

Ilze Vamža

BIOEKONOMIKAS INOVĀCIJAS SKUJKOKU VĒRTĪBU ĶĒDĒ

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektronikas un vides inženierzinātņu fakultāte
Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts

Ilze Vamža

Doktorantūras studiju programmas “Vides inženierzinātnes” doktorante

BIOEKONOMIKAS INOVĀCIJAS SKUJKOKU VĒRTĪBU ĶĒDĒ Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji:
profesore *Dr. habil. sc. ing.*
DAGNIJA BLUMBERGA

docents *Dr. chem*
KĀRLIS VALTERS

RTU Izdevniecība
Rīga 2023

Vamža I. Bioekonomikas inovācijas skujkoku vērtību ķēdē. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2023. 44 lpp.

Publicēts saskaņā ar 2023. gada 30. jūnija promocijas padomes “RTU P-19” lēmumu, protokols Nr. 175.

Promocijas darbs izstrādāts Eiropas Sociālais fonds darbības programmas “Izaugsme un nodarbinātība” 8.2.2. specifiskā atbalsta mērķa “Stiprināt augstākās izglītības iestāžu akadēmisko personālu stratēģiskās specializācijas jomās” projektā Nr. 8.2.2.0/20/I/008 “Rīgas Tehniskās universitātes un Banku augstskolas doktorantu un akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās”.

Vāka attēli no *pexel.com* (*Pok Rie, Ron Lach, Tima Miroshnichenko*) un Ilzes Vamžas personīgā arhīva

<https://doi.org/10.7250/9789934370007>

ISBN 978-9934-37-000-7 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2023. gada 7. decembrī plkst. 14 Rīgas Tehniskās universitātes Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultātē, Āzenes ielā 12/1, 212. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Dr. sc. ing. Ainis Lagzdiņš,

Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitāte, Latvija

Dr. sc. (tech.) Timo Pekka Laukkanen,

Ålto Universitāte, Somija

Ph. D. Stelios Rozakis,

Ķīmijas un vides inženierzinātņu skola, Grieķija

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 Vamža (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 18 attēli, 15 tabulas, kopā 99 lappuses. Literatūras sarakstā ir 235 nosaukumi.

SATURA RĀDĪTĀJS

TĒMAS AKTUALĪTĀTE.....	5
IZPĒTES MĒRĶIS UN UZDEVUMI.....	5
PĒTĪJUMA NOVITĀTE.....	6
HIPOTĒZE.....	7
PRAKTISKĀ NOZĪME.....	7
PĒTĪJUMA STRUKTŪRA.....	7
1. METODES.....	10
1.1. EKSPERIMENTĀLĀ SKAIDU PLĀTŅU IZSTRĀDE	10
1.2. DAUDZKRITĒRIJU LĒMUMU PIENĒMŠANA.....	12
1.3. ANALĪTISKAIS HIERARHIJAS PROCESS.....	13
1.4. DŽĪVES CIKLA NOVĒRTĒŠANAS METODOLOĢIJA	14
1.5. DELFI METODE	18
1.6. INTERVIJAS	18
1.7. ALGORITMISKĀ LOĢIKA <i>Nexus</i> VEIDOŠANAI	19
1.8. BIORESURSU IZMANTOŠANAS INDEKSS.....	20
1.9. OGLEKĻA UZSKAITE KOKSNES IZSTRĀDĀJUMU RAŽOŠANĀ	21
1.10. SISTĒMAS DINAMIKAS MODELĒŠANA	22
2. REZULTĀTI	23
2.1. KOKA SKAIDU PLĀTNES NO SKUJKOKU MEŽIZSTRĀDES ATLIKUMIEM UN SAISTVIELĀM UZ BIOLOĢISKĀS BĀZES	23
2.2. SKAIDU PLĀTNES NO SKUJKOKU MEŽIZSTRĀDES ATLIKUMIEM	25
2.3. UZLABOTS APRITĪGUMS ŠĶĒRSĀM LĪMĒTAS KOKSNES RAŽOŠANĀ	28
<i>Šķērsām līmētas koksnes zāģmateriālu griešanas pārstrādes novērtēšana</i>	<i>28</i>
2.4. DABISKĀ TERMISKĀ IEPAKOJUMA TIRGUS PIEMĒROTĪBAS NOVĒRTĒJUMS	33
<i>Vēlamākais materiāls</i>	<i>35</i>
2.5. CO ₂ UZGLABĀŠANA KOKA PANEĻOS	36
2.6. OGLEKLIS MEŽA EKONOMIKĀ.....	36
2.7. BIOEKONOMIKU IETEKMĒJOŠIE FAKTORI UN RĀDĪTĀJI.....	39
<i>Lejupēja pieeja</i>	<i>39</i>
<i>Pieeja no apakšas uz augšu</i>	<i>40</i>
SECINĀJUMI	43

IEVADS

Autore pēta esošās prakses, produktu izstrādes un oglekļa emisiju samazināšanas stratēģiju nozīmi un ietekmi koksnēs vērtību ķēdē. Pētījums ir saskaņots ar bioloģiskās rūpniecības principiem, bioekonomiku, pievienotās vērtības radīšanas iespējām un globālo mērķi līdz 2050. gadam sasniegt oglekļa neitralitāti. Izmantojot visaptverošu pieeju, šī pētījuma mērķis ir sniegt ieskatu par skujkoku vērtību ķēdes potenciālu. Darbā tiek pētītas dažādu koksnēs vērtību ķēdes aspektu savstarpējās saiknes, šķērsām līmētās koksnēs otrreizējās pārstrādes ietekme uz vidi, siltumizolācijas iepakojums no meža koksnēs atlikumiem, uz bioloģiskas bāzes ražoti saistvielas koksnēs kompozītu izstrādājumiem, oglekļa uzglabāšana koksnēs izstrādājumos, oglekļa dinamika dažādos oglekļa krātuvēs, kā arī 100 % koksnēs skaidu plātņu uz bioloģiskas bāzes no meža mežizstrādes atlikumiem izveide.

TĒMAS AKTUALITĀTE

Šā pētījuma galvenais mērķis ir veicināt bioloģiskās rūpniecības attīstību, izpētot faktorus un tehnoloģijas, kas ietekmē pāreju uz resursu ziņā efektīvāku un oglekļa ziņā neitrālu ekonomiku. Darbs izskaidro ilgtspējīgas prakses un inovatīvu produktu izstrādi koksnēs vērtību ķēdē. Aizstājot fosilos resursus ar atjaunojamiem bioloģiskajiem resursiem, pētījums atbalsta pāreju uz ilgtspējīgāku un vidi draudzīgāku ekonomiku. Turklāt pētījums saskan ar bioekonomikas koncepciju, uzsverot bioloģisko resursu ilgtspējīgu izmantošanu. Koncentrējoties uz pievienotās vērtības radīšanas iespējām, šajā pētījumā tiek pētīta koksnēs produktu uzlabošana, izstrādājot uz bioloģiskas bāzes izgatavotas līmes, siltumizolācijas materiālus un 100 % uz bioloģiskas bāzes izgatavotas skaidu plātnes. Šo centienu mērķis ir palielināt meža nozares vērtību, konkurētspēju un ekonomisko dzīvotspēju, vienlaikus samazinot oglekļa dioksīda daudzumu atmosfērā.

Turklāt šis pētījums pievēršas steidzamajai nepieciešamībai līdz 2050. gadam panākt oglekļa neitralitāti un, izmantojot matemātisko modelēšanu, pēta potenciālo politiku, kā izmantot meža nozari kā oglekļa buferi. Tajā pētīta oglekļa dinamika starp oglekļa krātuvēm un novērtēts oglekļa uzglabāšanas potenciāls koksnēs skaidu plātnēs. Izstrādājot matemātisko modeli, šis pētījums ļauj labāk izprast oglekļa piesaistes potenciālu koksnēs vērtību ķēdē. Iegūtās atziņas var izmantot meža nozares politikas veidotāji, lai izstrādātu efektīvu politiku, kas atbilst globālajiem oglekļa neitralitātes mērķiem un veicina pāreju uz ilgtspējīgu bioekonomiku. Visbeidzot, šis pētījums sniedz ieguldījumu zināšanu krājumā par ilgtspējīgu praksi, produktu izstrādi un oglekļa emisiju samazināšanas stratēģijām koksnēs vērtību ķēdē. Tā secinājumi un ieteikumi ir pamats praktiskiem risinājumiem, kas veicina pāreju uz ilgtspējīgu nākotni ar zemu oglekļa dioksīda emisiju līmeni, sniedzot labumu gan meža nozarei, gan sabiedrībai.

IZPĒTES MĒRĶIS UN UZDEVUMI

Lai sasniegtu šā pētījuma galveno mērķi – veicināt bioloģiskās rūpniecības attīstību, tika izpētīti faktori un tehnoloģijas, kas ietekmē pāreju uz resursu ziņā efektīvāku un oglekļa ziņā neitrālu ekonomiku. Tika pētīta ilgtspējīga prakse, produktu attīstība un oglekļa emisiju samazināšanas

iespējas koksnes vērtību ķēdē, lai uzlabotu resursu efektivitāti, veicinātu videi draudzīgus risinājumus un sekmētu nozares vispārējo ilgtspējību. Lai sasniegtu galveno mērķi, tika izvirzīti vairāki uzdevumi.

1. Noteikt faktorus, kas ietekmē bioekonomiku, koncentrējoties uz resursu efektivitāti.
2. Izstrādāt bioresursu izmantošanas indeksu, lai novērtētu koksnes biomasas pievienoto vērtību.
3. Ierosināt kaskādes un aprites pieeju, lai uzlabotu koksnes vērtības ķēdes resursu efektivitāti un oglekļa uzglabāšanu ekonomikā.
4. Veikt dzīves cikla analīzes (*LCA*) inovatīviem produktiem, kas izstrādāti saskaņā ar šo darbu.
5. Veikt literatūras pārskatu par bioloģiskām līmēm no dažādiem koksnes atlikumiem.
6. Veikt eksperimentālu pētījumu par produktu, kas palielinātu izejmateriāla pievienoto vērtību, pārsniedzot tā pašreizējo lietojumu.

