantoti graudu pirmapstrādes blakusprodukti – klijas. Scenārijā bioplastmasas ražošanai no labības jauna produkta ražošanāi tiek izmantoti graudu pirmapstrādes blakusprodukti – klijas un dārzeņu atliekas. Jaunas tehnoloģijas scenārijs ir otrās paaudzes biodegvielas (bioetanola un biodīzeļdegvielas) ražošana. Bioetanola ražošanas scenārijā tiek pieņemts, ka izejvielas ir graudu pārstrādes blakusprodukti vai klijas un augu eļļas atliekas.

Datu uzskaitē

Dati tiek vākti par katru *TIMES* modelī iekļauto preci (apjoms un resursi, pārtikas, barības un citu produktu ražošana, imports, eksports un izmaksas). Lielākā daļa datu iegūti no Latvijas oficiālā statistikas portāla [7], kā arī izmantota Apvienoto Nāciju Organizācijas Pārtikas un lauksaimniecības organizācijas datubāze [8].

Vēsturiskie ievaddati no 2015. līdz 2019. gadam *TIMES* izmantoti, lai noteiktu novākto, importēto un eksportēto resursu apjomu augšējo un apakšējo robežu. Šie ierobežojumi ievēroti pievienotās vērtības optimizācijā 2030. gadam, lai nepārsniegtu paredzētos limitus audzētajiem augkopības produktiem un minimizētu importa un eksporta izmaiņu iespējamo ietekmi uz modeļa rezultātiem. Galaprodukta vai nozares pieprasījuma ievaddatus nosaka prognoze, kuras pamatā ir iedzīvotāju skaita izmaiņas 2030. gadā Latvijā.

Dati par attiecīgajām pārveides tehnoloģijām ir iekļauti modelī, ietverot to jaudu, efektivitāti, investīciju izmaksas, ekspluatācijas un uzturēšanas izmaksas, kalpošanas laiku, pieejamību, kā arī produkta ražošanas procesa radīto pievienoto vērtību. Tehnoloģiskās izmaksas ņemtas no Latvijas uzņēmumu finanšu pārskatiem. Dati par tehnoloģiju jaudām iegūti no uzņēmumu piesārņojošās darbības atļaujām.

Produktu pievienotā vērtība aprēķināta, izmantojot divas datubāzes. Pārtikas, lopbarības un biodegvielas kopējā pievienotā vērtība iegūta no Eiropas Komisijas datubāzes [9]. Saražotās pārtikas, lopbarības un biodegvielas apjomu (tūkst. t) avots ir Latvijas Republikas Centrālās statistikas pārvaldes datubāze. Pārtikas, lopbarības un biodegvielas pievienotā vērtība aprēķināta, dālot kopējo pievienoto vērtību un saražotās produkcijas apjomu.

Lai definētu alternatīvo scenāriju ievaddatus, analizēta literatūra par jaunieviestajām tehnoloģijām lauksaimniecības sektorā. Noteikta jauno tehnoloģiju pieejamība no 2025. gada. Aplūkoti produkti ar augstu pievienoto vērtību, kas balstīti jaunu tehnoloģiju izmantošanā:

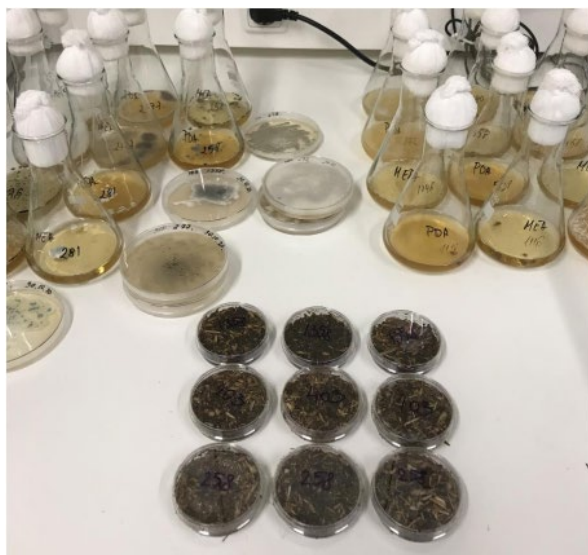
- 1) šķiedras pulvera ražošana no graudu pārstrādes blakusproduktiem jeb klijām;
- 2) bioplastmasas ražošana no graudu klijām un augu atliekām;
- 3) otrās paaudzes biodegvielas (bioetanolā no graudu blakusproduktiem un biodīzeļdegvielas no augu eļļas blakusproduktiem) ražošana.

TIMES modelis kalpo par pamatu bioekonomikas stratēģiju izstrādei, savukārt sistēmdinamiskā pieeja ļauj izprast šo stratēģiju ietekmi sistēmas līmenī. Īpaši tas attiecas uz micēlija siltumizolācijas materiāliem, kuru ražošana no lauksaimniecības blakusproduktiem piedāvā ilgtspējīgas alternatīvas tradicionālajiem materiāliem.

1.3. Micēlija siltumizolācijas materiāls

Materiāls tika izstrādāts Rīgas Tehniskās universitātes Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūta laboratorijā. Darba autore izstrādāja micēlija siltumenerģētisko materiālu. Micēlija materiāla eksperimentālā izstrāde tika veikta no 2020. līdz 2022. gadam. Eksperimenta sākumā tika izmantotas deviņu veidu pelējuma sēnes: *Rhizopus oryzae*, *Aspergillus versicolor*, *Penicillium chrysogenum*, *Cladosporium cladosporioides*, *Cladosporium herbarum*, *Stachybotrys chartarum*, *Trichoderma viride*, *Mucor mucedo*, *Mucor plumbeus*. Darba sākumā pārbaudītas vairāku sugu pelējuma sēnes, lai turpmākajam darbam izvēlētos sēni, kas veido blīvu hifu tīklu. Svarīgs rādītājs ir arī augšanas ātrums. Pelējuma sēnes tika audzētas uz divu veidu barotnēm: uz *PDA* jeb kartupeļu dekstrozes barotnes un *MEA* jeb iesala ekstrakta agara. Pirms pelējuma sēnes tika inokulētas izvēlētajā substrātā (priežu šķeldā), tās tika rūpīgi noņemtas no *PDA* cietās barotnes un sajauktas ar *PDA* šķidro barotni. Konkrētajā gadījumā šķidrā masa ir nepieciešama, lai sēņu micēliju būtu iespējams iemaisīt visā izvēlētajā substrātā.

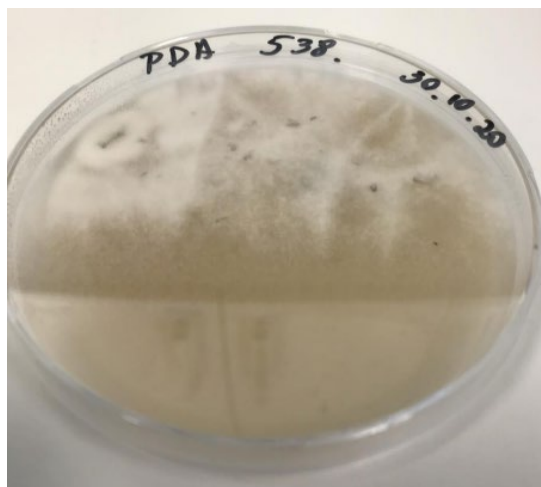
Sākotnēji micēlija paraugi tika sagatavoti, pievienojot 15 mg sēņu sporu un kartupeļu destruktozes maisījumu uz 5 mg priežu šķeldas, tomēr pēc žāvēšanas tika secināts, ka, pievienojot sēņu sporas uz šķeldas virsmas, tā necauraug paraugu un neveido saikni ar šķeldu, un paraugi izrādījās ļoti trausli. Paraugi tika ietīti folijā un ievietoti slēgtā plastmasas traukā, kurā atradās ūdens trauks, kas nodrošināja relatīvo mitrumu.



1.2. attēls. Micēlija paraugi (katra parauga masa – 20 mg).

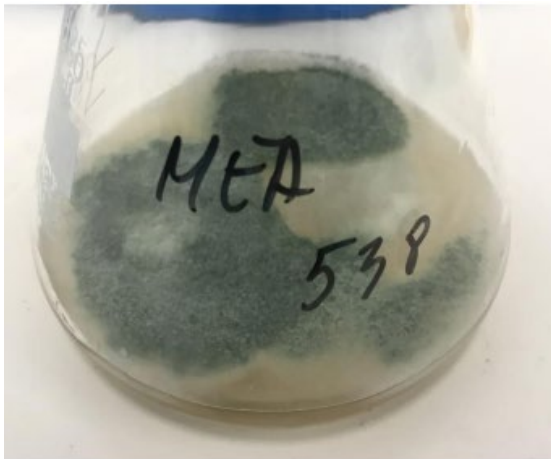
Nākamie micēlija paraugi audzēšanai tika sagatavoti mazos plastmasas trauciņos, kuros tika ievietota 5 mg priežu šķeldas, kas sajaukta ar 15 mg sēnes micēlija un kartupeļu dekstrozes barotnes maisījumu. Sagatavotie paraugi (katrs atsevišķi) tika aptīti ar foliju un ievietoti lielākā plastmasas traukā, kurā ir ievietota glāze ar ūdeni, lai uzturētu relatīvo mitrumu 100 %. Micēlija paraugi tika audzēti tumšos un siltos ($\sim 24^{\circ}\text{C}$ grādu temperatūrā) apstākļos.

Sekojoši līdzīgu augšanas gaitai, secināts, ka izteikti visātrāk aug viena konkrēta sēņu suga *Trichoderma viride*. Trīs dienu laikā *Trichoderma viride* paraugos izveidoja biezu tīklu, un blīvi izaugušais materiāls pēc izžāvēšanas kļuva trausls un drūpošs.



1.3. attēls. *Trichoderma viride* sporas, kuras audzētas uz cietās PDA barotnes.

Ņemot vērā, ka bija jāgatavo vairāki micēlija paraugu varianti, sēnes tika audzētas petri platēs uz *PDA* cietās barotnes. Eksperimenta gaitā tās ik pa laikam tika pārsētas uz jaunām platēm, lai nodrošinātu nepieciešamo sēņu sporu daudzumu micēlija materiāla sagatavošanai.



1.4. attēls. Uz *MEA* šķidrās barotnes audzētās *Trichoderma viride* sporas.

Eksperimenta sākuma sporas tika audzētas gan uz šķidrās, gan cietās barotnes, tomēr, turpinot eksperimentu, sēnes tika audzētas tikai uz *PDA* cietās barotnes, kur aptuvenais sēņu augšanas laiks bija četras dienas.



1.5. attēls. Micēlija paraugs, kas gatavots no *Trichoderma viride*, izmantojot tikai barotni.

Lai gan attēlā izskatās, ka micēlija paraugs turas kopā, paņemot šo paraugu rokās, tas drūp un ir ļoti trausls, tādēļ tika meklēta saistvielas, kas spētu padarīt materiālu izturīgāku. Apskatītas tādas saistvielas kā ksantāns, glutēns. Ņemot vērā to, ka mazajiem paraugiem nebija iespējams nomērīt siltumvadītspēju, tika gatavoti 20 cm × 20 cm izmēra paraugi.



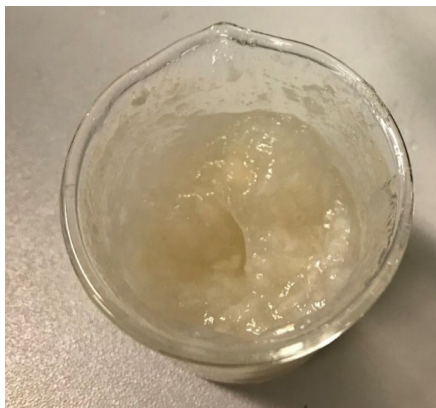
1.6. attēls. Micēlija materiāls 20 cm × 20 cm lielās metāla veidnēs.

Sākot eksperimentāli veidot paraugus, tika apskatītas dažāda veida veidnes – gan ar režģīti, gan pārklājumu veidnes apakšā. Arī pārklājums starp micēlija materiālu un veidni bija dažāds. Sākotnēji tika uzklāta pārtikas plēve, tomēr žūšanas procesā pārtikas plēve pielipa pie micēlija, tāpēc bija jāmeklē citi pārklājuma materiāli. Eksperimentu turpinot, tika ieklāts gan cepamais papīrs, gan folija, tomēr vislabāko rezultātu pēc žāvēšanas uzrādīja cepampapīrs, no kura micēlija materiāls nesadaloties atdalījās vislabāk. Lai micēlija materiāls būtu izturīgāks, tika meklētas saistvielas un to proporcijas. Eksperimentu laikā apskatīti dažādi saistvielu veidi, piemēram, ksantāns, lipekļi, ciete, lai micēlija materiāls būtu izturīgāks, vienlaikus rodot līdzsvaru starp materiāla izturību un zemu siltumizolācijas indeksu. Materiālam tika pievienotas arī sastāvdaļas, kas palīdz veidot poras, piemēram, soda. Tika sagatavoti 19 micēlija paraugi un izmērīta to siltumvadītspēja.

19 micēlija paraugu komponentu sadalījums

Nr.	Šķelda, %	Salmi, %	Ūdens, %	Ksantāns, %	Glicerīns, %	Etanols, %	Glutēns, %	Raugs, %	Melase, %	Soda, %	Sēne ar barotni, %	Barotne, %	Ūdens, %
S1	24,2	0	3,1	0,2	0	0,1	0	0	0	0	9,8	14,4	48,3
S2	46,7	0	6	0,3	0	0,1	0	0	0	0	18,9	28	0
S3	32,4	11	11,5	0,4	0	0,2	0	0	0	0	18,1	26,3	0
S4	21,9	21,9	11,5	0,4	0	0,2	0	0	0	0	17,8	26,3	0
S5	21,9	21,9	11,5	0,4	0	0,2	0	0	0	0	17,9	26,2	0
S6	10,7	32,1	11,3	0,4	0	0,2	0	0	0	0	17,5	27,7	0
S7	21,5	21,5	11,3	0,4	0	0	0	0	0	2,3	8,8	34,3	0
S8	10,8	32,4	11,4	0,4	0	0,3	0	0	0	0	10	34,7	0
S9	19,8	19,8	10,4	0,4	0	0	0	0	0	2,1	7,8	39,7	0
S10	45,9	15,3	0	0	0	0	0	0	0	0	12,3	26,5	0
S11	21,7	21,7	0	1,3	1,3	0	0,6	0	0	2,3	7	44	0
S12	11,7	35,1	12,3	0,4	0	0	0	0	0	2,5	9,4	28,5	0
S13	11,7	35,1	0	1,4	1,5	0	0,7	0	0	2,5	9,4	37,7	0
S14	3,7	33,7	17,7	0,7	2,9	0	1	0	0	0,9	14	25,4	0
S15	3,7	33,7	17,7	1,2	5	0	0	0	0	1,4	12,9	24,3	0
S16	4,1	36,7	10,7	0,4	0	0	0	4,7	2,5	0	15,8	25,1	0
S17	4,2	37,6	11	0,8	0	0	0	4,8	0	0	14,4	27,3	0
S18	4,2	38	10,9	0,7	0,7	0	0,3	0	1,3	0,6	14,8	28,6	0
S19	12,5	31,3	11	0,7	0,7	0	0,3	0	1,3	0,7	12,2	29,4	0,00

1.2. tabulā parādītas 19 micēlija paraugu sastāvdaļu proporcijas. Redzams, kā tika variētas šķeldas un salmu proporcijas.



1.7. attēls. Ksantāna, ūdens un etanola maisījums.

Eksperimenta laikā micēlija materiālam bija jāpievieno saistviela, un viena no saistvielām bija ksantāns. Ksantāns bija jā sajauc ar ūdeni, lai iegūtu atbilstošu konsistenci un saturētu materiālu kopā. Ksantāns nešķīst ūdenī, tāpēc tika pievienots arī etanols. Etanola pievienošana paraugiem palīdzēja izšķīdināt ksantāna sveķus, lai tos varētu labāk iejaukt paraugos.



1.8. attēls. Miksera izmantošana paraugu sajaukšanai.

Visas pievienotās sastāvdaļas bija jā sajauc viendabīgā masā. Eksperimentā tika izmantots mikseris, lai izveidotu viendabīgu masu pirms tās iepildīšanas veidnē.



1.9. attēls. Micēlija materiāla ieliešana veidnē.

1.9. attēlā redzams, ka micēlija materiāls ir ļoti irdens, tomēr jāņem vērā, ka šāda konsistence tika novērota tikai pirmajiem materiāla paraugiem. Procesa gaitā tika secināts, ka micēlija augšanai tik liels ūdens daudzums nav nepieciešams. Mazāks ūdens daudzums mazina nepieciešamību pēc žāvēšanas un attiecīgi pēc siltuma. Paraugi tika žāvēti 105 °C. Sākotnēji paraugi tika žāvēti ilgāk, bet pēdējie paraugi ar samazinātu ūdens daudzumu paraugus tika žāvēti aptuveni 24 stundas.



1.10. attēls. Micēlija paraugi (S1, S3, S4, S5, S6, S7).

Vizuālās atšķirības micēlija materiālā skaidrojamas ar to, ka eksperimentā tika variēts ar šķeldu un salmu daudzumu, attiecību, kā arī frakciju.



1.11. attēls. Micēlija paraugi (S8, S9, S11, S12, S13, S14).



1.12. attēls. Micēlija paraugi (S15, S16, S17, S18, S19).

1.12. un 1.11. attēlā starp micēlija materiāla paraugiem nav vizuālu atšķirību, jo šiem paraugiem atšķiras tikai saistvielas daudzums.

Tika izveidots eksperimenta plāns, un tajā izstrādātas un testētas dažādas micēlija materiāla sastāvdaļu attiecības, lai noteiktu to optimālo kombināciju. Galvenie analizētie faktori bija sēņu sporu, barotnes un ūdens daudzums, kā arī citu piedevu ietekme uz materiāla īpašībām.

Eksperimenti ietvēra vairākus variantus ar atšķirīgām sastāvdaļu proporcijām, piemēram, šķeldas un salmu attiecību, ksantāna un sodas daudzumu, kā arī dažādu sēņu sporām pievienotos barotnes daudzumus. Katrs variants tika pārbaudīts, lai novērtētu tā blīvumu, siltumvadītspēju un mehānisko izturību.

Pēc eksperimentu veikšanas secināts, ka vislabākie rezultāti iegūti variantā, kurā ūdens saturs bija aptuveni 12,35 %, sēņu sporas 0,03 %, barotne – 37,63 %. Eksperimentā izmantota daudzfaktoru regresijas analīze, lai noteiktu, kuri mainīgie būtiski ietekmē siltumvadītspēju un materiāla kvalitāti.

Rezultāti atklāja, ka šķeldas un salmu attiecība un arī ksantāna daudzums būtiski ietekmē micēlija materiāla īpašības. Pamatojoties uz eksperimentālajiem datiem, izveidoti matemātiskie modeļi, kas palīdzēja prognozēt optimālās sastāvdaļu attiecības nākotnes materiālu ražošanai.

1.3. tabula

Micēlija paraugu proporcijas atbilstoši eksperimenta plānam

Nr.	Šķelda, %	Salmi, %	Ūdens, %	Ksantāns, %	Soda, %	Sēne, %	Barotne, %
ŠS0.11K1.43	4,66	41,90	12,22	1,43	2,50	0,03	37,25
ŠS0.33K0.31	35,32	11,77	12,36	0,31	2,53	0,03	37,67
ŠS0.11K0.31	4,71	42,38	12,36	0,31	2,53	0,03	37,67
ŠS0.33K1.43	34,92	11,64	12,22	1,43	2,50	0,03	37,25
ŠS0.74K0.88	19,90	26,93	12,29	0,88	2,52	0,03	37,46

Pēc iegūtajiem rezultātiem var secināt, ka šķeldas attiecība pret salmiem, kā arī ksantāna daudzums būtiski ietekmē materiāla stiprību un siltumvadītspējas koeficientu. Turpinot pētījumu, pārbaudītas vienādojumos ieteiktās labākās proporcijas, lai uzlabotu micēlija materiāla siltumvadītspēju.

Ņemot vērā iegūtos rezultātus šķeldu saturošajos paraugos, šķelda turpmākajos eksperimentos vairs netika izmantota. Eksperimenti turpināti, izmantojot tikai sienu un salmus. Variētas siena un salmu proporcijas (25 % salmu un 75 % siena, 75 % salmu un 25 % siena, kā arī 50 % salmu un 50 % siena).

Sākotnēji paraugu numuri tika vienkāršoti (piemēram, no S1 līdz S19), tomēr, eksperimentiem turpinoties, paraugu numuri tika precizēti (piemēram, norādot substrāta proporcijas vai, ja konkrēts eksperiments bija vērsts uz saistvielu daudzuma atšķirībām, norādot pievienoto saistvielu procentuālo daudzumu).

Siena un salmu paraugu proporcijas

Nr.	Siens, %	Salmi, %	Ūdens, %	Ksantāns, %	Glicerīns, %	Melase, %	Micēlijs, %	Cietes šķīdums, %
Sa25Sie75	35,1	11,5	12,2	1,2	0,9	1,8	0,03	37,3
Sa75Sie25	11,5	35,1	12,2	1,2	0,9	1,8	0,03	37,3
Sa50Sie50	23,3	23,3	12,2	1,2	0,9	1,8	0,03	37,3

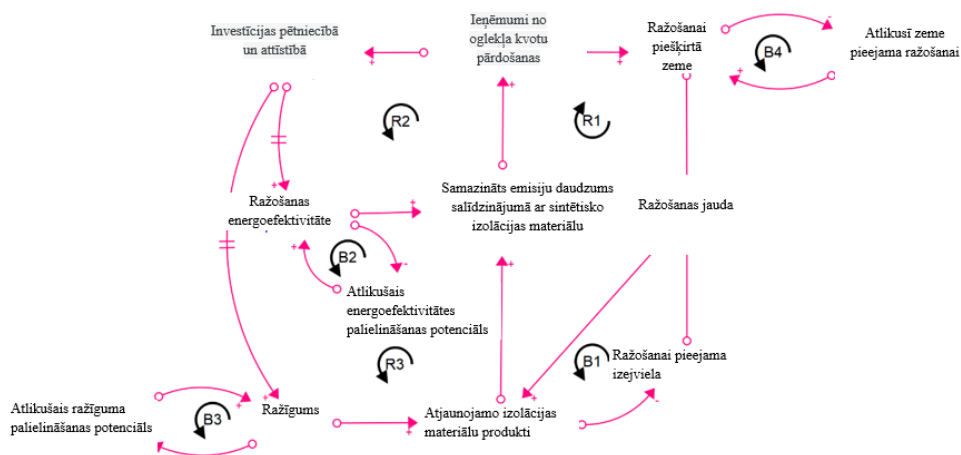
1.4. Sistēmdinamikas modelis

Pētījumā izmantota sistēmdinamikas pieeja, kas ir matemātiska metode, lai pētītu un pārvaldītu sarežģītas sistēmas, kas laika gaitā mainās atkarībā no cēloņiem un atgriezeniskās saites cilpām. Šo pieeju Masačūsetsas Tehnoloģiju institūtā 1956. gadā izstrādāja profesors Džejs Raits Foresters [10]. *Stella Architect* ir izmantota kā programmatūras rīks ēku krājumu un plūsmu strukturēšanai, kā arī sistēmas uzvedības simulācijai. Modelis izmantots, lai salīdzinātu atšķirības starp micēlija izolācijas materiāla ražošanu un četriem sintētiskajiem izolācijas materiāliem – putupolistirolu (EPS), ekstrudētu polistirolu (XPS), poliuretānu un fenola putām. Sintētisko izolācijas materiālu vidējās vērtības iegūtas no literatūras [11]. Salīdzinājums veikts, pamatojoties uz saražoto izolācijas materiālu daudzumu, kas nodrošina vienādas siltumizolācijas īpašības, ņemot vērā siltumvadītspējas atšķirības. Salīdzinājuma uzmanības centrā bija atšķirība starp SEG emisijām un materiālu ietvērto enerģiju visā dzīves ciklā. Rezultāti izteikti uz izolācijas materiāla kubikmetru, arī kā ietvērto SEG emisiju un ietvertās enerģijas kumulatīvās vērtības. Aprēķinu laika posms noteikts no 2021. līdz 2050. gadam. Simulācijai izvēlēts 30 gadu laika posms, jo lielākā daļa ES klimata politiku mērķētas laika posmam līdz 2050. gadam, kad jāsasniedz klimatneitralitāte. Simulācija ietver ne tikai jaudas palielināšanu micēlija izolācijas materiālu ražošanai, bet arī pētniecības un attīstības (*R&D*) ietekmi uz materiāla ražošanas efektivitāti, tāpēc aplūkotajam laika posmam ir jābūt pietiekami ilgam, lai atspoguļotu šo ietekmi.

Modeļa struktūra

Cēloņu cilpas diagramma (CCD) izmantota, lai aprakstītu modelētās sistēmas struktūru. Tā izveidota pirms modeļa izstrādes (1.13. att.). CCD attēlo sistēmas mehāniku bez aprēķiniem [12]. CCD ilustrē sistēmas galveno atgriezeniskās saites struktūru un atspoguļo dinamikas cēloņus. Trīs pastiprinošās un četras balansējošās cilpas attēlo pētīto sistēmu (1.13. att.). Pastiprinošās cilpas uzrāda eksponenciālu augšanu. Pastiprinošā cilpa R1 parāda, kā micēlija izolācijas materiāla ražošana palielina samazināto (novērsto) SEG emisiju apjomu, jo materiāls aizstāj sintētisko materiālu, kura ietverto SEG emisiju apjoms ir lielāks. Jo vairāk emisiju tiek samazināts, jo vairāk oglekļa kvotu var pārdot, nodrošinot ieņēmumus. Daļu no ieņēmumiem var ieguldīt ražošanai atvēlētās zemes palielināšanā, kā rezultātā pieaug ražošanas tehnoloģiju jauda, kas ļauj vēl vairāk izmantot atjaunojamās izolācijas materiālus. Pastiprinošā cilpa R2 apraksta atgriezenisko saiti, kur daļa ieņēmumu no oglekļa kvotu pārdošanas tiek ieguldīta pētniecībā un attīstībā, lai palielinātu ražošanas energoefektivitāti. Energoefektivitātes paaugstināšana vēl vairāk palielina samazināto emisiju apjomu. Pētniecībai un izstrādei nepieciešams laiks, un tas tiek modelēts, pieņemot, ka ieguldījumi pētniecībā un attīstībā samazina šīm aktivitātēm nepieciešamo laiku. Ražošanas jaudu ierobežo izejvielu pieejamība, un energoefektivitātes ierobežojums ir noteikts kā maksimālā vērtība. Pastiprinošā cilpa R3 parāda, kā investīcijas pētniecībā un attīstībā palielina saražotā izolācijas materiāla daudzumu, t. i., ražošanas iznākumu. Pieaugot ražībai, atjaunojamo izolācijas materiālu izmantošana vēl vairāk samazina izmešu daudzumu, salīdzinot ar sintētiskajiem izolācijas materiāliem, tādējādi palielinot ieņēmumus no oglekļa kvotu pārdošanas. Tas savukārt vēl vairāk palielina potenciālos ieguldījumus pētniecībā un attīstībā.