PĒTĪJUMA NOVITĀTE

Šajā pētījumā apvienotas vairākas novērtēšanas metodes un ilgtspējības aspekti: pievienotā vērtība, oglekļa dioksīda pēda un oglekļa dioksīda uzglabāšanas dinamika. Pētījuma novitāte slēpjas ilgtspējīgas prakses, produktu izstrādes un oglekļa emisijas atmosfērā mazināšanas izpētē koksnes vērtības ķēdē. Lai gan par konkrētiem šīs jomas tematiem jau ir izstrādāti pētījumi un patenti, šī pētījuma novitāte ir visaptverošā pieeja. Pētījumā visaptveroši izpētīti vairāki koksnes vērtību ķēdes aspekti, sākot no šķērsām līmētās koksnes pārstrādes un beidzot ar oglekļa dinamiku dažādos oglekļa baseinos. Šī holistiskā perspektīva rada pievienoto vērtību, ņemot vērā dažādu jomu savstarpējās saiknes un potenciālo sinerģiju, kas veicina integrētāku izpratni par ilgtspēju un oglekļa dioksīda pēdas nospieduma mazināšanu kokapstrādes nozarē. Šī darba mērķis ir risināt ilgtspējības problēmas un veicināt videi draudzīgus risinājumus koksnes vērtību ķēdē, pētot dažādas tēmas, piemēram, bioloģiskas izcelsmes līmes, siltumizolācijas iepakojumu un 100 % bioloģiskas izcelsmes skaidu plātnes, promocijas darbā tiek piedāvāti integrēti risinājumi, kas apvieno dažādas inovācijas un tehnoloģijas ilgtspējīgāku koksnes produktu un prakses nodrošināšanai. Turklāt oglekļa dinamikas pētījumi var kalpot par pamatu īpašas politikas izstrādei, dodot meža nozares politikas veidotājiem instrumentu efektīvai politikas izstrādei. Oglekļa dinamikas matemātiskais modelis starp oglekļa dioksīda krātuvēm var palīdzēt labāk izprast oglekļa sekvestrācijas potenciālu un koksnes izstrādājumu ietekmi uz vidi.

Šajā pētījumā noskaidroti septiņi galvenie faktori, kas ietekmē bioekonomiku, un uzmanība pievērsta meža nozarei, pētot šos septiņus faktorus saistībā ar koksnes vērtību ķēdi. Tāpēc šī pētījuma novitāte izriet arī no tā praktiskās ietekmes un reālās izmantošanas. Izpētītā šķērsām līmētās koksnes pārstrādes dzīvotspēja un ilgtspēja, izstrādātais siltumizolācijas iepakojums vai 100 % koksnes skaidu plātņu radīšana uz bioloģiskās bāzes sniedz ieskatu un potenciālos risinājumus, kam ir taustāma ietekme uz kokrūpniecību, resursu efektivitāti un oglekļa emisiju samazināšanas centieniem.

HIPOTĒZE

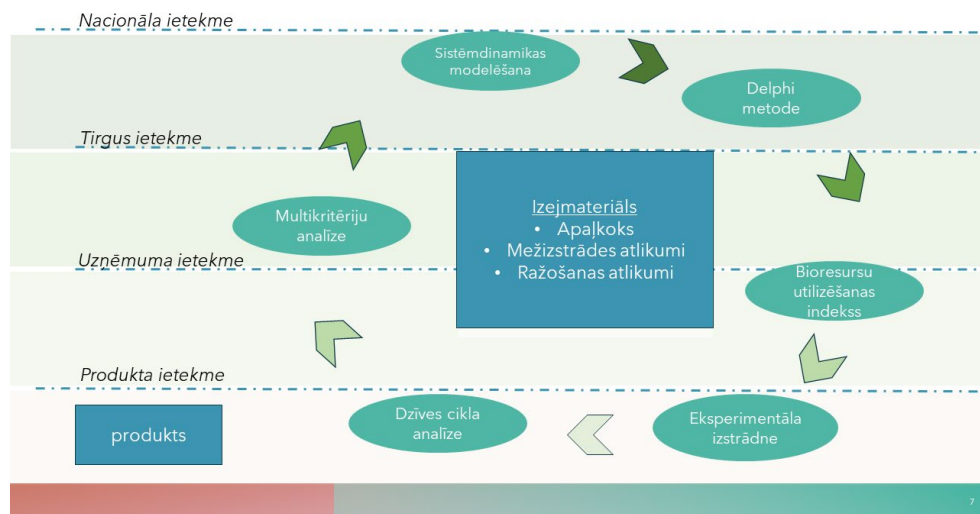
Koksnes vērtību ķēdi, neraugoties uz to, ka koksne ir bioloģiska izejviela, var izmantot visdažādākajos veidos – no neilgtspējīgas izmantošanas enerģijas ražošanai līdz ilgtermiņa oglekļa uzglabāšanai un pievienotās vērtības radīšanai. Integrējot ilgtspējīgas prakses, produktu izstrādi un oglekļa emisiju samazināšanas stratēģijas koksnes vērtību ķēdē, ir iespējams uzlabot resursu efektivitāti, samazināt koksnes rūpniecības oglekļa dioksīda emisijas nospiedumu un veicināt videi draudzīgus risinājumus, vienlaikus saglabājot ekonomisko dzīvotspēju.

PRAKTISKĀ NOZĪME

Saskaņā ar Latvijas Nacionālo pētniecības un inovāciju stratēģiju viedai specializācijai *RIS3* tautsaimniecībai ir jāmainās uz resursu efektīvu izmantošanu un sociālajām inovācijām galvenajās tautsaimniecības jomās, tostarp – mežsaimniecībā kā vienā no lielākajām jomām. Saskaņā ar Valsts pētījumu ekosistēmas 2014.–2018. gada pārskatu tikai neliela daļa pētījumu ir veltīta inovācijām koksnes biomasas izmantošanā. Tāpēc šī pētījuma praktiskā nozīme ir vairākos aspektos: (1) 100 % biokoksnes skaidu plātņu no meža atlikumiem patents; (2) sistēmas dinamikas modelis oglekļa plūsmām mežsaimniecībā; (3) vairāki priekšlikumi mežsaimniecības resursu efektivitātes uzlabošanai.

PĒTĪJUMA STRUKTŪRA

Promocijas darba pamatā ir septiņas zinātniskās publikācijas, un to virszuddevums ir izvērtēt un izpētīt iespējas paaugstināt skujkoku resursu izmantošanas efektivitāti un vērtību Latvijas mežsaimniecībā. Darbā ir izmantotas vairākas metodes, kas aptver tēmu vairākos līmeņos – valsts, tirgus, uzņēmuma un produkta (1. att.).



1. att. Vizuālā pētījuma struktūra.

Analizējamās parādības vai problēmas noteikšana. Pirmais solis bija skaidri definēt parādību vai problēmu, kas būs šī darba uzmanības centrā – Latvijas mežsaimniecība un skujkoku izmantošana.

Dati analīzei tika apkopoti atbilstoši iepriekš aprakstītajiem līmeņiem, un tika izmantota atbilstoša metodoloģija, lai sasniegtu nepieciešamos atskaites punktus turpmākajam darbam. Galvenās šajā darbā izmantotās metodoloģijas ir šādas: dzīves cikla novērtējums; daudzkritēriju analīze; sistēmas dinamikas modelēšana; skaidu kompozītmateriāla eksperimentālā izstrāde; Delfi metode un jaunizveidotais bioresursu izmantošanas indekss, kas apstiprināts zinātniskajā publikācijā.

Publikācijas

1. A Review of Bio-Based Adhesives from Primary and Secondary Biomass for Wood Composite Applications
Vamza, I., Krigers, G., Valters, K.
Environmental and Climate Technologies, 2022, 26 (1), pp. 1350–1360.
2. CO₂ Storage in Logging Residue Products with Analysis of Energy Production Scenarios
Viksne, G., Vamža, I., Terjanika, V., ...Pubule, J., Blumberga, D.
Environmental and Climate Technologies, 2022, 26 (1), pp. 1158–1168.
3. Bioresource utilization index – A way to quantify and compare resource efficiency in production
Vamza, I., Kubule, A., Zihare, L., Valters, K., Blumberga, D.
Journal of Cleaner Production, 2021, 320, 128791.
4. Bioeconomy triple factor nexus through indicator analysis
Zihare, L., Kubule, A., Vamza, I., Muizniece, I., Blumberga, D.
New Biotechnology, 2021, 61, pp. 57–68.
5. Complete Circularity in Cross-Laminated Timber Production
Vamza, I., Valters, K., Luksta, I., Resnais, P., Blumberga, D.
Environmental and Climate Technologies, 2021, 25 (1), pp. 1101–1113.
6. Criteria for choosing thermal packaging for temperature sensitive goods transportation
Vamza, I., Valters, K., Dzalbs, A., Kudurs, E., Blumberga, D.
Environmental and Climate Technologies, 2021, 25 (1), pp. 382–391.
7. Life Cycle Assessment of Reprocessed Cross Laminated Timber in Latvia
Vamza, I., Diaz, F., Resnais, P., Radziņa, A., Blumberga, D.
Environmental and Climate Technologies, 2021, 25 (1), pp. 58–70.
8. Forest residues towards climate neutral products
Krumins J. A., Vamza I., Dzalbs A., Blumberga, D.
Buildings (iesniegts manuskripts).

Ziņojumi zinātniskajās konferencēs

1. System dynamics thinking to optimize carbon storage in the wood-based economy
Vamza I., Gravelins A., Kasakovska A., Blumberga D., Prodanuks T.
European Biomass Conference EUBCE2023.

Citas zinātniskās publikācijas

1. Single Cell Oil Production from Waste Biomass: Review of Applicable Industrial By-Products
Spalvins, K., Vamza, I., Blumberga, D.
Environmental and Climate Technologies, 2019, 23 (2), pp. 325–337.
2. Multi-Criteria Analysis of Lignocellulose Substrate Pre-Treatment
Vamza, I., Valters, K., Blumberga, D.
Environmental and Climate Technologies, 2021, 24 (3), pp. 483–492.
3. Analysis of Bioeconomy Affecting Factors-Climate Change and Production
Indzere, Z., Kubule, A., Zihare, L., Vamza, I., Blumberga, D.
Environmental and Climate Technologies, 2021, 25 (1), pp. 1293–1304.

1. METODEDES

Rezultāti šajā darbā ir atspoguļoti atbilstoši metodoloģijai.

1.1. Eksperimentālā skaidu plātņu izstrāde

Tika veikti laboratorijas eksperimenti skaidu plātņu izgatavošanai, izmantojot skuju koku mežizstrādes atlikumus un saistvielas uz bioloģiskas bāzes, tādējādi atbalstot pāreju no fosilajiem materiāliem. Saistvielas tika izvēlētas, izmantojot literatūras pārskatu. Mežizstrādes biomasa tika piegādāta polietilēna maisos kā koksnes šķeldas, kas saturēja kodolkoksni, aplievu, mizu, skuju un citus materiālus. Mainīgie lielumi un vērtības ir norādītas 1.1. tabulā.