Balansēšana jeb negatīvās atgriezeniskās saites cilpas izraisa sistēmas mērķtiecīgu uzvedību. Pirmā balansējošā cilpa B1 parāda, kā izejvielu pieejamība mijiedarbojas ar izejvielu patēriņu micēlija izolācijas materiāla ražošanai. Patērējot izejvielas, tiek ražots izolācijas materiāls, un, jo vairāk izolācijas materiāla tiek saražots, jo mazāk izejvielu paliek ražošanai. Otrā līdzsvarojošā cilpa B2 parāda, kā energoefektivitāte mijiedarbojas ar atlikušo potenciālu tās paaugstināšanai. Šajā pētījumā energoefektivitātes uzlabošana tiek panākta, investējot pētniecībā un attīstībā. Energoefektivitāte paaugstināta, investējot pētniecībā un attīstībā. Šis ieguldījums rada ieņēmumus no oglekļa kvotu pārdošanas. Arvien pieaugot energoefektivitātei, samazinās iespējas to palielināt turpmāk. Līdzīgs izsīkšanas efekts skar ražības uzlabošanas potenciālu (balansējošā cilpa B3) un ražošanai atvēlēto zemes platību (B4).



1.13. attēls. Cēloņcīpās diagramma, kas attēlo sistēmdinamikas modeļa struktūru micēlija izolācijas materiāla ražošanai.

Datu vākšana

Lai aprēķinātu micēlija izolācijas materiālā ietvertās emisijas, nepieciešams emisijas koeficients un dati par materiālu emisijas absorbciju, kā arī dati par elektroenerģijas un siltuma patēriņu ražošanas procesā. Tas pats attiecas uz ietvertās enerģijas aprēķinu, kur emisijas faktora vietā tiek izmantota materiālu ietvertā enerģija. Materiāli, kas nepieciešami 1 m³ micēlija izolācijas materiāla ražošanai, ņemti no Rīgas Tehniskajā universitātē veiktajiem laboratorijas eksperimentiem. Sistēmdinamikas modeļa pamatā bija dati par paraugiem, kur izmantoti salmi un šķelda un kuriem bija vislabākā siltumvadītspēja. Siena un salmu paraugi tika eksperimentāli iegūti pēc modeļa izstrādes un rezultātu publicēšanas. Dati par micēlija ietvertajām emisijām un ietvērto enerģiju nav iekļauti, jo daļa izejmateriālu tiek izmantota bioreaktorā, lai audzētu micēliju. Ražošanai nepieciešamie materiāli, elektrība un siltums, emisijas koeficienti, emisijas absorbcija un ietvertie enerģijas ievades dati ir redzami 1.5. tabulā.

1.5. tabula

Emisijas faktori un ražošanas izejvielu ietvertā enerģija uz 1 m³ micēlija izolācijas materiāla

Ievade	Ievade ražošanā (vienība/m ³)	Emisijas faktors (kgCO ₂ eq/vienība)	Absorbētās emisijas (kgCO ₂ eq/vienība)	Ietvertā enerģija (MJ/vienība)
Micēļjs (kg)	0,117	–	0,0025 [13]	–
Destilēts ūdens (kg)	259,3	0,0008 [14]	0	23 [15]
Melase (kg)	7,5	0,074 [16]	0,1 [17]	1 [17]
Ciete (kg)	6,4	2,4 [18]	0,174* [19]	0,0014 [19]

		1.5. tabulas turpinājums		
Sūkalu pulveris (kg)	7,5	0,082 [20]	0,98 [17]	20 [17]
Karbamīds (kg)	0,97	1,85 [21]	0,73 [22]	49 [22]
Ksantāns (kg)	2,3	0,00497 [23]	0,048 [24]	7,6 [25]
Soda (kg)	13,6	0,00059 [14]	0,524 [26]	26,9 [26]
Šķelda (kg)	189,3	0,000187 [27]	1,835*	17 [28]
Salmi (kg)	63,1	0,1036 [29]	1,468* [30]	2,125 [31]
Elektroenerģija (kWh)	988	0,1019 [32]	0	3,6
Siltumenerģija (kWh)	754	0,0942 [32]	0	3,6

* Šim pētījumam aprēķināta vērtība.

Modelēšana

Daži modeļa elementi pārņemti no jau esošā modeļa, kas izstrādāts bioekonomikas sektoram Rīgas Tehniskajā universitātē [33]. Tie modificēti un attīstīti šī pētījuma vajadzībām. Modelis pielāgots, lai simulētu rūpnīcai līdzīgu vidi materiālu salīdzināšanai. Veiktas vairākas izmaiņas attiecībā uz izejvielu pieejamību, pieejamo platību, ražošanu, pētniecību un attīstību, emisijām, kā arī pievienoti jauni parametri – “enerģija” un “funkcionālie kubikmetri”.

Lai noteiktu materiālu ražošanai izmantojamo platību, tika pieņemts, ka kopējā pieejamā zeme ražošanai ir 10 000 m². Sākotnēji tiek izmantoti 1000 m² (lai saražotu 1 m³ materiāla), bet atlikušie 9000 m² ir pieejami ražošanai, pamatojoties uz sākotnējo zemes piešķiršanas laiku un ienākumiem no oglekļa tirdzniecības. Palielinoties ienākumiem no oglekļa tirdzniecības, samazinās zemes piešķiršanas laiks, līdz ar to palielinās zemes piešķiršanas ātrums un ražošanai atvēlētā platība.

Micēlija izolācijas ražošanai nepieciešami deviņi izejmateriāli. Izejvielas tiek papildinātas katru gadu, pamatojoties uz ražošanas platību un izejmateriālu ražību.

Izejvielas tiek uzkrātas vienotā krājumā un summētas, lai noteiktu gada potenciālo ražošanas apjomu. Krājumi darbojas kā ražošanas ierobežojums, jo nav iespējams saražot vairāk materiāla, nekā uzkrāts izejvielās. Ražošana ir atkarīga ne tikai no uzkrātā materiāla un potenciālās ražošanas, bet arī no pieejamās ražošanas jaudas. Ražošanas jauda nosaka maksimāli iespējamo ražošanas apjomu, jo nav iespējams saražot vairāk izolācijas materiāla, nekā spēj nodrošināt tehniskās iekārtas.

Tiek pieņemts, ka ražošanas elektroenerģijas patēriņu var samazināt par 30 %, siltumenerģijas patēriņu – par 45 %. Sākotnējais laiks energoefektivitātes uzlabošanas pētījumiem ir noteikts pieci gadi, savukārt laiks, kas nepieciešams risinājumu izstrādei no laboratorijas līdz ieviešanai, ir trīs gadi. Sākotnējā ražošanas ražība ir noteikta 90 (m³/m²)/gadā, un to var palielināt līdz 120 (m³/m²)/gadā. Sākotnējais ražības izpētes periods ir 50 gadi, risinājumu ieviešanas periods – 25 gadi. Papildus nepieciešams 10 gadu periods jauno risinājumu apguvei, kas nav atkarīgs no pētniecības un attīstības laika. Pētniecības un attīstības ilgumu var ietekmēt finansiālais atbalsts, kas tiek piešķirts šiem procesiem. Finansējums

pētniecībai un attīstībai tiek iegūts, pārdodot novērstās CO₂ emisijas. Šī investīcija var samazināt “pētniecības laiku” un “izstrādes laiku” līdz pat divām reizēm.

Katrs ražošanā izmantotais materiāls rada noteiktu emisiju daudzumu uz vienu tonnu. Zinot izolācijas materiāla ražošanā izmantoto izejvielu daudzumu, tika aprēķinātas materiālu emisijas (ietvertās emisijas), reizinot izlietoto izejvielu daudzumu ar tā emisijas koeficientu. Līdzīgi tika aprēķināts absorbētā CO₂ daudzums, izmantojot absorbcijas koeficientu emisijas koeficienta vietā.

Katra materiāla ikgadējās emisijas tika summētas, lai noteiktu kopējo emisiju apjomu no materiālu izmantošanas. Elektroenerģijas un siltumenerģijas emisiju aprēķināšanai tika izmantots gada patēriņa rādītājs, kas reizināts ar attiecīgo emisijas koeficientu. Pēc tam rezultāti summēti, lai noteiktu kopējo emisiju apjomu no enerģijas patēriņa. Lai aprēķinātu micēlija izolācijas materiāla emisijas koeficientu, tika summētas gan ikgadējās materiāla izmantošanas emisijas, gan enerģijas patēriņa emisijas un dalītas ar kopējo saražotā micēlija izolācijas materiāla daudzumu.

Lai aprēķinātu emisiju starpību uz vienu izolācijas materiāla kubikmetru, tika izmantoti citu sintētisko materiālu emisijas koeficienti. Šī atšķirība tika izmantota, lai noteiktu, cik daudz emisiju tiek novērsts, ražojot micēlija izolācijas materiālu sintētisko materiālu vietā. Tāpat tika veikts kumulatīvo emisiju salīdzinājums katram izolācijas materiālam. Ietvertās enerģijas aprēķina pieeja bija ļoti līdzīga ietvertu emisiju aprēķinam. Izejvielās ietvertā enerģija tika reizināta ar ievades materiāla daudzumu, pēc tam pievienots elektroenerģijas un siltuma patēriņš, un summētā enerģija tika dalīta ar saražotā materiāla daudzumu. Lai aprēķinātu enerģijas patēriņa samazinājumu, tika izmantota atšķirība starp micēlija izolācijas materiālu un citiem materiāliem. Tāpat tika noteikts kumulatīvais enerģijas patēriņš katra materiāla ražošanas procesā.

Aplūkotojiem izolācijas materiāliem ir atšķirīga siltumvadītspēja, tāpēc ir jāveic korekcija, lai veiktu salīdzinājumu, pamatojoties uz materiālu daudzumu, kas nodrošina vienādas siltumizolācijas īpašības. Tāpēc ieviests jēdziens “funkcionālie kubikmetri” (fm³) – izolācijas materiāla daudzums, kas nepieciešams, lai nodrošinātu tādu pašu siltuma plūsmas vērtību kā salīdzināmajam materiālam. Korekcija veikta, aprēķinot aplūkoto izolācijas materiālu siltumvadītspējas attiecību pret micēlija izolācijas materiāla siltumvadītspēju (1.6. tab.). Lai aprēķinātu funkcionālās ietvertās emisijas un funkcionālo ietvertu enerģiju, attiecība tika reizināta ar attiecīgā izolācijas materiāla ietvertu emisiju un ietvertu enerģiju. Lai noteiktu micēlija materiāla siltumvadītspēju, kā izejvielu komponentu siltumvadītspējas vērtības tika ņemtas literatūrā atrodamās vidējās vērtības [11].

Izolācijas materiāla siltumvadītspējas vērtības
un siltumvadītspējas attiecība pret micēlija siltumvadītspēju

Materiāls	Siltumvadītspēja, W/(m·K)	Micēlija siltumvadītspējas attiecība, bez mērvienībām
Micēlija izolācija	0,04	1
<i>EPS</i>	0,035	0,875
<i>XPS</i>	0,0345	0,863
Poliuretāns	0,0285	0,713
Fenola putas	0,021	0,525

2. REZULTĀTI

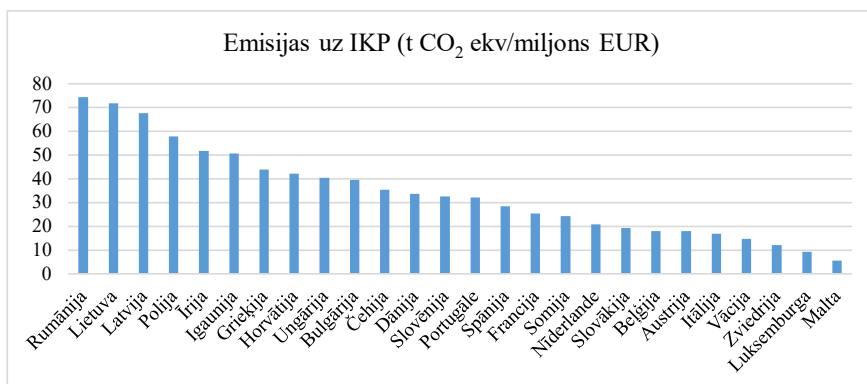
Rezultātu nodaļā sniegts SEG emisiju analīzes rezultātu izklāsts, *TIMES* modeļa lietojuma novērtējums, micēlija siltumizolācijas materiāla un sistēmas dinamikas modeļa analīzes rezultāti. Šie rezultāti sniedz ieskatu bioekonomikas ilgtspējīgas attīstības iespējās, kas pielāgotas Latvijas un ES kontekstam.

2.1. Siltumnīcefekta gāzu emisiju analīze

Pēc SEG emisiju analīzes metodoloģijas izklāsta šajā apakšnodaļā ir sniegti rezultāti, kas ilustrē emisiju intensitātes atšķirības starp Eiropas Savienības valstīm un identificē galvenās problēmas.

2.1. attēlā redzami dati par SEG emisiju apjomu (izteikts kā oglekļa dioksīda ekvivalenta kilotonnas) uz miljonu eiro no IKP dažādās Eiropas valstīs. Šis rādītājs sniedz ieskatu katras valsts ekonomikas vides efektivitātē, parādot, cik daudz SEG tiek emitēts:

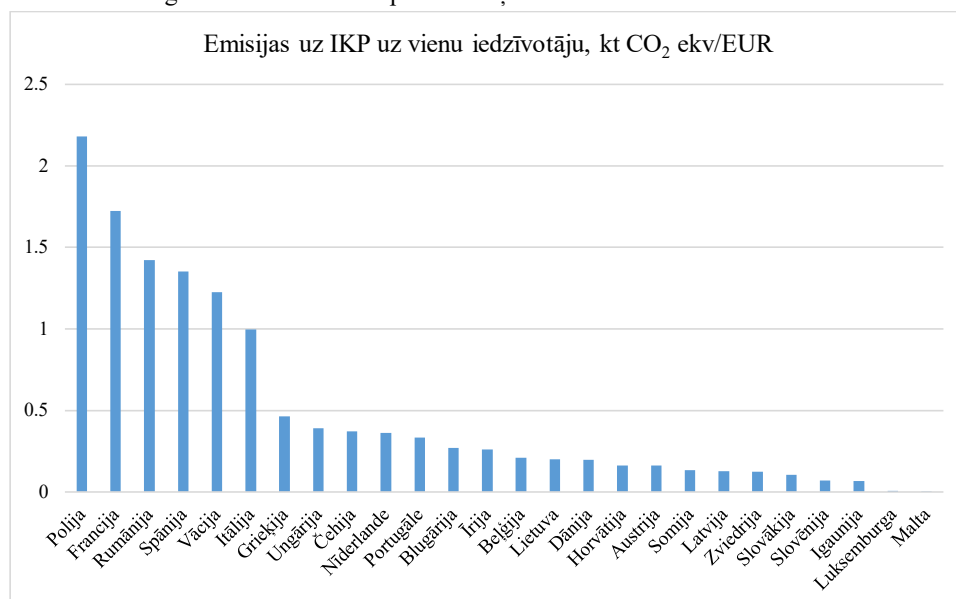
- Austrija un Beļģija izceļas ar salīdzinoši zemām emisijām uz miljonu eiro no IKP, kas liecina par efektīvu resursu izmantošanu ekonomikā;
- tādas valstis kā Bulgārija, Horvātija, Grieķija, Latvija, Lietuva, Polija un Rumānija uzrāda augstākas emisijas uz miljonu eiro no IKP, kas liecina par videi mazāk draudzīgu ražošanu;
- Īrija izceļas ar lielām emisijām, iespējams, pateicoties specifiskām ekonomiskajām aktivitātēm. Īrija ir liela lopkopības un piena ražošanas valsts, kur lielu daļu siltumnīcefekta gāzu emisiju rada dzīvnieku audzēšana, īpaši metāns, kas rodas no dzīvnieku gremošanas procesiem. Tāpat arī ķīmiski apstrādātās augsnes un mēslojuma izmantošana var palielināt slāpekļa oksīdu emisijas;
- Maltā ir viszemākās emisijas uz vienu miljonu eiro no IKP, kas liecina par salīdzinoši videi draudzīgu ekonomikas attīstību SEG emisiju izteiksmē uz vienu ekonomiskās produkcijas vienību.



2.1. attēls. Emisijas lauksaimniecībā uz IKP.

2.2. attēlā redzami dati par SEG daudzumu lauksaimniecības sektorā attiecībā pret IKP uz vienu iedzīvotāju dažādās valstīs. Tas izteikts kā oglekļa dioksīda ekvivalenta kilotonnas uz eiro no IKP uz vienu iedzīvotāju. Šis rādītājs palīdz novērtēt lauksaimniecības nozares ietekmi uz vidi katrā valstī, ņemot vērā emisiju apjomu, ekonomisko aktivitāti un iedzīvotāju skaitu.

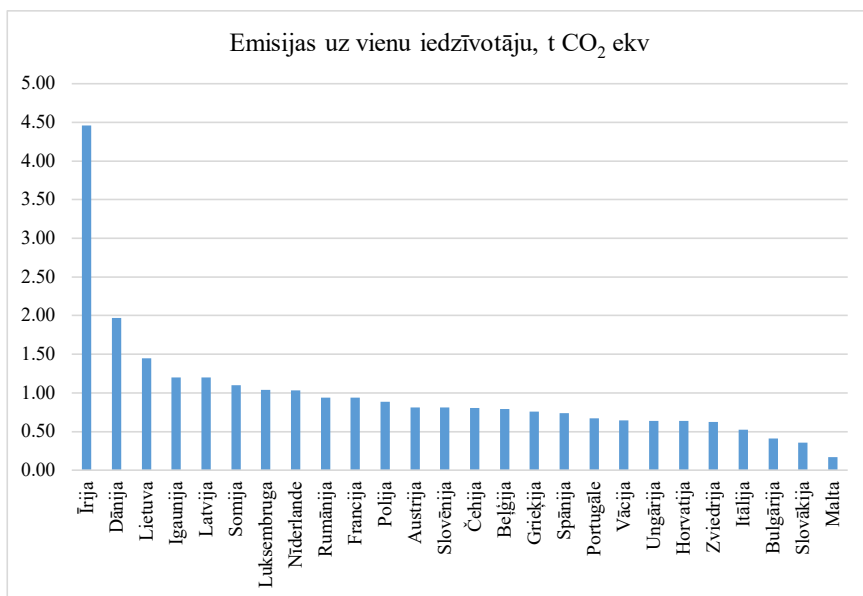
- Tādās valstīs kā Polija, Francija, Rumānija, Spānija un Vācija lauksaimniecības sektorā ir salīdzinoši augstas emisijas attiecībā pret IKP uz vienu iedzīvotāju, kas var liecināt par lielu lauksaimniecības nozares ietekmi uz vidi šajās valstīs.
- Tādās valstīs kā Malta un Luksemburga emisijas lauksaimniecības nozarē IKP uz vienu iedzīvotāju ir ļoti zemas, iespējams, lauksaimniecības sektora mazās nozīmes vai videi draudzīgas lauksaimniecības prakses dēļ.



2.2. attēls. Emisijas lauksaimniecībā uz IKP uz vienu iedzīvotāju.

2.3. attēlā redzami dati par SEG daudzumu lauksaimniecības sektorā uz vienu iedzīvotāju dažādās valstīs, kas izteikts kt CO₂ ekv. uz vienu iedzīvotāju. Šis rādītājs ir indikators tam, cik daudz valsts lauksaimniecības sektorā izdala SEG uz vienu iedzīvotāju.

- Tādās valstīs kā Īrija un Dānija ir salīdzinoši augstas lauksaimniecības nozares emisijas uz vienu iedzīvotāju, kas var liecināt par to, ka šo valstu lauksaimniecības nozare rada lielāku SEG emisiju apjomu salīdzinājumā ar iedzīvotāju skaitu.
- Tādās valstīs kā Malta un Slovākija emisijas lauksaimniecības nozarē uz vienu iedzīvotāju ir salīdzinoši zemas, iespējams, lauksaimniecības nozares mazās nozīmes vai efektīvas vides aizsardzības prakses dēļ šajās valstīs.



2.3. attēls. Emisijas lauksaimniecībā uz vienu iedzīvotāju.

Neraugoties uz ES vērienīgajiem mērķiem līdz 2030. gadam samazināt lauksaimniecības radītās SEG emisijas, pašreizējās tendences liecina par neviendabīgu virzību uz šo mērķu sasniegšanu. Lai gan dažas dalībvalstis ir panākušas ievērojamu progresu emisiju ierobežošanā, citas joprojām saskaras ar problēmām, lai sasniegtu samazināšanas mērķus.

Vairākas dalībvalstis, tostarp Horvātija, Grieķija un Slovākija, kopš 2005. gada ir panākušas ievērojamu lauksaimniecības emisiju samazinājumu. Šīs valstis ir veiksmīgu emisiju samazināšanas pasākumu piemēri, kas parāda, ka ir iespējami efektīvi mazināšanas pasākumi. Eiropā kopējās lauksaimniecības SEG emisijas ir nedaudz samazinājušās laikā no 2005. līdz 2021. gadam, kas liecina par zināmu progresu 2030. gada samazināšanas mērķu sasniegšanā. Šī tendence liecina, ka pašreizējiem pasākumiem ir bijusi zināma ietekme uz emisiju samazināšanu lauksaimniecības nozarē [34]. Neskatoties uz vispārējiem samazinājumiem, lauksaimniecības emisijas dažās dalībvalstīs, piemēram, Bulgārijā, Igaunijā, Ungārijā, Īrijā, Latvijā un Luksemburgā, ir palielinājušās. Šīs valstis saskaras ar problēmām, īstenojot pietiekamus seku mazināšanas pasākumus. Tām var būt strukturāli šķēršļi, kas kavē emisiju samazināšanas centienus. Prognozes liecina, ka bez turpmākas iejaukšanās dažas ES dalībvalstis paredz emisiju samazināšanas tendenču maiņu. Piemēram, Grieķija un Rumānija sagaida, ka emisijas palielināsies, ja turpināsies spēkā esošie pasākumi, uzsverot nepieciešamību palielināt centienus, lai sasniegtu mērķus [35]. Dalībvalstīs pastāv lielas atšķirības attiecībā uz emisiju līmeņiem un virzību uz mērķiem. Tādi faktori kā lauksaimniecības prakse, zemes izmantošanas modeļi un politikas struktūras veicina šīs atšķirības. Eiropas Komisijas ietekmes novērtējumā uzsvērti izaicinājumi, kas saistīti ar turpmāku lauksaimniecības neradītā CO₂ ekvivalenta SEG emisiju samazināšanu, norādot uz

inovatīvu stratēģiju un mērķētu pasākumu nepieciešamību [36]. Lai paātrinātu virzību uz lauksaimniecības emisiju samazināšanas mērķiem, dalībvalstīm par prioritāti būtu jānosaka efektīvi seku mazināšanas pasākumi, kas pielāgoti to konkrētajam kontekstam un problēmām. Ilgtspējīgas lauksaimniecības prakses veicināšana, ieguldījumi pētniecībā un inovācijās, kā arī atbilstoša atbalsta un stimulu nodrošināšana lauksaimniekiem ir ļoti svarīgi, lai sasniegtu emisiju samazināšanas mērķus. Sadarbības centieni Eiropas līmenī, tostarp paraugprakses apmaiņa, zināšanu apmaiņa un saskaņotas politikas struktūras, var veicināt kolektīvu rīcību un virzību uz kopīgu mērķu sasniegšanu [37].

Papildus SEG emisiju analīzei ir svarīgi izpētīt nozarē radītos lauksaimniecības blakusproduktus un izpētīt, kā šos resursus var izmantot pilnībā. Izmantojot *TIMES* modeli, ir iespējams novērtēt šādu blakusproduktu pieejamību, vērtību un optimālu lietojumu dažādos tehnoloģiskos un ražošanas scenārijos. Šī analīze ļauj identificēt ilgtspējīgus ceļus lauksaimniecības atlikumu integrēšanai bioekonomiskajos procesos, piemēram, bioenerģijas ražošanā, materiālu izstrādē un augsnes uzlabošanā, tādējādi veicinot gan emisiju samazināšanu, gan augstākas pievienotās vērtības produktu radīšanu nozarē.

2.2. *TIMES* modelis

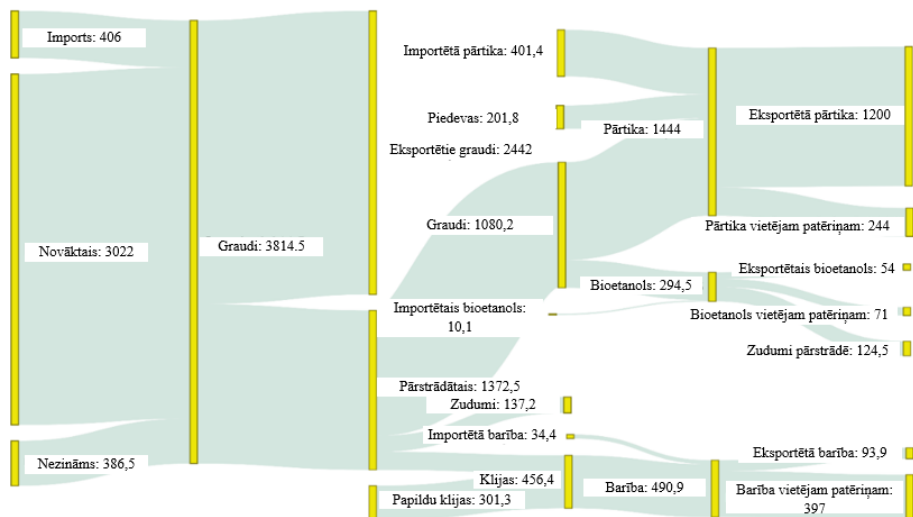
TIMES modeļa scenāriju analīze piedāvā integrētu skatījumu uz bioresursu plūsmām un to potenciālu nākotnes bioekonomikas attīstību. Šajā apakšnodaļā aplūkoti rezultāti un to interpretācija klimatneitralitātes kontekstā. *TIMES* modelis sniedz detalizētu skatījumu uz dažādu lauksaimniecības blakusproduktu un kultūraugu (piemēram, graudi, dārzeņi un augu eļļas) potenciālu pievienotās vērtības radīšanā, integrējot inovatīvas tehnoloģijas, piemēram, otrās paaudzes biodegvielu vai šķiedru pulvera ražošanu. Šī analīze ļauj modelēt scenārijus, kuros iespējams pārorientēt lauksaimniecību uz augstākas pievienotās vērtības produktiem ar zemāku SEG intensitāti.