1.1. tabula

Neatkarīgie mainīgie un to minimālās un maksimālās vērtības

Parametrs	Min	Max
Kopējā masa, g	174	392
Daļiņu izmērs, mm	2,8	10
Darba temperatūra, °C	109	180
Darba spiediens, bar	235	675
Spiešanas laiks, min/mm	0,36	2,4
Līme, % W/W	0,25	10

Eksperimentālais stends tika izgatavots pēc pasūtījuma un ietvēra hidraulisko presi ar rokas sūkni (*Hansa Flex* – 10 t); analogo manometru (*Hansa Flex* – 600 bar, ± 50 bar); digitālo manometru (*Hansa Flex* – 1000 bar, ± 1 bar); cilindriskos sildelementus (maiņstrāvas); temperatūras sensorus; metāla bloku/virsmu sildīšanu. Eksperimentālais stends redzams 1.1. attēlā.



1.1. att. Hidrauliskā karstā prese.

Turklāt standā bija iekļauts: plākšņu žāvēšanas statīvs; metāla rāmji – metāla rāmis bez perforācijām biomasas aizturēšanai un metāla rāmis ar perforācijām biomasas aizturēšanai un tvaika novadīšanai; metāla oderējums tvaika novadīšanai; teflona audums.

Dažādos laikapstākļos, šķeldojot un piegādājot mežizstrādes atlikumus, tika novērots atšķirīgs mitruma daudzums koksnes šķeldā. No mežizstrādes vietām saņemtā biomasa redzama 1.2. attēlā.



1.2. att. No mežizstrādes vietas saņemtā biomasa.

Vispirms koksnes skaidas tika izņemtas no polietilēna maisiem un izžāvētas iekšstelpās līdz 8–10 % mitruma. Žāvēšana ilga aptuveni nedēļu atkarībā no sākotnējā mitruma. Mitruma līmenis tika mērīts, izmantojot *Greisinger GMH 3830* zondi. Izžāvētas šķeldas tika sasmalcinātas, izmantojot āmuru dzirnaviņas, lai iegūtu vēlamu daļiņu izmēru. Sākotnējā malšanā tika izmantots divu asu smalcinātājs, sijājot lielākās daļiņas vai izmantojot “*Vibrotehnik PM-120*” āmuru dzirnaviņas mazāku daļiņu malšanai. Daļiņu lieluma metodes bija atkarīgas no prasībām: (1) šķeldas smalcināšana smalcinātājā, kam sekoja āmuru dzirnaviņas, vai (2) sijāšana, izmantojot *Retsch AS-400* sietu kratītāju ar dažādu acu izmēru.

Sijāšanas procesā tiek iegūts daļiņu diapazons, nevis viens izmērs, un dažas daļiņas, kas ir mazākas platumā, bet garākas, var izklūt cauri. Dēļi tika izgatavoti, izmantojot sagatavotu biomasas masu ar noteiktu izmēru un mitrumu. Formēšana ietvēra digitālā spiediena mērītāja iestatīšanu, temperatūras kontroli, metāla rāmja izvietošanu ar teflona audumu, biomasas formēšanu un presēšanu. Pēc tam spiediens tika atlaists, un dēļi tika žāvēti.

Daļiņu izmērs būtiski ietekmē skaidu plātņu stiprību. Testos mežizstrādes atlikumu daļiņu izmērs tika iedalīts trīs daļās: < 2,8 mm, 2,8–8 mm un 8,0–10,0 mm. Karstajā presēšanā izmantoja 600 bāru 140 °C un 160 °C temperatūrā. Tika mērīts plātņu blīvums un elastības modulis.

Blīvuma noteikšana notika saskaņā ar Eiropas standartu *EN 323:1996*. Ar suporti un svāri tika noteikti izmēri un masa. Elastības moduli un lieces izturība tika mērīta, izmantojot standartu *EN 310:1993*. Elastības modulis tika aprēķināts pēc slodzes un deformācijas līknes lineārās zonas. Liekuma izturība tika aprēķināta no maksimālās lieces slodzes līdz mehāniskai sabrukšanai. Stiprības testi tika veikti pēc tādiem posmiem kā zāģēšanas līniju iezīmēšana, lokšņu griešana, atbalsta punktu izvietošana un slodzes pielikšana.



1.3. att. Testēšanas stands.

Dati tika analizēti, izmantojot divu faktoru dispersijas analīzi (*ANOVA*) ar atkārtojumiem, lai izpētītu divu neatkarīgo mainīgo ietekmi uz novērotajiem rezultātiem. Daļiņu lielums, temperatūra un spiediens tika mainīti kā neatkarīgie mainīgie, lai novērtētu gan to individuālo ietekmi, gan iespējamo mijiedarbību. Lai izmantotu divu faktoru *ANOVA*, vienlaikus tika salīdzināti tikai divi neatkarīgie mainīgie. Šī īpašā analīze tika veikta 102 paraugiem, no kuriem katrs pārstāvēja konkrētu spiediena, daļiņu lieluma un temperatūras pāri. Lai uzlabotu secinājumu noturību, tika iekļauti trīs katra parauga atkārtojumi. Mērījumi tika veikti saskaņā ar iepriekš aprakstīto metodiku. Datu sagatavošana ietvēra savāktu datu strukturēšanu slejās katrai faktoru līmeņu kombinācijai, rindās norādot atkārtojumus. Šāda datu organizācija atviegloja efektīvu neatkarīgo mainīgo ietekmes novērtēšanu. Lai veiktu divu faktoru *ANOVA*, tika izmantots *Microsoft Excel* rīks "Datu analīze".

ANOVA ļāva vienlaikus pārbaudīt trīs hipotēzes: H_1 – nav būtisku atšķirību starp 1. mainīgā rezultātiem; H_2 – nav būtisku atšķirību starp 2. mainīgā rezultātiem; H_3 – nav būtisku mijiedarbību starp abiem faktoriem.

Kā *Post Hoc* tests pāru salīdzināšanai tika izvēlēts T tests, lai salīdzinātu neapstiprināto nulles hipotēzi. Katru sastāvu un parametrus atkārtoja vismaz trīs reizes, un tika iegūti dēļi, kas tika sazāģēti trīs vienādās daļās MoE testēšanai un blīvuma aprēķiniem, tādējādi iegūstot vismaz sešus atkārtojumus. Aprēķinātās standartnovirzes attēlotas grafikos, analīzē tika izmantota P ticamības vērtība 5 %.

1.2. Daudzkritēriju lēmumu pieņemšana

Šajā darbā vairākkārt tika izmantota daudzkritēriju lēmumu analīze (*MCDA*) dažādos gadījumos, un visas *MCDA* tika veiktas, kombinējot preferenču secības pēc līdzības ideālajam risinājumam metodi (*TOPSIS*) un analītiskās hierarhijas procesu (*AHP*). Šo divu metožu kombinācija palīdz novērtēt, cik tuvu ideālajam risinājumam ir visas alternatīvas, jo *TOPSIS* metode ne tikai noskaidro labāko alternatīvu, bet arī norāda tuvuma koeficientu ideālajam risinājumam. Tādējādi, izmantojot *TOPSIS*, var iegūt detalizētāku priekšstatu par to, cik ideālas ir visas alternatīvas. Lai noteiktu *TOPSIS* svaru, tika izmantota *AHP*. *AHP* ir viena no visplašāk izmantotajām daudzkritēriju analīzes metodēm, jo tā ļauj viegli salīdzināt kritērijus. Šajā darbā kritēriju salīdzināšanai tika izmantota *Saaty* skala, kurā vārdiski tika apzīmētas deviņas nozīmīguma pakāpes, norādot viena kritērija nozīmīgumu, salīdzinot ar citu. Deviņu vērtējumu skala sākas ar 1, kas apzīmē vienādu nozīmīgumu, un beidzas ar 9, kas apzīmē ārkārtēju nozīmīgumu.

Sākotnējie kritēriji visiem šajā darbā veiktajiem *MCDM* tika noteikti atklātās intervijās ar farmācijas un smalkās ķīmijas un loģistikas jomā strādājošo uzņēmumu pārstāvjiem, ļaujot pārstāvjiem atbildēt uz atklātiem jautājumiem.

1.3. Analītiskais hierarhijas process

Lai noteiktu izvēlēto kritēriju nozīmīgumu, tika veikta pāru salīdzināšana. Ņemot vērā to, ka cilvēkiem nav iespējams aptvert 12 kritēriju savstarpējās attiecības vienlaikus, tika izvēlēta pāru analīzes metode. Izmantojot šo metodi, ekspertiem tika lūgts salīdzināt tikai divus kritērijus vienlaikus, katrs eksperts veica kopumā 66 termiskā iepakojuma salīdzinājumus. Salīdzināšana tika veikta mutiski, kā ierosināts *Saaty et al. 2010*, nosakot, vai viens kritērijs ir tikpat svarīgs kā otrs, mazāk svarīgs vai svarīgāks. Pēc mutiskā salīdzinājuma katram salīdzinātajam pārim tika piešķirtas skaitliskās vērtības, izmantojot skalu. Izvēlētajā skalā 9 nozīmēja ļoti lielu nozīmi, 6 – lielu līdz ļoti lielu nozīmi, 3 – vidēju nozīmi un 1 – vienādu nozīmi. Vērtējumi tika atzīmēti digitālā aptaujas veidlapā.

Kopumā tika izplatītas 10 aptaujas anketas apzinātajiem farmācijas un smalkās ķīmijas rūpniecības uzņēmumiem Latvijā, tostarp tādiem lieliem uzņēmumiem kā “*Grindex*” un “*Olainfarm*”. Bija sagaidāms, ka uzrunātos uzņēmumus globālā pandēmija ietekmēs ļoti smagi, uz jautājumiem atbildēja tikai pieci uzņēmumi, bet trīs bija tiesīgi atbildēt, jo uzņēmumi paši pieņēma lēmumus par temperatūras jutīgu produktu loģistiku. Divi uzņēmumi izmantoja ārpalpojuma, tāpēc nebija piemēroti daudzkritēriju analīzei un kritēriju salīdzinājumam, tomēr prakse, par kuru tie ziņoja, tiks aplūkota šā pētījuma rezultātu daļā. Izvēlētie uzņēmumi anketas aizpildīšanu uzticēja uzņēmuma loģistikas komandas ekspertiem. Kritēriji no viena *MCDM*, kurā pētītas tirgus iespējas dabīgajam termiskajam iepakojumam no mežizstrādes atlikumiem, ir parādīti kritēriji, kas iekļauti digitālajā aptaujā salīdzināšanai, apkopoti 1.2. tabulā.