Lauksaimniecības nozares bioresursu izmantošanas pievienotās vērtības analīzes rīks *TIMES* ir izstrādāts un pārbaudīts gadījuma izpētē par Latvijas lauksaimniecības nozari, ņemot vērā metodes ierobežojumus un pieejamības datus. Gadījuma izpētes scenāriji ietver bāzes scenāriju lauksaimniecības nozarei un alternatīvus attīstības scenārijus ar jaunām tehnoloģijām un produktiem ar pievienoto vērtību. Rezultāti parādīti bāzes scenārijam atsevišķi katrai lauksaimniecības resursu grupai (labība, augu eļļas un dārzeņi), kā arī alternatīvajiem scenārijiem kopā. Prognozes balstītas vēsturiskajos datos, kā arī cilvēku skaita izmaiņās Latvijā, ņemot vērā to, ka pasaulē cilvēku skaits pieaugs un pieaugs arī eksports. Rezultāti parādīti *Sankey* diagrammās.

Bāzes scenārijs graudaugiem

2.4. attēlā redzamas bioresursu plūsmas bāzes scenārijā 2015. gadam ar fiksētiem ievades preču parametriem, lai sniegtu vēsturisku skatījumu uz augkopības nozari. Rezultāti liecina, ka lielākā daļa augkopības produktu tiek audzēti Latvijā un importētā daļa ir mazāka. Preču plūsmu masas bilance rada neatbilstības. Tāpēc, lai apmierinātu pieprasījumu, procesos tiek patērēti

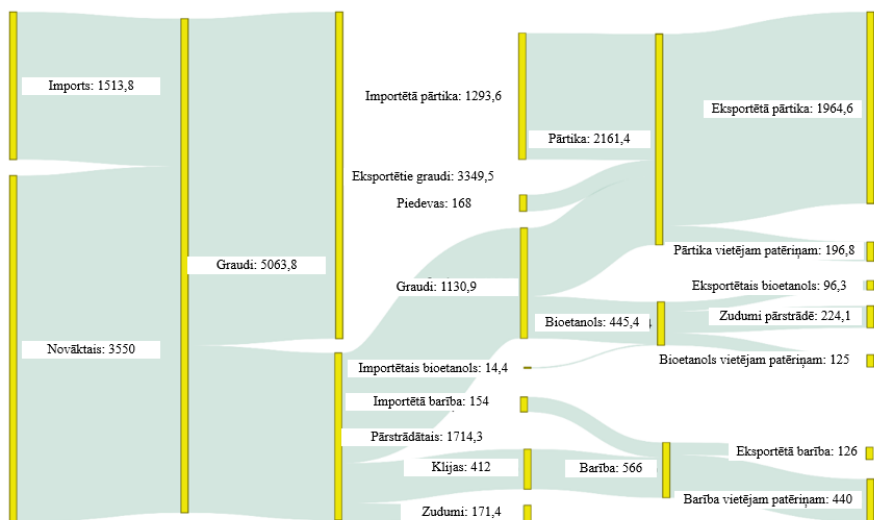
daži nezināmas izcelsmes augkopības produkti, kas neparādās statistikā. Tādējādi modeli izmantoti nezināmas izcelsmes augkopības produkti, lai aizpildītu plaisu starp piedāvājumu un pieprasījumu, ņemot vērā pašreizējo kultūraugu apstrādes tehnoloģiju efektivitāti.



2.4. attēls. Sankey diagramma bāzes scenārija bioresursu plūsmām 2015. gadā graudaugiem, tūkst. t.

2.4. attēlā parādīts, ka galvenās gatavās labības produkcijas plūsmas 2015. gadā ir pārtika iekšzemes patēriņam un eksportam, kam seko lopbarība iekšzemes patēriņam un eksportam. Graudaugu produktiem tiek pievienotas piedevas, un tās veido lielu daļu no galapārtikas. Ražojot pārtiku no graudaugiem, primārajā pārstrādē tiek iegūti blakusprodukti, no kuriem tiek ražota lopbarība. Daļa labības tiek izmantota pirmās paaudzes bioetanola ražošanai.

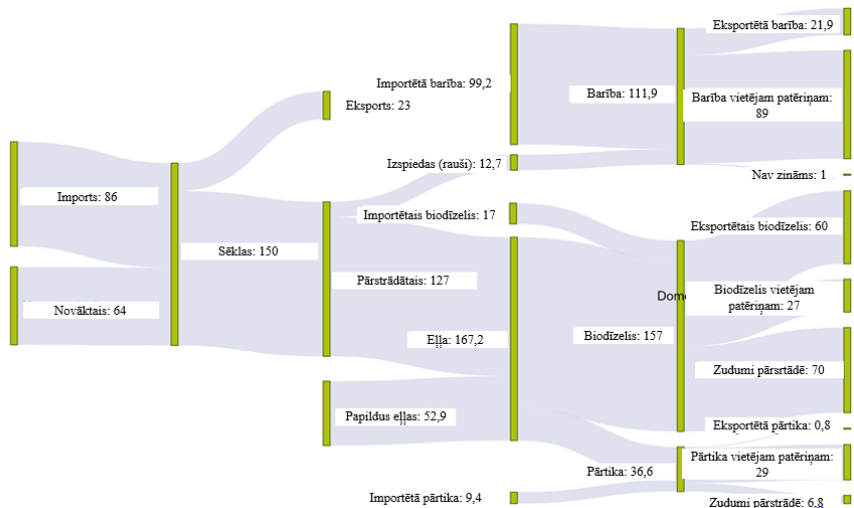
2.5. attēlā parādīta preču plūsma 2030. gada bāzes scenārijam. Galvenās izmaiņas, salīdzinot ar 2015. gadu, ir graudaugu pārtikas un lopbarības ražošanā, jo pieprasījums pēc pārtikas samazinājies par 20 %, kas skaidrojams ar iedzīvotāju skaita samazināšanos Latvijā, tomēr, ņemot vērā pieaugošo pasaules iedzīvotāju skaitu, palielinās graudaugu eksports. Samazinājies arī pieprasījums pēc lopbarības, jo tiek prognozēts, ka kopējais mājlopu skaits nedaudz samazināsies, savukārt pieprasījums pēc bioetanola ir pieaudzis, kas skaidrojams ar pieprasījuma pēc biodegvielas pieaugumu.



2.5. attēls. Sankey diagramma bioresursu plūsmām bāzes scenārijā 2030. gadā graudaugiem, tūkst. t.

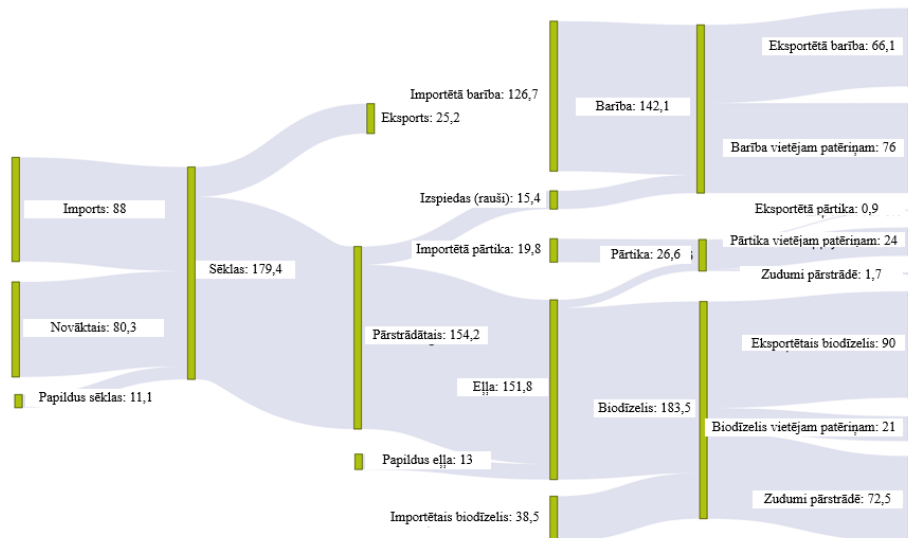
Bāzes scenārijs augu eļļām

2.6. attēlā redzamās galvenās gatavās augu eļļas ražošanas plūsmas 2015. gadā ir biodīzeļdegvielas iekšzemes patēriņam un eksportam, kam seko barība iekšzemes patēriņam un eksportam. Augu eļļu primārajā pārstrādē tiek iegūti blakusprodukti, no kuriem tiek ražota lopbarība. Liela daļa augu eļļu tiek izmantota pirmās paaudzes bioetanola ražošanai.



2.6. attēls. Sankey diagramma bāzes scenārija bioresursu plūsmām 2015. gadā augu eļļām, tūkst. t.

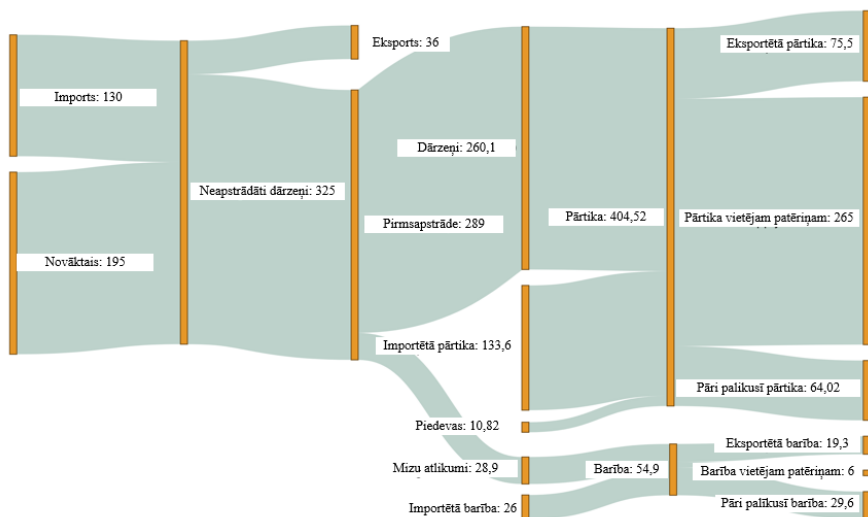
2.7. attēlā redzama preču plūsma 2030. gada bāzes scenārijam. Galvenās izmaiņas, salīdzinot ar 2015. gadu, ir pārtikai un lopbarībai paredzēto augu eļļu ražošanā, jo pieprasījums pēc pārtikas samazinājies par 17 %, kas skaidrojams ar iedzīvotāju skaita samazināšanos. Samazinājies arī pieprasījums pēc lopbarības, jo tiek prognozēts, ka kopējais mājlopu skaits nedaudz samazināsies, tajā pašā laikā ir palielinājies pieprasījums pēc biodīzeļdegvielas.



2.7. attēls. Sankey diagramma bāzes scenārija bioresursu plūsmām 2030. gadā augu eļļām, tūkst. t.

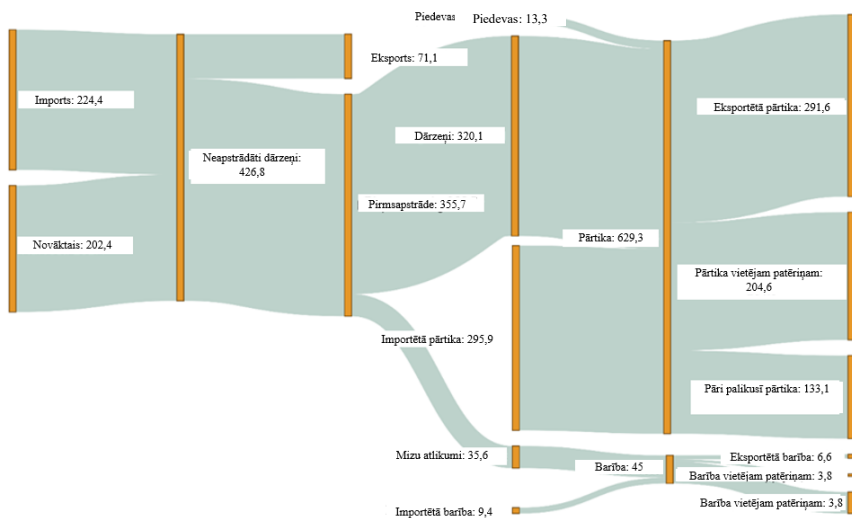
Bāzes scenārijs dārzeņiem

2.8. attēlā redzamās galvenās gatavās dārzeņu produkcijas plūsmas 2015. gadā ir pārtika iekšzemes patēriņam un eksportam, kam seko lopbarība iekšzemes patēriņam un eksportam. Dārzeņu produktiem tiek pievienotas piedevas, un tās veido nelielu daļu no galaprodukta. Ražojot pārtiku no dārzeņiem, primārajā pārstrādē tiek iegūti blakusprodukti, no kuriem tiek ražota lopbarība.



2.8. attēls. Sankey diagramma bāzes scenārija bioresursu plūsmām 2015. gadā dārzeņiem, tūkst. t.

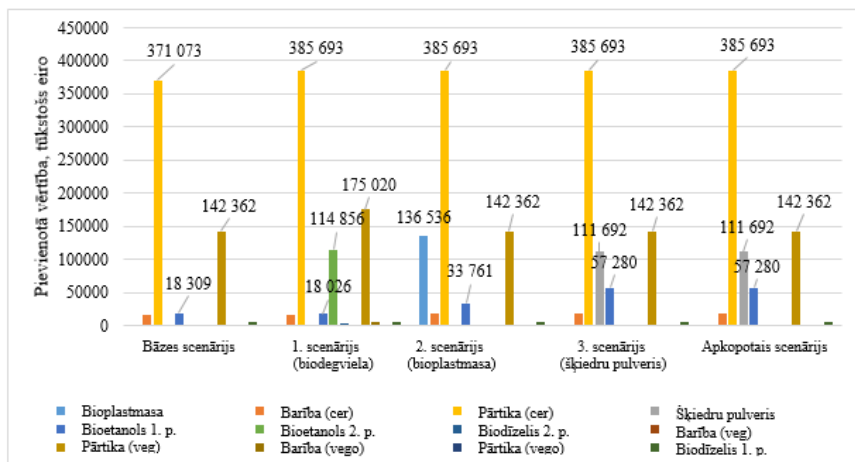
2.9. attēlā redzami preču plūsmas rezultāti 2030. gada bāzes scenārijam. Galvenās izmaiņas, salīdzinot ar 2015. gadu, ir dārzeņu ražošanā pārtikai un lopbarībai, jo pieprasījums pēc pārtikas samazinājies par 22 %, kas skaidrojams ar iedzīvotāju skaita samazināšanos Latvijā, savukārt pasaules iedzīvotāju skaita pieauguma dēļ dārzeņu eksports palielinās. Samazinājies arī pieprasījums pēc lopbarības, jo paredzams, ka kopējais mājlopu skaits nedaudz samazināsies.