1.2. tabula

Termiski iepakojuma kritēriji, kas izmantoti pāru salīdzināšanai

Kritēriji	Apraksts
Smarža	Materiālam nav ievērojama aromāta
Izturība pret mitrumu	Materiāls neizšķīst un netiek bojāts līdz tādām līmenim, ka zaudē savu termisko pretestību.
Tvaika pretestība, [m]	Šā siltumizolācijas materiāla vērtība. Izsaka ūdens tvaiku pretestību, ņemot noteiktu gaisa slāņa biezumu [m]. Galvenokārt attiecas uz pārvadājumiem ar sauso ledu.
Zimolvedības iespējas	Materiālu var ap-drukāt
Ilgspēja	Termiskā iepakojuma izejviela ir atjaunojamais materiāls
Spēja noturēt temperatūru, [stundas]	Iepakojums var saglabāt noteiktu temperatūru ilgāk nekā 24 stundas. Kritērijs atspoguļo temperatūras mērījumus <i>in situ</i> attiecīgajā vidē un iesaiņotajās testa precēs, kas atbilst transportējamām precēm.

1.2. tabulas turpinājums

Siltumvadītspēja, [W/m·K]	Saskaņā ar šo pētījumu 0,04 W/m·K tika uzskatīts par sliksni, kad siltumvadītspēja uzskatāma par zemu. Siltumvadītspēja raksturo materiālu pēc tā spējas vadīt siltumenerģiju. Siltumenerģija vienmēr tiek pārnesta pa gradientu.
Atkārtoti izmantojamība	Materiālu var izmantot atkārtoti vairākas reizes
Pieejami vairāki izmēri	Ir pieejamas vairākas dimensiju opcijas
Cena, [eiro par 39l kasti]	Par iepakojuma risinājumu
Izturība	Materiālu var izmantot bez atbalsta terciārā iepakojuma (piemēram, kartona kastes).
Blīvums, [kg/m] ³	Iepakojuma šķīduma masas un tilpuma attiecība

Matemātiski visi izvēlētie kritēriji tika attēloti matricā, un, atrisinot matricu, tika atrastas tās pašvērtības. Šīs vērtības, sauktas arī par īpašajiem vektoriem, atspoguļo katra kritērija nozīmi – lielāka vērtība nozīmē lielāku nozīmi galīgajā lēmumā. Orientējošās pašvērtības tika aprēķinātas programmā *Microsoft Excel* un izmantotas turpmākai analīzei. Tika izmantots konsekvences sliksnis 0,2, kā tas jau tika darīts citos pētījumos, kad tika aptaujātas vairākas ieinteresētās personas.

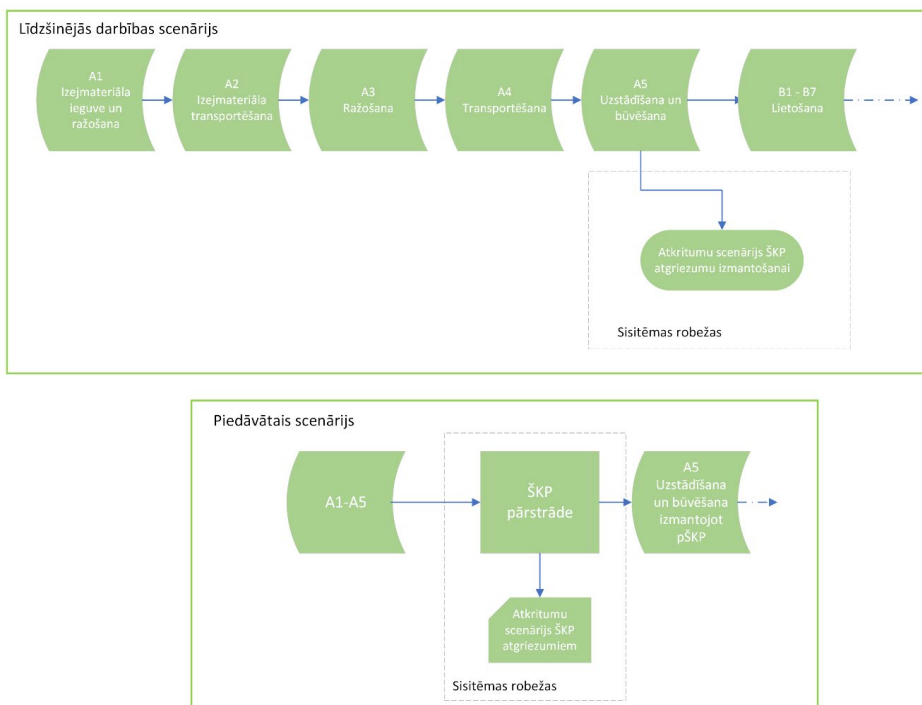
1.4. Dzīves cikla novērtēšanas metodoloģija

Dzīves cikla novērtējums (*LCA*) kvantitatīvi nosaka un salīdzina produkta vai procesa ietekmi, ko parasti izmanto šādos pētījumos. Katrs produkts iziet dzīves ciklu: projektēšana, resursu ieguve, ražošana, patēriņš un iznīcināšana. Lai novērtētu ietekmi uz vidi, *LCA* apkopo resursu izmantošanu, emisijas un apmaiņu.

Saskaņā ar *ISO 14044* standartu *LCA* ir četri posmi: mērķis, inventarizācija, ietekmes novērtējums un interpretācija. Šajā pētījumā tiek salīdzināti atkritumu apstrādes scenāriji. Parastā scenārija atkritumu apsaimniekošanas scenārijs atbilst esošajai vides deklarācijai (*EPD*) par šķērslīmeņu koksnes (*CLT*) paneļiem. Jaunais scenārijs ietver atgriezumam atkārtotu pārstrādi uz vietas, izveidojot jaunus *CLT* gabalus. Pētījuma darbības joma aptver darbības, kas saistītas ar atgriezumam izmantošanu, neatkarīgi no atkritumu apsaimniekošanas objekta atrašanās vietas.

Atribūcijas modelis normalizē *EPD* izejas datus scenārijos, izmantojot konkrētas darbības, materiālu un enerģijas plūsmas. Rezultāti ir atkarīgi no konkrētās vietas, ņemot vērā atšķirīgos projekta raksturlielumus. Bāzes scenārijs paredz enerģijas reģenerāciju ar koksnes paneļu tirgus ziņojuma ietekmi. Ierosinātais scenārijs paredz atgriezumam pārstrādāt lietderīgās *CLT* vienībās, daļu atstājot apglabāšanai, tāpat kā bāzes scenārijā. *LCA* izmantoja *Simapro 9.0* ar *Ecoinvent 3.6*. Funkcionālā vienība (*FV*) mēra veiktspēju, sniedzot atsauci *LCA* rezultātu līdzvērtībai. Šeit *FU* ir 1 m³ *CLT*, kas izmantots būvniecībā. Pārstrādāts *CLT* mehāniski atbilst

neapstrādātām galvenajām paneļu konstrukcijām. Vides produkta deklarācijas robežas un pētījuma robežas jāva izveidot 1.4. attēlā redzamo shēmu.



1.4. att. Sistēmas robežas parastajam un ierosinātajam scenārijam.

Bāzes scenārijā sistēmas robežas ietver būvlaukumā radušos atgrieztu atkritumu apstrādi uz vietas. Transportēšana uz atkritumu apstrādes iekārtām nav ņemta vērā, ņemot vērā attāluma nenoteiktību, ko rada atšķirīgais būvlaukumu ģeogrāfiskais izvietojums. Diagrammā parādīti posmi A1–B7, kas kontekstualizē sistēmu, pētījuma darbības jomā ir tikai posmi, kas atrodas pārtrauktajai līnijai. Papildu fāzes sniedz pārskatu par *CLT* dzīves ciklu. Ierosinātajā scenārijā atkārtota pārstrāde notiek uz vietas, tāpēc nav nepieciešams ārējs transports. Pārstrādei nederīgos atgriezumus apstrādā tāpat kā bāzes scenārijā. Transportēšana uz atkritumu apstrādes iekārtām atkal nav iekļauta, jo nav zināms attālums.

Abiem scenārijiem ir kopīgi ierobežojumi, pirmkārt, transporta darbību izslēgšana ģeogrāfiskās nenoteiktības dēļ gan attiecībā uz atkritumu apstrādes iekārtām, gan būvlaukiem. Tomēr ir būtiski atzīt, ka atkritumu transportēšana rada slogu videi, ko rada transportlīdzekļu emisijas un degvielas sadegšana. Transportēto atkritumu samazināšana varētu dot ieguvumus videi, bet šis jautājums pārsniedz promocijas darba pētījuma tvērumu.

Vēl viens būtisks pieņēmums ir tas, ka atkārtota pārstrāde ir saskaņota ar dzīvojamo māju būvniecību tajā pašā vietā. Šāda izvēle samazina iespējamo transporta radīto slogu videi. Šis

apsvērumi ir ļoti svarīgi, jo dažādos gadījumos pēc būvniecības sagrieztie kokmateriāli var būt jāpārved otrreizējai pārstrādei citur, un šāds papildu transports var radīt ietekmi uz vidi.

Attiecībā uz bāzes scenāriju rezultāti, kas iegūti no enerģijas reģenerācijas aprites cikla beigās (EoL), tika ņemti tieši 1 m³ un normēti atbilstoši konkrētajā būvlaukumā radīto atkritumu daudzumam. Saskaņā ar iegūtajiem priekšplāna datiem uz katru izmantoto *CLT* kubikmetru 0,128 m³ nonāk kā atkritumu atgriezumam. Ieguvumi no 1 m³ enerģijas reģenerācijas tiek lēsti 612 MJ elektroenerģijas un 4208 MJ siltumenerģijas centralizētai siltumapgādei. Ar tiem saistītā ietekme uz vidi attiecībā uz veselu kubikmetru apglabātā materiāla redzama 1.3. tabulā. Tomēr vērtības modeli ir normalizētas atbilstoši faktiskajam atgriezumam daudzumam, kas katrā scenārijā nosūtīts atkritumos.

1.3. tabula

Ietekmes novērtējums attiecībā uz 1 m³ izlietoto *CLT*

Ietekmes kategorija	Vienība	Kopā uz m ³
Paskābināšanās potenciāls	kg SO ₂ eq	-0,1786
Eitrofikācijas potenciāls	kg PO ₄ eq	-0,04186
Globālās sasilšanas potenciāls	kg CO ₂ ekv.	-32,51
Troposfēras fotoķīmisko oksidantu veidošanās potenciāls	kg CH ₂ eq	-0,01664
Nefosilo resursu abiotiskais izsmelšanas potenciāls	kg Sb ekv.	-0,000112
Fosilo resursu abiotiskais izsīkšanas potenciāls	MJ	-0,04217
Stratosfēras ozona slāņa noārdīšanās potenciāls	kg CFC-11 ekv.	0,000004012

Ierosinātajam scenārijam, kurā atkārtotas pārstrādes darbības ļauj atgūt daļu atgriezumam, izgatavojot jaunas *CLT* vienības, inventarizācija tiek veikta, lai apkopotu ietekmi, kas rodas trīs posmos.

1. Pavisam jaunu *CLT* vienību ražošana.
2. Materiāli un enerģija, kas nepieciešama pašai atkārtotas pārstrādes darbībai.
3. Neizmantojamo atgriezumam atkritumu apstrāde.

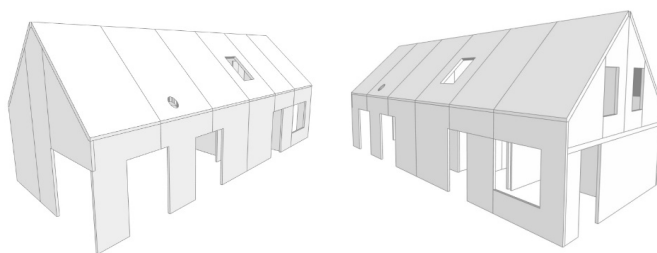
Veidojot jaunas *CLT* vienības no atgriezumam, būvlaukumā potenciāli tiek aizstātas pilnīgi jaunas *CLT* vienības, tāpēc šādu jaunu pārstrādātu *CLT* vienību ietekme tiek uzskatīta par novērstu produktu, tāpēc A1–A3 posma (1. att.) ietekmes uz vidi rezultāti tiek normalizēti un attiecīgi matemātiski apstrādāti, izmantojot šo pieeju. A1–A3 posma ietekme uz 1 m³ redzama 1.4. tabulā.

Ietekmes novērtējums, ražojot 1 m³ CLT (A1–A3 posms)

Ietekmes kategorija	Vienība	Kopā
Paskābināšanās potenciāls	kg SO ₂ ekv.	0,6272
Eitrofikācijas potenciāls	kg PO ₄ eq	0,1116
Globālās sasilšanas potenciāls	kg CO ₂ ekv.	-0,05673
Troposfēras fotoķīmisko oksidantu veidošanās potenciāls	kg CH ₂₄ ekv.	0,1144
Nefosilo resursu abiotiskais izsmelšanas potenciāls	kg Sb ekv.	0,0002468
Fosilo resursu abiotiskais izsīkšanas potenciāls	MJ	1497
Stratosfēras ozona slāņa noārdīšanās potenciāls	kg CFC-11 ekv.	0,0000125

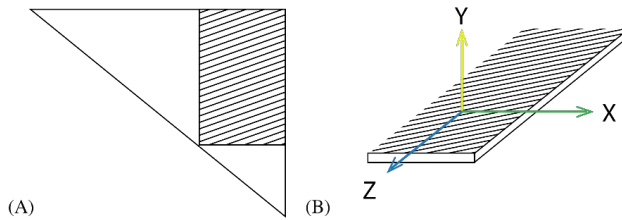
Materiālu un enerģijas krājumi, kas nepieciešami, lai atkārtoti pārstrādātu 0,128 m³ atlikušo atgriezumu (vērtība uz FU), ir normalizēti šādi: 0,0904 kg līmes (poliuretāna līmes) un 0,466 kWh elektroenerģijas, kas ņemta no valsts tīkla. Saskaņā ar iegūtajiem pirmapstrādes datiem 69,72 % no pārstrādātajiem atgriezumiem ir veiksmīgi pārstrādāti jaunos CLT moduļos, savukārt atlikušie 30,28 % nav piemēroti atkārtotai pārstrādei un ir jāatstāj apstrādei kā atkritumi. Ar šādu apstrādi saistītā ietekme ir ņemta no 2.3. tabulas datiem un normalizēta atbilstoši atbilstošajai vērtībai šajā scenārijā.

Lai ilustrētu pārstrādei pieejamo CLT daudzumu, tika izvēlēts individuālās mājas projekts (1.5. att.). Nesošā konstrukcija ir pilnībā veidota no CLT. Durvis un logi ir izgriezti, radot ievērojamu daudzumu griešanas atkritumu.



1.5. att. Individuālās mājas CLT nesošās konstrukcijas 3D attēlojums.

Jaunu galveno paneļu ražošanai visi spraudņi nebija piemēroti. Svarīgs kritērijs, lai atgriezumus izmantotu atkārtoti, bija to plakanā virsma. Sarežģītās ģeometriskās formas tika atlasītas, atstājot tās, kuru atkārtoti izmantojamās virsmas laukums bija lielāks par 1 m² ar izmēriem gar X asi (2.6. att.), kas nebija mazāki par 800 mm.



1.6. att. (A) Atkārtoti izmantojamā griešanas zona, kas attēlota ar svītrainu rakstu. Atkārtoti izmantojamās zonas platums – 810 mm, garums – 1056 mm; (B) shematisks attēlojums.

1.5. Delfi metode

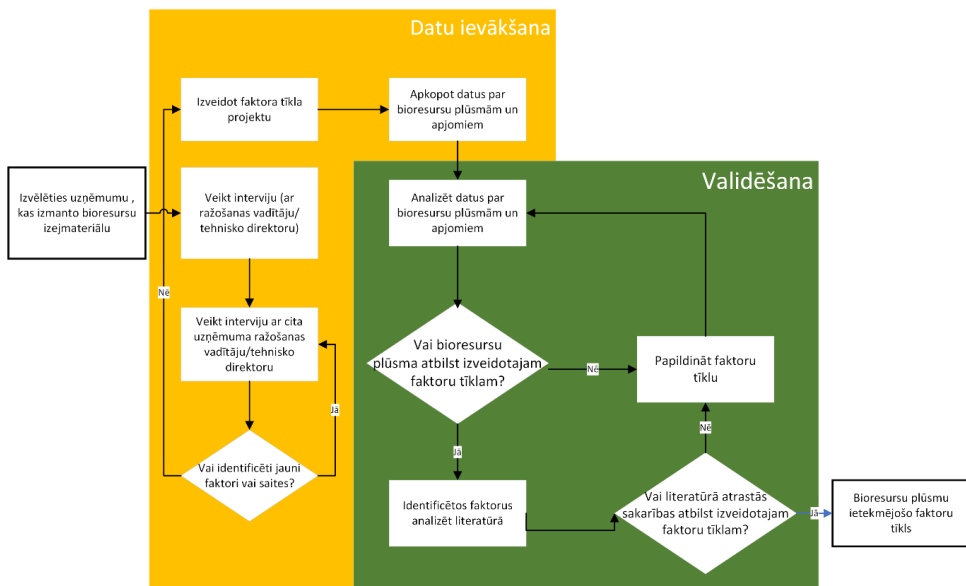
Lai gan izejviela ir labi definēta, ceļu bioekonomikas attīstības veicināšanai joprojām aizēno neidentificēti savstarpēji saistīti faktori. Šīs jomas attīstība aptver dažādas apakšnozares, tostarp lauksaimniecību un mežsaimniecību, kas bieži vien saduras – pārtika pret šķiedru pret enerģiju. Izmantojot Muižnieces un citu autoru darbu, tika veikts 24 faktoru novērtējums un kartēšana, izmantojot Delfi metodoloģiju, lai atklātu cēloņsakarības cilpas. Šajā metodē divās kārtās tika iesaistīti akadēmiskie un nozares eksperti. Tematiskā analīze sakārtoja faktorus saskanīgos modeļos, vadoties pēc ietvara izvēles teorijā balstītai analīzei un kopsakarību veidošanai. Delfu metodes stiprās puses ir Latvijai specifiskas atziņas pretstatā ekspertu neobjektivitātei, kas tika mazināta, izvēloties ekspertus ar atšķirīgu akadēmisko izglītību. Attiecībā uz nozares ekspertiem intervijas aizstāja aptaujas anketas, lai novērstu iespējamās neatbilstības faktoru izpratnē.

1.6. Intervijas

Lai novērtētu cēloņsakarību ķēdi, kas saistīta ar bioresursiem, kā arī izpētītu citu faktoru iespējamo ietekmi uz ierosinātajiem rādītājiem un saiknēm akadēmiskajā ekspertu aptaujā, tika veiktas kvalitatīvas intervijas ar iesaistīto uzņēmumu vadītājiem. Intervijas formāts bija daļēji strukturēta intervija, jo šāda veida intervija ļauj intervētājam uzdot atklātus jautājumus un dod iespēju iedziļināties dažādos atklāto faktu aspektos. Daļēji strukturētas intervijas jau ir izmantotas bioekonomikas pētījumos. Interviju laikā tika noskaidrota vispārējā attieksme un motivācija attiecībā uz bioresursu, blakusproduktu un atkritumu izmantošanu. Blakusproduktu izmantošanas efektivitāte tika noteikta, iegūstot datus no uzņēmumiem, tostarp par reālo izejvielu patēriņu, kā arī par saražotajiem bioatkritumiem un blakusproduktiem. Tika intervēti trīs uzņēmumu tehniskie direktori, kuri kā izejvielu izmanto vienu un to pašu bioresursu. Sakarā ar intervēto personu sniegto sensitīvo informāciju intervijas netika ierakstītas, tā vietā intervētājs sagatavoja izsmeļošas piezīmes par iegūto informāciju.

1.7. Algoritmiskā loģika *Nexus* veidošanai

Bioresursu saikne tika izveidota, analizējot intervijās iegūto informāciju, un apstiprināta ar literatūras analīzi un blakusproduktu datiem no attiecīgajiem uzņēmumiem. Intervijās tika iegūti kvalitatīvi un kvantitatīvi dati. Kopējais bioresursu kopsakarību veidošanas algoritms redzams 1.7. attēlā. Saskaņā ar algoritmu tika veiktas divas intervijas, pēc tam, kad otrajā intervijā tika noskaidroti jauni faktori, tika veikta trešā intervija. Izveidotais algoritms pieprasa turpināt intervijas, līdz nav jaunu faktoru. Konkrētajā gadījumā ar trīs intervijām bija pietiekami, un rezultāti tika publicēti. Papildu intervijas pēc tam apstiprināja, ka jaunu faktoru nav. Otrais un trešais posms ir minimālais interviju skaits, kas nepieciešams, lai gūtu vispārēju priekšstatu par faktoriem, kas ietekmē konkrēto tematu. Otrās intervijas laikā tika identificēti daži jauni faktori, tāpēc tika veikta trešā intervija, lai noskaidrotu, vai tiks identificēti vēl citi faktori. Ja jaunu faktoru nav, algoritms tiek turpināts. Pētījums tika sadalīts mazākos moduļos, lai nodrošinātu strukturētu pieeju. Izvēloties uzņēmumus šim pētījumam, tika ņemti vērā dažādi ražošanas uzņēmumi, kas kā izejvielu izmanto viena veida biomasu. Svarīgs faktors uzņēmumu izvēlē bija to vēlme piedalīties.



1.7. att. Algoritms bioresursu saišu veidošanai.