2.9. attēls. Sankey diagramma bāzes scenārija bioresursu plūsmām 2030. gadā dārzeņiem, tūkst. t.

Alternatīvo scenāriju analīze

Papildus bāzes scenārijam kultūraugu gadījuma izpētei ar *TIMES* izmantoti četri alternatīvi scenāriji. Alternatīvais scenārijs ietver jaunu tehnoloģiju pieejamību pēc 2025. gada. Alternatīvo scenāriju rezultāti salīdzināti ar bāzes scenāriju pēc pievienotās vērtības 2030. gadā (2.10. att.).



2.10. attēls. Scenāriju analīze jaunajām tehnoloģijām lauksaimniecības nozarē Latvijā, 2030. gads.

Bāzes scenārijs liecina, ka visaugstākā pievienotā vērtība tiek sasniegta no graudaugu pārtikas un dārzeņu pārtikas produktu ražošanas. Ja pievienotās vērtības mērķis ir noteikts +30 % no bāzes scenārija, pirmajā scenārijā pievienotā vērtība tiek sasniegta, palielinot pārtikas ražošanu, citu produktu ražošanu un pievienojot jaunu tehnoloģiju (otrās paaudzes biodegvielas ražošanu). Otrajā scenārijā pievienotā vērtība tiek sasniegta, palielinot pārtikas ražošanu no labības un bioetanola ražošanu no graudaugiem, savukārt vislielāko ieguldījumu pievienotās vērtības mērķa sasniegšanā veido bioplastmasas ražošana (jauna tehnoloģija). Trešajā scenārijā pārtikas un citu produktu ražošana no labības uzrāda pieaugumu un parādās jaunu tehnoloģiju izmantošana šķiedrvielu pulvera ražošanā. Analīzē tika ņemti vērā vairāki faktori:

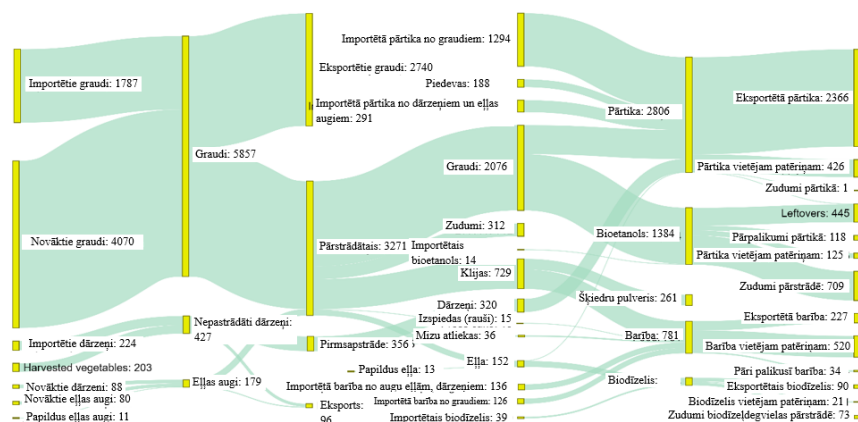
- Tehnoloģiju kapacitāte, efektivitāte, investīciju un ekspluatācijas izmaksas, kalpošanas laiks un pieejamība.
- Produktu pievienotā vērtība, kas aprēķināta, izmantojot Eiropas Komisijas un Latvijas Centrālās statistikas pārvaldes datus.
- Tirgus pieprasījums un produkcijas apjomi.

Analīzes rezultātā tika konstatēts, ka visizdevīgākais alternatīvais scenārijs ir šķiedru pulvera ražošana no graudu klijām. Apkopotie scenāriju rezultāti liecina, ka pievienotās vērtības mērķi var sasniegt, ieviešot šķiedru pulvera ražošanu, kam ir augstākā pievienotā vērtība nekā biodegvielai vai bioplastmasai un kas ir ekonomiski dzīvotspējīga. Šķiedru pulvera ražošana no graudu pārstrādes blakusproduktiem (klijām) ir ekonomiski izdevīga, jo tā:

- izmanto esošos blakusproduktus, samazinot atkritumu daudzumu;
- piedāvā augstu pievienoto vērtību, īpaši pārtikas sektorā;
- prasa salīdzinoši zemākas investīcijas un ekspluatācijas izmaksas.

Šis scenārijs atbilst bioekonomikas mērķiem, veicinot ilgtspējīgu resursu izmantošanu un ekonomisko izaugsmi.

Graudaugi veido lielāko augkopības daļu. Pēc statistikas datiem lielākais izaudzētās labības apjoms tiek eksportēts, un lielākā daļa graudu tiek izmantota pārtikas ražošanā (visu veidu miltu izstrādājumi). Dārzeni un augu eļļas veido vismazāko augkopības produktu daļu. Pārtikas ražošanai tiek izmantota lielākā daļa graudaugu, dārzenu un eļļu, bet mazākā daļa ir atvēlēta lopbarībai un citiem produktiem (biodegvielai). Modelis parāda arī zudumus pārstrādes procesos un pārpalikumus, kas skaidrojami ar datubāzu neatbilstībām. Scenārijos tika ieviestas jaunas tehnoloģijas. Graudaugu blakusprodukti tiek izmantoti otrās paaudzes biodegvielas ražošanā, augu atliekas un blakusprodukti – bioplastmasas ražošanā. Kā jauna tehnoloģija scenārijā aplūkota arī graudu kliju izmantošana šķiedru pulvera ražošanā. Līdzīgi kā trešajā scenārijā, arī apkopotajā scenārijā šķiedras daudzums ir diezgan mazs (2.11. att.) – tikai 261 tūkst. tonnu. Taču šis apjoms ir pietiekams, lai sasniegtu pievienotās vērtības mērķi, jo pārtikai ir augstāka pievienotā vērtība bioekonomikā, salīdzinot ar bioplastmasu un biodegvielu.



2.11. attēls. Vislabākais alternatīvais scenārijs, kas modelē bioresursu plūsmu 2030. gada augkopības sektoram, tūkst. t.

Apkopojot rezultātus par *TIMES* modeli Latvijas lauksaimniecības kontekstā, var secināt, ka efektīva bioresursu izmantošana ļauj veidot videi draudzīgākus attīstības scenārijus. Tomēr, lai sasniegtu reālu emisiju samazinājumu praksē, būtiska loma ir arī inovatīvu materiālu izstrādei un lietošanai.

Tādēļ nākamajā pētījuma posmā uzmanība tika pievērsta alternatīva bioloģiskā materiāla – uz micēlija bāzēta siltumizolācijas materiāla – novērtējumam. Šis materiāls piedāvā ne tikai iespēju samazināt lauksaimniecības atkritumus, bet arī veicina aprites ekonomikas principu

ieviešanu būvniecības sektorā. Turpmākajās apakšnodaļās analizēti eksperimentālie rezultāti, kas iegūti micēlija materiāla izstrādes, īpašību novērtēšanas un salīdzinājuma ar tradicionālajiem materiāliem procesā.

2.3. Micēlija siltumizolācijas materiāla rezultāti

Lai novērtētu micēlija kā siltumizolācijas materiāla īpašības, veikti vairāki eksperimenti, kuros analizēta tā siltumvadītspēja un blīvums. Šie parametri ir svarīgi, jo tie nosaka materiāla spēju samazināt siltuma zudumus un piemērotību dažādiem būvniecības un izolācijas lietojumiem.

Nodaļā iekļautajās tabulās apkopoti eksperimentu rezultāti, kas atspoguļo izmērītās siltumvadītspējas koeficienta un blīvuma vērtības dažādos micēliju materiālu paraugos. Šie dati ļauj salīdzināt dažādu sastāvu un apstrādes metožu ietekmi uz micēlija izolācijas efektivitāti.

2.1. tabula

17 micēlija materiāla paraugu siltumvadītspējas rezultāti

Nr.	$\lambda_1, \text{W/(mK)}$	$\lambda_2, \text{W/(mK)}$	$\lambda_3, \text{W/(mK)}$	$\lambda_{\text{vids}}, \text{W/(mK)}$
S2	0,049	0,049	0,049	0,049
S3	0,048	0,047	0,048	0,048
S5	0,053	0,053	0,054	0,053
S4	0,047	0,048	0,047	0,047
S6	0,05	0,046	0,045	0,047
S7	0,048	0,046	0,046	0,047
S8	0,045	0,042	0,042	0,043
S9	0,044	0,044	0,044	0,044
S11	0,045	0,045	0,045	0,045
S12	0,043	0,044	0,044	0,043
S13	0,049	0,047	0,047	0,047
S14	0,044	0,044	0,044	0,044
S15	0,044	0,044	0,044	0,044
S16	0,044	0,043	0,044	0,044
S17	0,044	0,043	0,044	0,044
S18	0,045	0,045	0,045	0,045
S19	0,045	0,045	0,045	0,045

2.1. tabulā apkopoti 17 micēlija materiālu siltumvadītspējas rezultāti. Tos nevarēja noteikt paraugam S1 un paraugam S10. Paraugs S1 bija pārāk šķidr, un pārmērīgais ūdens daudzums neļāva micēlijam izaugt cauri materiālam. Paraugam S10 tika izmantota austeru micēlija suga,

kas nespēja izaugt cauri materiālam, tāpēc turpmākajos eksperimentos šī suga netika izmantota. Pēc iegūtajiem rezultātiem secināts, ka lielāks salmu daudzums un mazāks šķeldas daudzums samazina siltumvadītspējas koeficientu. Materiālā ļoti liela nozīme ir arī saistvielu pievienošanai, jo, pievienojot pārāk daudz saistvielu (piemēram, ksantānu un lipīgos rīsus), materiāls kļūst stingrs, tomēr, palielinot materiāla stingrību, tiek nosprostotas poras un palielinās siltumvadītspējas koeficients. Eksperimentāli tika meklētas sastāvdaļas, kas palīdz materiālam veidot tā iekšpusē nepieciešamo porainību. Labus rezultātus uzrādīja sodas pievienošana, kuras izmantošana turpināta arī turpmākajos eksperimentos.

2.2. tabula

17 micēlija materiāla paraugu blīvums

Nr.	$\rho_1, \text{kg/m}^3$	$\rho_2, \text{kg/m}^3$	$\rho_3, \text{kg/m}^3$	$\rho_{\text{avg}}, \text{kg/m}^3$
S2	178	182	180	180
S3	140	145	146	144
S5	168	177	178	174
S4	81	82	83	82
S6	81	79	76	79
S7	120	119	116	118
S8	90	89	89	89
S9	103	103	104	103
S11	115	114	115	115
S12	106	106	105	105
S13	95	95	94	95
S14	84	85	85	85
S15	74	74	75	74
S16	76	79	79	78
S17	74	75	76	75
S18	81	81	82	81
S19	102	103	103	103

2.2. tabulā redzams micēlija materiāla blīvums. Vislielākais blīvums konstatēts paraugos, kuriem ir labāka izturība, bet sliktāka siltumvadītspēja. Ņemot vērā to, ka eksperimenta laikā netika pārbaudīts nepieciešamais materiālam pievienojamā micēlija daudzums, tika izstrādāts eksperimentu plāns micēlija, barotnes un ūdens attiecības noteikšanai.

2.3. tabula

Eksperimentālais plāns, pārbaudot nepieciešamo micēlija daudzumu, kā arī siltumvadītspējas rezultātus

	Šķelda	Salmi	Ūdens	Ksantāns	Soda	Micēlijs	Barotne	Λ_{vids} W/(mK)
Origināls, g	62,5	187,5	65,63	2,29	13,44	0,177	200	
%	11,76	35,28	12,35	0,43	2,53	0,03	37,63	
1. variants, g	62,5	187,5	65,63	2,29	13,44	0,177	200	
%	11,76	35,28	12,35	0,43	2,53	0,03	37,63	
Svars eksperimentā, g	39	117	40,95	1,429	8,39	0,11	124,8	0,04037
1. varinats, g	62,5	187,5	65,72	2,29	13,44	0,089	200	
%	11,76	35,28	12,36	0,43	2,53	0,02	37,63	
Svars eksperimentā, g	39	117	41	1,43	8,39	0,055	124,8	0,04098
3. variants, g	62,5	187,5	65,453	2,29	13,44	0,354	200	
%	11,76	35,28	12,31	0,43	2,53	0,07	37,63	
Svars eksperimentā, g	39	117	40,84	1,43	8,39	0,22	124,8	0,04068
4. variants, g	62,5	187,5	130,63	2,29	13,44	0,177	135	
%	11,76	35,28	24,58	0,43	2,53	0,03	25,40	
Svars eksperimentā, g	39	117	81,51	1,43	8,39	0,11	84,24	0,04182
5. variants, g	62,5	187,5	0,63	2,29	13,44	0,177	265	
%	11,76	35,28	0,12	0,43	2,53	0,03	49,86	
Svars eksperimentā, g	39	117	0,39	1,43	8,39	0,11	165,36	0,04197
6. variants, g	62,5	187,5	81,36	0	0	0,177	200	
%	11,76	35,28	15,31	0,00	0,00	0,03	37,63	
Svars eksperimentā, g	39	117	50,78	0	0	0,11	124,8	

2.3. tabulā apkopoti rezultāti, kas iegūti eksperimenta daļā, kurā tika meklēts vislabākais sēnīšu sporu, *PDA* un ūdens daudzums, kas nepieciešams sēnītes augšanai materiālā.