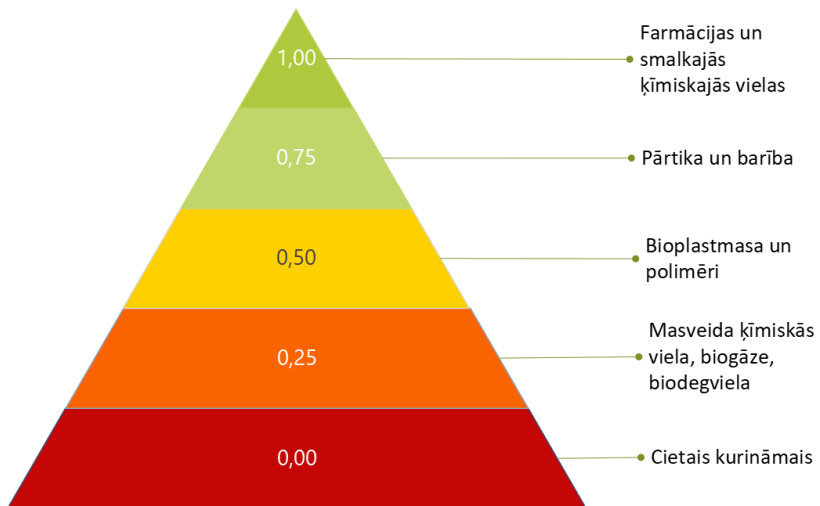
Metodoloģiju, kas redzama 1.7. attēlā, var izmantot dažādu saišu novērtēšanai un veidošanai, izmantojot augšupēju pieeju. Šajā pētījumā augšupejošā pieeja ļauj analizēt faktorus, kas ietekmē organisko blakusproduktu plūsmu atpakaļ bioekonomikā, izmantojot bioresursus. *Nexus* sniedz informāciju par faktoriem, kas ietekmē sistēmu, bet papildu blakusproduktu datu analīze sniedza informāciju par šī blakusprodukta – bioresursu – plūsmas efektivitāti.

1.8. Bioresursu izmantošanas indekss

Bioekonomikas attīstību ietekmējošo faktoru cēloņsakarību ķēde tika papildināta ar detalizētāku bioresursu izmantošanas cēloņsakarību ķēdi. Saskaņā ar teorijā balstītu analīzi ir sagaidāma ietekmes nevienādība. Tas nozīmē, ka visas darbības uz vieniem un tiem pašiem objektiem cēloņsakarību ķēdēs neradīs vienādus rezultātus. Lai novērtētu ietekmi uz bioekonomiku iekšēji pieņemtajiem lēmumiem par bioresursu plūsmu uzņēmumā, tika izstrādāts bioresursu izmantošanas indekss.

Aprēķini tika veikti, izmantojot biomasas sausnas svaru. Ja nebija pieejami dati par blakusprodukta faktisko sausnas svaru, aplēses tika veiktas, izmantojot literatūrā atrodamās vērtības. Galvenās analizētās kategorijas bija ražošanas atlikumi, bojātas izejvielas, ražošanas standartiem neatbilstošas izejvielas, tirgus standartiem neatbilstoši produkti, citi ražošanas atlikumi, izšķīduši un neizšķīduši oglehidrāti. Uzņēmumu vadītāji nepiekrita sīkākas informācijas atklāšanai, tāpēc šajā darbā nevarēja aprakstīt izejvielas, produktus vai ražošanas tehnoloģiju.

Bioresursu plūsma uzņēmumā tika novērtēta, salīdzinot ar atkritumu apsaimniekošanas hierarhiju un 1.8. attēlā redzamo bioizstrādājumu vērtības piramīdu, kur izvēlētie koeficienti nozīmē: 0 – bioizstrādājumiem nav vērtības; 1 – bioizstrādājumiem ir vislielākā iespējamā pievienotā vērtība. Bioloģiskā vērtība tiek piešķirta izejvielai vai blakusproduktam, ja to izmanto attiecīgajam lietojumam bioloģiskās izcelsmes piramīdā.



1.8. att. Bioloģiski ražotu produktu vērtību piramīda. Piecas bioresursu izmantošanas iespējas pa kategorijām un katrai bioresursu grupai piešķirtie koeficienti. BBV – bioresursu vērtība un atbilstošais koeficients: 1 – vislielākā vērtība; 0 – bioekonomikas viedokļa vērtības nav.

Katram bioizstrādājumu vērtības piramīdas līmenim (1.8. att.) tika piešķirts atbilstošs koeficients, kas atspoguļo bioresursu izmantošanas vērtību – farmācijai un smalkajām ķīmiskajām vielām tika piešķirts koeficients 1, pārtikai un barībai – 0,75, bioplastmasai un polimēriem – 0,5, beramajām ķīmiskajām vielām un biogāzei – 0,25, enerģijai, siltumenerģijai un kurināmajam – 0. Bioresursu izmantošanas indekss sniedz ieskatu ražošanas efektivitātē neatkarīgi no produkta veida, tāpēc produktam netiek piešķirta vērtība. Aprēķini tika veikti, izmantojot dažādas radīto blakusproduktu lietošanas iespējas un piešķirot atbilstošus koeficientus no iepriekš aprakstītās bioizstrādājumu vērtības piramīdas.

$$B_{u_{ind.}} = (P + BP_1 \times c_1 + BP_2 \times c_2 + BP_3 \times c_3 + BP_4 \times c_4 + BP_5 \times c_5) / RM \quad (1)$$

$B_{u_{ind.}}$ – bioresursu izmantošanas indekss;

P – produkts [kg sausnas];

BP_n – blakusprodukts [kg sausnas];

c_n – koeficients, kas piešķirts atbilstoši bioloģiskās vērtības piramīdas kategorijai;

RM – izmantotās izejvielas [kg sausnas].

1.9. Oglekļa uzskaitē koksnē izstrādājumu ražošanā

Lai aprēķinātu materiālā iespējami uzkrāto CO₂ daudzumu, tika pārskatīti un izmantoti astoņi dažādi standarti biogēnā oglekļa uzskaitē produktos. Daudzi no oglekļa aprēķina standartiem veidoti uz LCA bāzes pamata. Tomēr šajā gadījumā tika izmantoti tikai tie standarti, kas attiecas uz meža būvmateriāliem un biogēno oglekli. Izmantotos standartus var iedalīt grupās, kas attiecas tikai uz būvmateriāliem (ISO-21930, EN-15804, CEN/TR-16970, EN-16485), un standartos, kas aptver visus produktus (PAS-2050, ISO/TS-14067, PEF). Standartus var atšķirt arī pēc ģeogrāfiskā pārklājuma, jo daži ir starptautiski standarti (ISO-21930, PAS-2050, ISO/TS-14067), savukārt citi attiecas tikai uz Eiropu (EN-15804, CEN/TR-16970, EN-16485, PEF) un ir ciešāk saistīti ar valsts regulējumu. Patlaban nav zinātniskas vienprātības par to, kāds standarts un metode ir vispiemērotākā izmantošanai, tāpēc tika ierosināta vidējā vērtība, kas iegūta no visiem standartiem.

Sākotnējais aprēķins izejmateriālā uzkrātajam CO₂ tiek pieņemts, ka visiem standartiem tas ir vienāds, un to aprēķina šādi:

$$msqCO_2 = m_{\text{sausā}}(\text{koksne}) \times C_f \times \frac{m_{CO_2}}{m_C}, \quad (2)$$

kur

$msqCO_2$ – sekvestrētā CO₂ masa, kgCO₂;

$m_{\text{sausā}}(\text{koksne})$ – sausās koksnē svars gatavajā izstrādājumā, kg;

C_f – oglekļa procentuālā daļa sausnā (kokmateriāliem = 0,5);

m_{CO_2} – CO₂ molekulmasa = 44 g/mol;

m_C – oglekļa molekulmasa = 12 g/mol.

Ievietojot oglekļa un CO₂ masas, 2. vienādojums kļūst šāds:

$$msqCO_2 = m_{sausa}(koksne) \times 0,5 \times \frac{44}{12}, \quad (3)$$

kur $msqCO_2$ ir gatavajā izstrādājumā sekvestrētā CO_2 masa un m_{sausa} (koksne) ir sauso kokmateriālu svars gatavajā izstrādājumā.

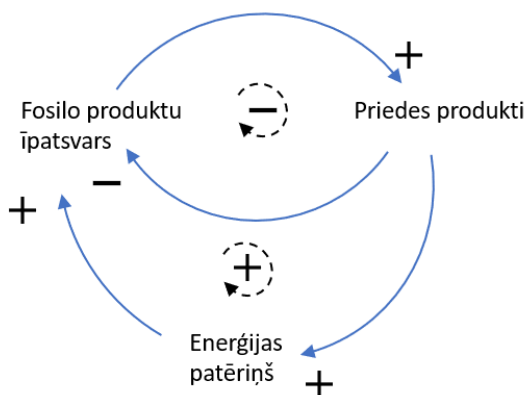
1.10. Sistēmas dinamikas modelēšana

Svarīgs bioekonomikas ieguvums ir tas, ka oglekļa emisijas ir neitrālas vai pat negatīvas. Apsverot bioekonomikas attīstību, tas ir jāiekļauj novērtējumā. Tāpēc, apsverot bioekonomikas attīstību mežsaimniecībā, faktori jānovērtē ilgākā laika posmā. Sistēmu dinamikas modelēšanā kā pamatu, lai aprakstītu dažādu sistēmu stāvokli un notikumus, izmanto krājumus un plūsmas. Šajā darbā sistēmu dinamikas modelēšana tika izmantota, lai ilustrētu oglekļa plūsmu koksnes vērtību ķēdē.

Sistēmas dinamikā krājumu apjoma noteikšanai izmanto integrālo aprēķinu, un šajā darbā galvenais krājums ir ogleklis (C). Tas neparāda tiešo ietekmi uz globālo sasilšanu, jo ogleklim ir vairākas formas, piemēram, CO, CO_2 , CH_4 , un katra no tām globālo sasilšanu ietekmē atšķirīgi. Sistēmas dinamikas pieeja prasa definēt dinamisko hipotēzi, šajā gadījumā dinamiskā hipotēze tika definēta šādi: pilnīga mežizstrādes un ražošanas atlikumu izmantošana skujkoku vērtību ķēdē var radīt oglekļa izmešu aizkavēšanas atmosfērā.

Dinamiskā hipotēze ir teorija par to, kāda struktūra, kas vada sistēmu, pastāv. Dinamiskas hipotēzi var izteikt vārdiski kā cēloņsakarību cilpas diagrammu vai kā krājumu un plūsmas diagrammu.

Šī pētījumā tika definēta oglekļa plūsmas cēloņsakarības cilpa dabā. Tālāk dinamiskā hipotēze tika papildināta ar Bernes oglekļa piesaistes modeli, kurā iesaistīta cilvēka darbība (1.9. att.).