2.4. tabula

Micēlija paraugu variantu blīvums

Nr.	$\rho_1, \text{kg/m}^3$	$\rho_2, \text{kg/m}^3$	$\rho_3, \text{kg/m}^3$	$\rho_{\text{vid}}, \text{kg/m}^3$
1. variants	82	81	80	81
2. variants	72	72	72	72
3. variants	80	79	80	80
4. variants	72	71	69	70
5. variants	80	80	78	79
6. variants	—	—	—	—

Tika sastādīts eksperimentālais projekts, lai noteiktu labākās barotnes, micēlija un ūdens attiecības, un no iegūtajiem rezultātiem var secināt, ka koksnes skaidu attiecība pret salmiem, kā arī ksantāna daudzums būtiski ietekmē materiāla stiprību un siltumvadītspējas koeficientu. Turpinot pētījumu, pārbaudītas labākās vienādojumos ieteiktās proporcijas, lai uzlabotu micēlija materiāla siltumvadītspēju.

2.5. tabula

Micēlija paraugu siltumvadītspējas rezultāti

Nr.	$\lambda_1, \text{W/(mK)}$	$\lambda_2, \text{W/(mK)}$	$\lambda_{\text{vid}}, \text{W/(mK)}$
ŠS0.11K1.43	0,04263	0,04331	0,04297
ŠS0.33K0.33	0,05153	0,04971	0,05062
ŠS0.11K0.31	0,04295	—	0,04295
ŠS0.33K1.43	0,04949	0,04972	0,04961
ŠS0.74K0.88	0,04214	0,04253	0,04234

2.5. tabulā apkopoti eksperimentā iegūtie siltumvadītspējas rezultāti. Paraugs Nr. ŠS0.11K0.31 bija pārāk trausls, un tā siltumvadītspēju varēja izmērīt tikai vienu reizi.

2.6. tabula

Micēlija paraugu blīvums

Nr.	$\rho_1, \text{W/(mK)}$	$\rho_2, \text{W/(mK)}$	$\rho_{\text{vid}}, \text{W/(mK)}$
ŠS0.11K1.43	64	64	64
ŠS0.33K0.33	141	139	140
ŠS0.11K0.31	66	—	66
ŠS0.33K1.43	134	135	135
ŠS0.74K0.88	83	82	83

Eksperimenti tika veikti, izmantojot šķeldu un salmus, bet, lai uzlabotu rezultātus, micēlijs tika audzēts uz salmiem un siena.

Siena un salmu materiālu īpašības

Nr.	$\lambda_{\text{vid}}, \text{W/(mK)}$	$\rho_{\text{vid}}, \text{kg/m}^3$
Sa25Sie75	0,0391	72
Sa75Sie25	0,0403	78
Sa50Sie50	0,0393	79

Rezultāti liecina, ka vislabāko siltumvadītspēju nodrošina paraugi, kas satur 25 % siena un 75 % salmu.

2.4. Sistēmdinamikas modeļa rezultāti

Ietvertās emisijas un enerģija

Micēlija siltumizolācijas materiāla sākotnējā ietvertā emisiju vērtība ir 213 kgCO₂ekv/m³, un, samazinot elektroenerģijas un siltuma patēriņu, kas nepieciešams 1 m³ materiāla ražošanai, pētniecības un attīstības rezultātā ietvertās emisijas tiek samazinātas līdz 159 kgCO₂ekv/m³. Sākotnēji materiālu izmantošana veido 19 % no kopējām ražošanas emisijām jeb 40 kgCO₂ekv/m³, siltumenerģijas patēriņš – 33 % jeb 71 kgCO₂eq/m³, elektroenerģijas patēriņš – 48 % jeb 101 kgCO₂eq/m³. Līdz 2050. gadam materiālu izmantošanas radītās emisijas saglabājas nemainīgas, pieaugot tikai par 27 %, siltumenerģijas emisijas samazinās līdz 26 % jeb 39 kgCO₂ekv/m³, elektroenerģijas emisijas – līdz 47 % jeb 70 kgCO₂ekv/m³. Micēlija izolācijas materiālam ir zemākas ietvertās emisijas nekā citiem pārbaudītajiem materiāliem (2.8. tab.). Ja emisijas tiek rēķinātas, ņemot vērā CO₂ absorbciju, tad sākotnējā micēlija izolācijas materiāla ietvertā emisiju vērtība ir –244 kgCO₂ekv/m³, un, samazinoties enerģijas patēriņam, tā tiek samazināta līdz –298 kgCO₂ekv/m³. Salīdzinot ietverto emisiju vērtības, pamatojoties uz funkcionālo m³, atšķirības starp micēlija un sintētiskajiem materiāliem ir mazākas (2.8. tab.), jo sintētiskajiem materiāliem ir zemāka siltumvadītspēja.

2.8. tabula

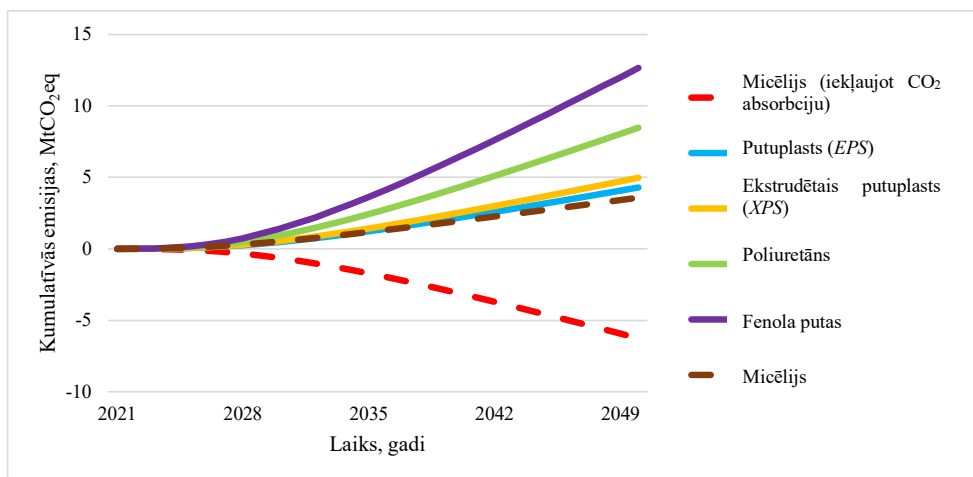
Sākotnējās ietvertās emisijas un enerģijas vērtības uz 1 m³ un funkcionālo 1 m³ micēlija izolācijas un sintētisko izolācijas materiālu

Materiāls	Ietvertās emisijas, kgCO ₂ eq/m ³	Ietvertās emisijas, kgCO ₂ eq/fm ³	Ietvertā enerģija, MJ/m ³	Ietvertā enerģija, MJ/fm ³
Micēlija izolācijas	213	213	16176	16176
Micēlija izolācijas (ietverot CO ₂ absorbciju)	-244	-244		
EPS	231,2	202	3532	3091
XPS	271,8	234	3200	2760
Poliuretāns	560,5	399	10184	7256
Fenola putas	1136	596	8600	4515

Vajadzība pēc elektroenerģijas un siltuma samazināšanas mazina arī micēlija izolācijas materiāla ietvērto enerģiju. Sākotnēji micēlija izolācijas materiāla enerģija ir 16 176 MJ/m³, un 2050. gadā, samazinoties nepieciešamībai pēc siltuma un elektroenerģijas, enerģijas vērtība tiek samazināta līdz 14 071 MJ/m³. Lielāko daļu ietvertās enerģijas iegūst no materiālu izmantošanas. Sākotnēji materiāli rada 61 % no visām izstarotajām emisijām, bet, samazinoties nepieciešamībai pēc siltuma un elektroenerģijas, materiāla enerģijas daļa palielinās līdz 71 %. Visiem sintētiskajiem materiāliem uz 1 m³ izolācijas materiāla ir zemākas enerģijas vērtības nekā micēlija izolācijai. Salīdzinātās materiāla radītās emisijas un enerģijas vērtības ražošanas periodā paliek nemainīgas.

Akumulētās SEG emisijas

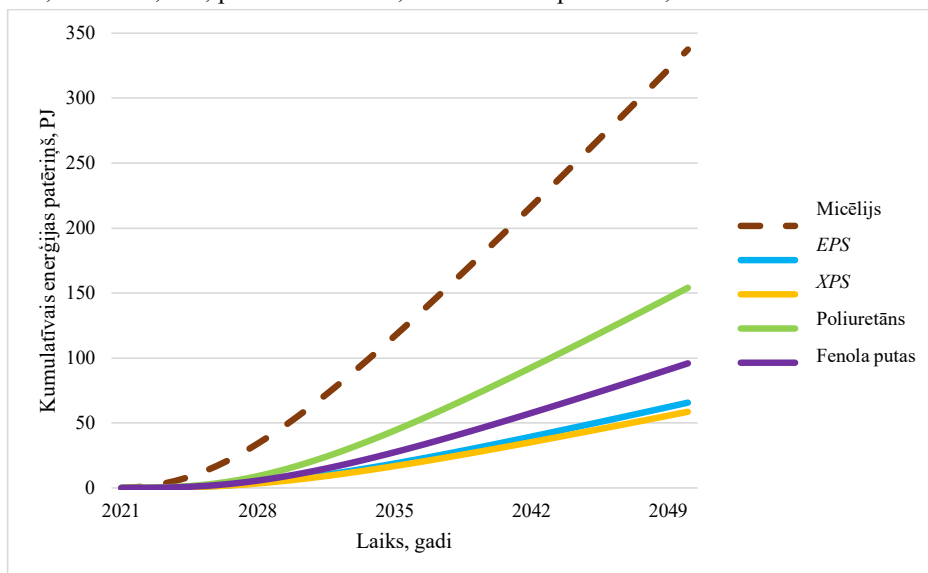
Micēlija izolācijas materiālam ir vismazākās emisijas uz kubikmetru materiāla (2.12. att.), tāpēc kumulatīvā emisijas vērtība ražošanas procesā ir viszemākā. Micēlija izolācija kumulatīvi rada 3,58 MtCO₂ekv. Ja ir iekļauta CO₂ absorbcija, tiek lēsts, ka micēlija izolācijas materiāls absorbē 6,26 MtCO₂ekv. Sintētisko materiālu emisijas ir EPS – 4,3 MtCO₂ekv, XPS – 4,98 MtCO₂ekv, poliuretāns – 8,48 MtCO₂ekv un fenola putas – 12,7 MtCO₂ekv. Materiālu daudzumu korekcija siltumvadītspējas atšķirību dēļ tika veikta iepriekš raksturotajā veidā. Tas pats attiecas uz kumulatīvo enerģijas patēriņu.



2.12. attēls. Izolācijas materiālu ražošanas kumulatīvās SEG emisijas.

Akumulētais enerģijas patēriņš

Rezultāti liecina, ka micēlija izolācijas materiālam ir vislielākā ietvertā enerģija uz kubikmetru materiāla (2.13. att.). Tāpēc micēlija izolācijas kumulatīvā enerģijas patēriņa vērtība ir visaugstākā (337 PJ). Sintētisko materiālu kumulatīvie enerģijas patēriņš ir EPS – 65,6 PJ, XPS – 58,6 PJ, poliuretāns – 154,1 PJ un fenola putas – 95,9 PJ.

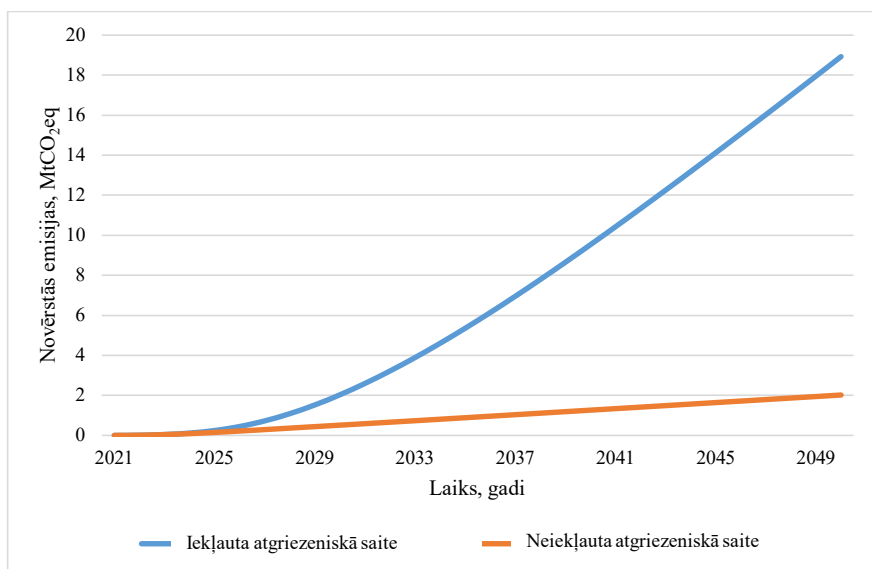


2.13. attēls. Izolācijas materiālu ražošanas kumulatīvais enerģijas patēriņš.