1.9. att. Oglekļa cēloņsakarības cilpas skujkoku vērtību ķēdē.

Definētā dinamiskā hipotēze balstās vispārpieņemtajā pieņēmumā, ka koksnes produkti ir oglekļa neitrāli, jo tie līdzsvaro oglekļa daudzumu atmosfērā, piesaistot to koka augšanas

fāzē. Tomēr hipotēze apgalvo, ka visā koksnes vērtību ķēdē ir netīša fosilo resursu patēriņa palielināšanās ietekme. Ražojot vairāk izstrādājumu, tiek patērēts vairāk fosilo resursu – fosilās līmvielas, piedevas, degviela un fosilā enerģija, ko izmanto ražošanas procesā.

Modelis tika izveidots saskaņā ar identificētajām cēloņsakarību cilpām un paplašināts, pamatojoties uz tirgus un zinātniskās literatūras analīzi. Krājumi atspoguļo oglekli, tāpēc modeļi ir veikti vairāki aprēķini, lai CO₂ emisijas, produktu blīvumu, biomasas blīvumu utt. pārvērstu oglekļa tonnās. Tika pieņemts, ka koksnes blīvums ir 420 kg/m³.

Tika ņemts vērā tikai valsts tirgus, neņemot vērā importu un eksportu, lai gan tirdzniecības ar ārējiem tirgiem iekļaušana parādītu vērtīgu papildu dinamiku.

Lai novērtētu izpētīto scenāriju ietekmi, simulācijas sākuma punktā atmosfēras ogleklis tika noteikts kā 0. Atmosfēras oglekļa krājumam tika pievienotas trīs ieplūdes un viena izplūde. Modelis tika sadalīts trīs nozarēs – mežs, produktu ražošana un atmosfēra. Meža sektors tika sadalīts koku krājumos, piešķirot biomasas krājumus katrai vecuma desmitgadei, sākot no 0 līdz 10 gadiem un beidzot ar 151–160 gadiem, un visbeidzot – kokiem, kas vecāki par 160 gadiem. To noteica vairāki iemesli, pirmkārt, oglekļa asimilācijas dinamika, otrkārt, pieejamo statistikas datu atbilstība, lai izmantotu biomasu kā modeļa validācijas līdzekli. Lai ilustrētu sistēmas dinamikas pieeju oglekļa uzskaitē un plānošanai, tika izmantoti tikai dati par priedēm, ko apsaimnieko valsts meži.

Modelis tika papildināts ar datiem no vairākiem avotiem – Latvijas Centrālās statistikas pārvaldes, Apvienoto Nāciju Organizācijas Pārtikas un lauksaimniecības organizācijas Statistikas nodaļas datiem un empīriskiem datiem no recenzētas literatūras.

2. REZULTĀTI

2.1. Koka skaidu plātnes no skujkoku mežizstrādes atlikumiem un saistvielām uz bioloģiskās bāzes

Veicot rūpīgu literatūras apskatu, tika noskaidrotas vairākas daudzsološas bioloģiskas bāzes līmes, no kurām vairākas varētu iegūt no dažādiem bioloģiskās ražošanas atlikumiem. Līmes un to bioloģiskie avoti apkopoti 2.1. tabulā.

2.1. tabula

Bioloģiskas izcelsmes līmes un to izmantošanas veidi no zinātniskās literatūras

Bioloģiskais avots	Saliktais	Polimēru veidošanās reakcija	Primārās izejvielas*	Izmanto
<i>Penicillium oxalicum</i>	Bezūdens citronskābe	Polikondensācija	Jā	Koksnes kompozīti
Garneles un citi vēžveidīgie	Hitozāns (ogļhidrāts)	Polikondensācija	Nē	Medicīna, koksnes kompozīti
<i>Vibrio parahaemolyticus</i>	Eksopolisaharīdi	Poliadikcija	Nē	Pētniecība, zema tehnoloģiju gatavība
Ziedoši augi	Latekss (izopropēns)	Polimerizācija	Jā	Koksnes kompozīti

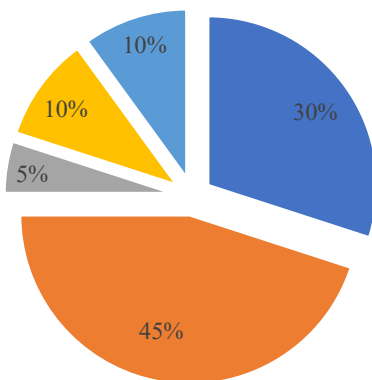
2.1. tabulas turpinājums

Bioloģiskais avots	Saliktais	Polimēru veidošanās reakcija	Primārās izejvielas*	Izmanto
Koks	Lignīns (aromātiskais polimērs)	Polikondensācija	Nē	Koksnes kompozīti, putas
Eļļas augi	Polioli	Poliadikcija	Jā	Koksnes kompozīts, putas
			Nē	Koksnes kompozīti
Kvieši	Proteīns	Polikondensācija	Jā	Papīrs
Zivis	Proteīns	Polikondensācija	Nē	Koksnes kompozīti
Rapšu kūka	Olbaltumvielas, ogļhidrāti un citi atlikumi pēc eļļas spiešanas	Polikondensācija	Nē	Koksnes kompozīti
Kartupeļi	Ciete (ogļhidrāts)	Polikondensācija	Jā	Iepakojums
Koku miza, korķis	Suberīns	Polikondensācija	Nē	Koksnes kompozīti
Kartupeļu bumbuļi		Polikondensācija	Nē	Pētniecība, zema tehnoloģiju gatavība
Ziedoši augi	Tanīns (polifenols)	Poliadikcija	Jā	Koksnes kompozīti
Koki	Hemiceluloze (ogļhidrāts)	Polikondensācija	Nē	Koksnes kompozīti
	Vanilīns (fenols)	Polikondensācija	Nē	Augstas temperatūras vide
<i>Vanilla planifolia</i>	Vanilīns (fenols)	Polikondensācija	Jā	Augstas temperatūras vide
Liellopu piens	Kazeīns (proteīns)	Polimerizācija	Jā	Kompozīti
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Kazeīns (proteīns)	Polimerizācija	Jā	Kompozīti

* Bioloģiskais avots, kas atzīmēts ar "Nē", tiek klasificēts kā sekundārā vai terciārā izejviela.

Pamatojoties uz literatūras apskatu, lielākā daļa bioloģisko adhezīvu ir uz augu bāzes, un vairāk nekā puse no augu izcelsmes izejvielām ir otrreizējie bioresursi (2.1. att.).

- Augu izcelsmes primārie bioresursi
- Augu izcelsmes sekundārie bioresursi
- Dzīvnieku izcelsmes primārie bioresursi
- Dzīvnieku izcelsmes sekundārie bioresursi
- Mikroorganismu izcelsmes bioresursi



2.1. att. Bioloģisko adhezīvu bioloģiskais avots.

2.2. Skaidu plātnes no skujkoku mežizstrādes atlikumiem

Analizējot to dēļu, no kā koksnes daļiņas tika iegūtas, stiprības rezultātus, izmantojot šķeldotāju ar divām horizontāli rotējošām asīm, netika novērota cieša saistība starp daļiņu izmēru un iegūtajiem stiprības rezultātiem.

Spiediena un temperatūras diapazons tika izvēlēts no literatūras, un sākotnējie testi pēc kvalitatīva novērtējuma sašaurināja temperatūras un spiediena diapazonu līdz darba diapazonam, kurā tika izgatavotas derīgas plātnes. Plātnes, kas tika izgatavotas, piemērojot galējās mainīgās vērtības, sadega, sabruka vai radīja dobumus. Daži piemēri redzami 2.2. attēlā.



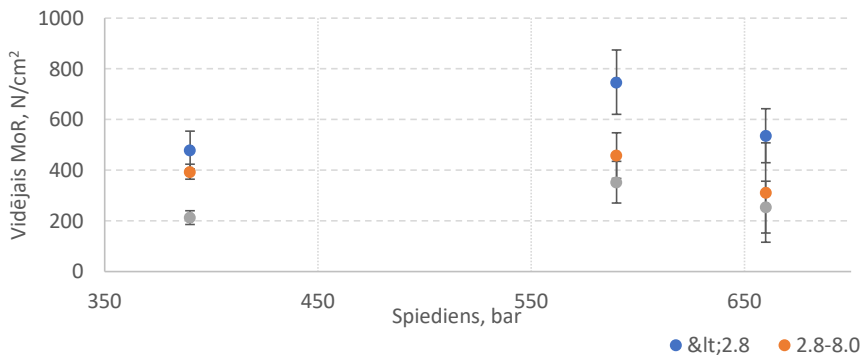
2.2. att. Plātnes, kas izgatavotas pie ekstremālām neatkarīgo mainīgo vērtībām.

Turpmākajiem testiem tika izvēlēta 140 °C un 160 °C temperatūra, 390 bar, 590 bar, 600 bar un 660 bar spiediens, turklāt tika novērtēta daļiņu izmēra ietekme, izmantojot vairākus daļiņu izmēra diapazonus līdz 10,0 mm, kas atdalīti, kā aprakstīts metodoloģijas sadaļā.

ANOVA rezultāti parādīja, ka temperatūras diapazons būtiski neietekmē materiāla izturību, bet daļiņu izmērs un daļiņu iegūšanas veids būtiski ietekmēja rezultātus.

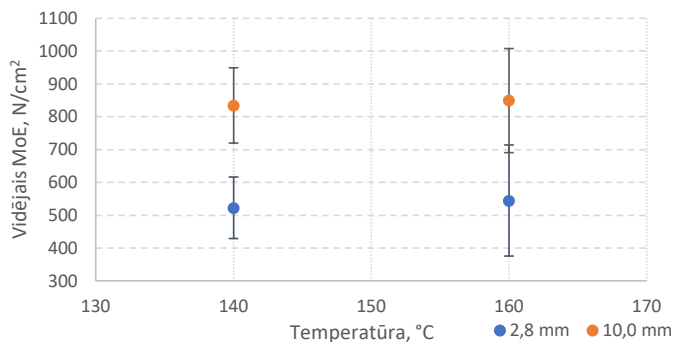
Sākotnējie izturības rezultāti trīs daļiņu izmēru dēļiem redzami 2.3. attēlā. Vislielākā izturība tika iegūta plātnēm ar daļiņu izmēru 2,8 mm, un vislielākā neatbilstība tika konstatēta,

sagatavojot plātnes ar augstu spiedienu vidēja daļiņu izmēra plātnēm. Plātnes, kas sagatavotas no 8,0–10,0 izmēra frakcijas, kopumā bija mazāk izturīgas nekā pārējās, bet, kā redzams no statistiskās analīzes, atšķirība starp 2,8–8,0 un 8,0–10,0 izmēru daļiņu plātņu MoE 660 bar spiedienā nebija būtiska ($P = 0,27$).