Atgriezeniskās saites ietekme uz novērstajām emisijām

Ja atgriezeniskajā saitē tiek izmantoti ieņēmumi no pārdotajām oglekļa emisijām, lai finansētu pētniecību un attīstību un piešķirtu zemi atjaunojamo siltumizolācijas materiālu ražošanai (2.14. att.), tad kumulatīvi novērsto emisiju apjoms, salīdzinot sintētisko materiālu izmantošanu ar micēlija izolācijas materiālu izmantošanu, sasniedz gandrīz 19 MtCO₂eq (2.14. att.). Ja atgriezeniskā saite netiek ņemta vērā, novērstās kumulatīvās emisijas ir tikai aptuveni 2 MtCO₂eq.

Iekļaujot atgriezeniskās saites efektus, ieņēmumi no oglekļa kvotu pārdošanas tiek ieguldīti pētniecībā un attīstībā, kas palielina izmantotās zemes ražību un ražošanas energoefektivitāti (gan elektroenerģijas, gan siltuma izmantošanā). Šie ieņēmumi ļauj arī piešķirt papildu zemi ražošanai. Ja atgriezeniskā saite netiek ņemta vērā, šie efekti nepastāv.



2.14. attēls. Kumulatīvās novērstās SEG emisijas, salīdzinot micēlija materiāla emisijas ar emisijām, ko rada fenola putas, iekļaujot un izslēdzot atgriezeniskās saites efektu.

2.14. attēlā redzamie rezultāti iegūti, salīdzinot emisijas, kas rodas no micēlija materiāla ražošanas, ar emisijām, kas rodas fenola putu izolācijas ražošanā. Promocijas darbā atgriezeniskās saites ietekme tika novērtēta tikai salīdzinājumā ar fenola putām vairāku apsvērumu dēļ. Fenola putas ir viens no tehnoloģiski modernākajiem un efektīvākajiem tradicionālajiem siltumizolācijas materiāliem, kam raksturīga zema siltumvadītspēja un augsta ugunsdrošība. Tādēļ tās kalpo kā reprezentatīvs etalons sintētisko siltumizolācijas materiālu grupā, ļaujot precīzāk novērtēt jaunā micēlija bāzes materiāla potenciālu samazināt kopējo ietverto enerģiju un SEG emisijas.

SECINĀJUMI

1. Bioloģisko resursu optimizācijas modelis *TIMES* var kalpot kā analītisks rīks efektīvākai bioresursu izmantošanai un pārejai uz augstākas pievienotās vērtības produktu ražošanu. Balstoties uz eksperimenta rezultātiem, micēlija materiāla izmantošana kā ilgtspējīga izolācija varētu būt nozīmīgs solis SEG emisiju samazināšanā. Tādējādi promocijas darbā izvirzītā hipotēze tika apstiprināta.
2. Lauksaimniecības emisiju intensitātes atšķirības Eiropā ir saistītas ar vairākiem faktoriem – lauksaimniecības praksi, ekonomikas struktūru, politikas pamatnostādņēm, vides apstākļiem, tehnoloģiju attīstību un sociālajiem faktoriem. Ilgtspējīgāka lauksaimniecība, efektīvāka resursu izmantošana un politikas atbalsta mehānismi var samazināt emisijas. Lai samazinātu lauksaimniecības radītās emisijas, būtiski jāuzlabo dzīvnieku barības kvalitāte un jāveicina bioloģiskās lauksaimniecība.
3. *TIMES* modelis ir efektīvs līdzeklis bioresursu optimizācijai, jo ļauj analizēt piedāvājuma un pieprasījuma scenārijus, pamatojoties uz tehnoloģiju un resursu izmaksām. Pētījumi par Latvijas lauksaimniecības nozari atklāj datu nepilnības, kas ietekmē analīzi. Turpmākajos pētījumos jāiekļauj jaunas tehnoloģijas un reģionālā modelēšana. Sagaidāms, ka līdz 2030. gadam iedzīvotāju skaita samazināšanās dēļ samazināsies pieprasījums pēc pārtikas, tāpēc jākoncentrējas uz augstākas pievienotās vērtības produktu ražošanu.
4. No deviņām sēņu sugām vislabākos rezultātus sniedza *Trichoderma viride*, kas spēja ātri augt uz substrāta. Materiāla siltumvadītspēja ir no 0,039–0,053 W/m·K, blīvums 72–120 kg/m³. Mehāniskās stiprības testi parādīja, ka ksantāns un glutēns palielina materiāla izturību, bet pārmērīgs to daudzums palielina siltumvadītspēju. Koksnes šķeldas daudzums būtiski ietekmēja mehānisko izturību, savukārt siena un salmu paraugi uzrādīja vislabākos siltuma pārnešanas koeficientus. Pētījums sniedz vērtīgu ieskatu micēlija materiālu izmantošanā.
5. Micēlija izolācija rada zemākas SEG emisijas nekā sintētiskie materiāli, jo ražošanas procesā tiek absorbēts CO₂. Aprēķini liecina, ka micēlija izolācija var piesaistīt līdz 298 kgCO₂/m³, padarot to par oglekļa negatīvu materiālu. Salīdzinot ar fenola putām, micēlija izolācijas izmantošana varētu samazināt SEG emisijas par 18,9 MtCO₂eq noteiktā laika posmā (izpēte tika veikta no 2021. līdz 2050. gadam). Tomēr tā ražošana patērē vairāk enerģijas nekā sintētiskie materiāli, tāpēc ir nepieciešami papildu pētījumi, lai optimizētu enerģijas patēriņu un novērtētu dažādas ražošanas metodes.

ATSAUCES

- [1] “EEA greenhouse gases — data viewer — European Environment Agency.” <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/greenhouse-gases-viewer> (accessed May 15, 2024).
- [2] “Statistics | Eurostat.” https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/DEMO_GIND__custom_7127262/default/table (accessed May 15, 2024).
- [3] “Statistics | Eurostat.” <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/tec00114/default/table?lang=en> (accessed May 15, 2024).
- [4] “Policies for the Future of Farming and Food in the European Union,” Oct. 2023, doi: 10.1787/32810CF6-EN.
- [5] “Common agricultural policy - European Commission.” https://agriculture.ec.europa.eu/common-agricultural-policy_en (accessed May 15, 2024).
- [6] “The European Green Deal - European Commission.” https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en (accessed May 15, 2024).
- [7] I. PAENSON, *Collection of Statistical Data*. 1970.
- [8] “FAOSTAT.” <https://www.fao.org/faostat/en/#data/BC> (accessed Jan. 17, 2022).
- [9] M. Pavičević *et al.*, “The potential of sector coupling in future European energy systems: Soft linking between the Dispa-SET and JRC-EU-TIMES models,” *Appl. Energy*, vol. 267, p. 115100, Jun. 2020, doi: 10.1016/J.APENERGY.2020.115100.
- [10] J. W. Forrester, “Counterintuitive behavior of social systems,” *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 3, no. C, pp. 1–22, 1971, doi: 10.1016/S0040-1625(71)80001-X.
- [11] D. This, “Characterization of mycelium- based composites as foam-like wall insulation material .,” 2020.
- [12] T. Binder, A. Vox, S. Belyazid, H. Haraldsson, and M. Svensson, “Developing system dynamics models from causal loop diagrams,” *Proc. 22nd Int. Conf. Syst. Dyn. Soc.*, no. February 2014, pp. 1–21, 2004.
- [13] F. Zadrazil, “Influence of CO₂ concentration on the mycelium growth of three pleurotus species,” *Eur. J. Appl. Microbiol.*, vol. 1, no. 4, pp. 327–335, 1975, doi: 10.1007/BF01382692.
- [14] City of Winnipeg, “Emission factors in kg CO₂-equivalent per unit,” *WSTP South End Plant Process Sel. Rep.*, 2011, [Online]. Available: https://www.winnipeg.ca/finance/findata/matmgt/documents/2012/682-2012/682-2012_Appendix_H-WSTP_South_End_Plant_Process_Selection_Report/Appendix_7.pdf%0Ahttp://www.winnipeg.ca/finance/findata/matmgt/documents/2012/682-2012/682-2012_Appendix_H-WSTP_South_.
- [15] H. Tanaka, “Thermal distillation system utilizing biomass energy burned in stove by means of heat pipe,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 55, no. 3, pp. 2203–2208, 2016, doi: 10.1016/j.aej.2016.06.008.
- [16] P. W. Rein, “The carbon footprint of sugar,” *Zuckerindustrie*, vol. 135, no. 7, pp. 427–434, 2010, doi: 10.36961/si10006.
- [17] C. Saunders, A. Barber, and G. Taylor, *Food Miles – Comparative Energy / Emissions Performance of New Zealand ’ s Agriculture Industry*, no. 285. 2006.
- [18] M. A. Yusuf, M. Romli, Suprihatin, and E. I. Wiloso, “Potential of Traditional Sago Starch: Life Cycle Assessment (LCA) Perspective,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*,

- vol. 507, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/507/1/012014.
- [19] G. Caroline, B. Joachim, S. Camille, and G. Benoît, "LCA of Starch Potato From Field To Starch Production Plant Gate," *8th Int. Conf. LCA Agri-Food Sect.*, no. October, p. 6, 2012.
 - [20] A. Flysjö, *Greenhouse gas emissions in milk and dairy product chains. Improving the carbon footprint of dairy products Greenhouse gas emissions in milk and dairy product chains improving the carbon footprint of dairy products.* 2012.
 - [21] A. L. Cowie, S. Wood, and A. Cowie, "for Fertiliser Production . Cooperative Research Centre for Greenhouse Accounting," no. January 2004, 2014.
 - [22] M. Vittuari, F. De Menna, and M. Pagani, "The hidden burden of food waste: The double energy waste in Italy," *Energies*, vol. 9, no. 8, 2016, doi: 10.3390/en9080660.
 - [23] I. Chang, J. Im, and G. C. Cho, "Introduction of microbial biopolymers in soil treatment for future environmentally-friendly and sustainable geotechnical engineering," *Sustain.*, vol. 8, no. 3, 2016, doi: 10.3390/su8030251.
 - [24] FAO/WHO, "COMBINED COMPENDIUM OF FOOD ADDITIVE SPECIFICATIONS. All specifications monographs from the 1st to the 65th meeting (1956–2005)," *FAO JECFA Monogr.*, 2006.
 - [25] C. A. Dove, F. F. Bradley, and S. V. Patwardhan, "A material characterization and embodied energy study of novel clay-alginate composite aerogels," *Energy Build.*, vol. 184, pp. 88–98, 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.10.045.
 - [26] M. V. E. Santana, Q. Zhang, and J. R. Mihelcic, "In fl uence of Water Quality on the Embodied Energy of Drinking Water Treatment," 2014.
 - [27] A. Sgarbossa, M. Boschiero, F. Pierobon, R. Cavalli, and M. Zanetti, "Comparative life cycle assessment of bioenergy production from different wood pellet supply chains," *Forests*, vol. 11, no. 11, pp. 1–16, 2020, doi: 10.3390/f11111127.
 - [28] B. May, J. R. England, R. J. Raison, and K. I. Paul, "Cradle-to-gate inventory of wood production from Australian softwood plantations and native hardwood forests: Embodied energy, water use and other inputs," *For. Ecol. Manage.*, vol. 264, pp. 37–50, 2012, doi: 10.1016/j.foreco.2011.09.016.
 - [29] P. Wiśniewski and M. Kistowski, "Greenhouse gas emissions from cultivation of plants used for biofuel production in Poland," *Atmosphere (Basel)*, vol. 11, no. 4, pp. 1–12, 2020, doi: 10.3390/ATMOS11040394.
 - [30] "STRAW-BALE – Carbon Smart Materials Palette." <https://www.materialspalette.org/straw-bale/> (accessed Jun. 02, 2025).
 - [31] V. Havrysh, A. Kalinichenko, A. Brzozowska, and J. Stebila, "Life Cycle Energy Consumption and Carbon Dioxide Emissions of Agricultural Residue Feedstock for Bioenergy," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 5, p. 2009, 2021, doi: 10.3390/app11052009.
 - [32] VARAM, "Siltumnīcefekta gāzu emisiju aprēķina metodika (Greenhouse gas emission calculation methodology)," 2021. .
 - [33] A. Blumberga, G. Bazbauers, P. I. Davidsen, D. Blumberga, A. Gravelsins, and T. Prodanuks, "System dynamics model of a biotechnomy," *J. Clean. Prod.*, vol. 172, pp. 4018–4032, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.03.132.
 - [34] "Greenhouse gas emissions from agriculture in Europe." <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emissions-from-agriculture> (accessed May 23, 2024).
 - [35] A. Panton, "Making Romania Fit and Resilient for the Net-Zero Transition," *Sel. Issues Pap.*, vol. 2023, no. 063, p. 1, 2023, doi: 10.5089/9798400263736.018.
 - [36] E. K. Velten *et al.*, "Analysing the Impact Assessment on Raising the EU 2030 Climate Target." 2020, Accessed: May 23, 2024. [Online]. Available:

<https://www.ecologic.eu/17589>.

- [37] P. Agreement, “NDICI-Global Europe ‘Global Challenges’ thematic programme Multi-annual indicative programme 2021-2027 1 Executive summary,” pp. 1–42, 2021, [Online]. Available: <https://www.consilium.europa.eu/media/24011/european-consensus-for-development-st09459en17.pdf>.



Ilze Luksta dzimusi 1994. gadā Līvānos. Rēzeknes Tehnoloģiju akadēmijā ieguvusi bakalaura grādu vides inženierijā (2018), Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) – maģistra grādu vides zinātnē (2021). Kopš 2020. gada strādā RTU Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūtā, ieņemot zinātniskās asistentes amatu, kopš 2021. gada ir pētniece, kopš 2024. gada – lektore.

Zinātniskās intereses saistītas ar lauksaimniecības nozari, īpašu uzmanību pievēršot emisiju samazināšanas pasākumu analīzei un lauksaimniecības blakusproduktu efektīvai izmantošanai.