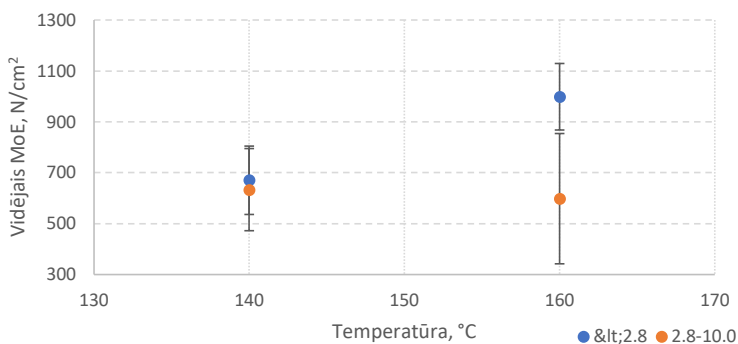
2.3. att. Elastības modulis atkarībā no spiediena un daļiņu izmēra: < 2,8 mm lieluma daļiņu dēļi; 2,8–8,0 mm lieluma daļiņu dēļi; 10,0 mm lieluma daļiņu dēļi. MoE – elastības modulis Saskaņā ar *ANOVA* nav mijiedarbības starp daļiņu izmēru un spiedienu. T tests parādīja, ka izvēlētajā spiediena ekstrēmēm (390 bar un 660 bar) nav būtiskas ietekmes uz plātņu ilgizturību ($P = 0,43$) < 2,8 mm daļiņu plātnēm, savukārt plātnes, kas izgatavotas, izmantojot 590 bar spiedienu, uzrādīja ievērojami lielāku ilgizturību, salīdzinot ar 390 bar ($P = 0,002$) un 660 bar ($P = 0,01$) spiedienā izgatavotajām.

Turpmākajiem testiem tika izvēlēts 600 bar iestatījums. Saskaņā ar ārējā laboratorijā veiktajiem biomasas testiem dažās piegādātās biomasas daļās bija augsts smilšu saturs pelnos (pelnu saturs 550 °C temperatūrā), kas sasniedza 26 %, savukārt neapstrādātajā biomasā smilšu saturs bija aptuveni 2 %. Tāpēc tika veikti papildu testi, izmantojot āmuru dzirnavu metodi, samāļot iepriekš sasmalcinātās un izsijātās > 1 mm frakcijas. Lielākās daļiņas tika apvienotas, lai sagatavotu 2,8 mm līdz 10 mm daļiņu izmēra plātnes, jo sākotnējie testi neuzrādīja būtiskas atšķirības starp šīm divām frakcijām izvēlētajā spiediena diapazonā. Lai novērtētu temperatūras un daļiņu lieluma ietekmi uz plātņu mehāniskajām īpašībām, plātnes tika sagatavotas, izmantojot 140 °C un 160 °C temperatūras režīmus. Pirms šī pētījuma tika veikti sākotnējie temperatūras testi, noskaidrojot, ka 140 °C un 160 °C temperatūras diapazons ir vispiemērotākais turpmākajiem testiem, jo zemāka temperatūras diapazona dēļos tika izgatavoti plātnes, kas nebija īsti savienotas, savukārt augstāku temperatūru dēļos tika izgatavotas apdegušas plātnes. Rezultāti, kas iegūti 140 °C un 160 °C temperatūras testos, redzami 2.4. attēlā.



2.4. att. Elastības modulis < 2,8 mm izmēra daļiņu dēļiem (zilā krāsā) un 2,8–10,0 mm izmēra daļiņu dēļiem (oranžā krāsā) atkarībā no karstās presēšanas temperatūras.

Kombinējot 2,8–8,0 mm un 8,0–10,0 mm frakcijas, tika iegūti rezultāti, kas ievērojami palielināja plātņu izturību, uzrādot labākus rezultātus nekā iepriekš. Tomēr mazākas frakcijas dēļiem izturība samazinājās, un to varētu izskaidrot ar mizas noņemšanu no biomasas. Atdalot smiltis no biomasas, no izejmateriāla tika atdalītas citas mazākas daļiņas, tostarp sīkākas mizas un skuju daļiņas. Lai izskaidrotu šādas izmaiņas, temperatūra tika papildus pārbaudīta, kombinējot ar āmuru sasmalcinātu biomasu ar šķeldotām un izsijātām daļiņām. Rezultāti, kas redzami 2.5. attēlā, parādīja, ka, lai gan lielāka izmēra daļiņu plātnes uzrāda aptuveni tādus pašus rezultātus, jo standarta novirzes pārsvarā atrodas tajās pašās diagrammas vietās, mazāka izmēra daļiņu plātnes uzrāda paaugstinātus rezultātus, un viens novirzes punkts pat sasniedza minimālo MoE sliekšni, kas noteikts Eiropas standartā koksnes šķeldas materiāliem *EN 312-2:1997*.



2.5. att. Elastības modulis < 2,8 mm izmēra daļiņu dēļiem (zilā krāsā) un 2,8–10,0 mm izmēra daļiņu dēļiem (oranžā krāsā) atkarībā no kombinēto daļiņu karstās presēšanas temperatūras.

Mazākas daļiņas, kas saspīestas kopā, padara galaproduktu blīvāku, tādējādi zaudējot skaidu plākšņu pievilcību. Tomēr, salīdzinot visu izmēru daļiņu dēļus, netika konstatēta korelācija starp kopējo blīvumu palielināšanos un ilgizturības palielināšanos.

Lai gan citas pētniecības grupas ir pārbaudījušas mežizstrādes atlikumu un priežu mizas izmantošanu skaidu plātņu ražošanā, iespēja pilnībā izslēgt fosilās izcelsmes līmvielas nav

pārbaudīta. Ņemot vērā mūsdienu klimata mērķus, ir būtiski pilnībā pārskatīt būvniecības un mājokļu pieejas, pilnībā izslēdzot no tirgus fosilo oglekli. Tāpēc zinātniskajai sabiedrībai un rūpniecībai ir jāatrod bioloģiskas izcelsmes alternatīvas ar mazāku vai samazinātu negatīvo ietekmi uz vidi un veselību. Šis pētījums sniedz ieskatu par mežizstrādes atlieku lietderību skaidu plātņu ražošanā un dažus vērtīgus secinājumus, kas apstiprina iepriekš veikto darbu par mežizstrādes atlieku potenciālo lietojumu skaidu plātņu ražošanā pat bez fosilām līmēm. Lai gan laboratorijas pētījumi ir veikti, izmantojot daļiņu izmēru atdalīšanu ar sietu palīdzību, būtu lietderīgi apsvērt gravimetrisko atdalīšanu ar ciklonu palīdzību, jo tādējādi tiktu iegūti vienmērīgāki daļiņu izmēri un saskaņotāki rezultāti. Tika pierādīts, ka vismazākais skujkoku mežizstrādes atlieku daļiņu izmērs varētu pozitīvi ietekmēt 100 % biošķembu plātņu izturību un varētu izpētīt metodes minerālu atdalīšanai no mizas materiāla, iespējams, izmantojot flotāciju. Jau tiek veikti pētījumi par līmju radīšanu no mizas ekstraktvielām līdztekus citām bioloģiskām līmēm, un šis pētījums apstiprina potenciālu skaidu plātņu pārejai no fosilajiem resursiem uz pilnībā bioloģiskiem materiāliem.

Šajā pētījumā tika izmantota bioloģiskā ogļhidrāta līme, jo iepriekšējos testos, kuros netika izmantota līme, materiāli uzrādīja zemu izturību un citus nevēlamus efektus, piemēram, materiāla izspiešanos un deģšanu. Izvēlēta līme uzrādīja daudzsoļus rezultātus, taču efektīvākas līmes meklējumi joprojām ir atvērti. Iepriekš veiktajā literatūras apskatā par adhezīviem ir noskaidrotas vairākas bioloģiskās bāzes iespējas, pat potenciālie adhezīvi no citiem rūpniecības atlikumiem. Veiksmīgi pētījumi šajā virzienā potenciāli varētu radīt skaidu plātnes, kuru pamatā galvenokārt ir izejvielas no atlikumiem – biomasas un līmes.

2.3. Uzlabots apritīgums šķērsām līmētas koksnes ražošanā

Šķērsām līmētas koksnes zāģmateriālu griešanas pārstrādes novērtēšana

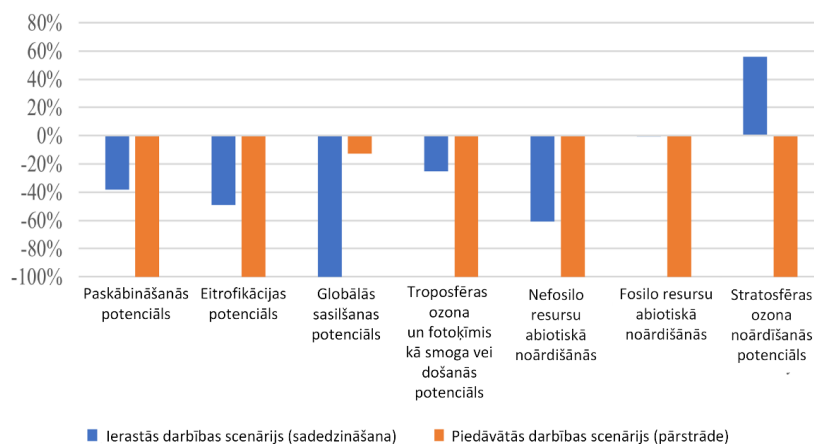
Ierosinātais gadījuma scenārijs, kurā no *CLT* iegūtos atgriezumus pārstrādā atkārtoti, tika modelēts programmā *SimaPro* saskaņā ar definēto *FU*, un rezultāti vispirms sniegti salīdzinoši ar darbības turpināšanas scenāriju, un pēc tam tie ir sadalīti pa procesu vienībām. Ietekmes novērtējums ir sniegts vidējā līmenī (kg vielas ekvivalenta), kā ieteikts *EDP* metodē un *ISO* standartos (4. tab.). Standarta darbības scenārija rezultāti atbilst enerģijas reģenerācijas fāzei 0,128 m³ *CLT*; no otras puses, ierosinātā scenārija rezultāti atbilst trīs iepriekš minēto apsvērumu summai: ietekmei, ko rada atkārtotas pārstrādes darbība; novērstajai ietekmei, ko rada jaunu *CLT* moduļu laišana tirgū; ietekmei, kas saistīta ar atlikušo, atkārtoti nepārstrādāto atgriezumumu enerģijas reģenerāciju.

Raksturojuma rezultātu salīdzinājums starp scenārijiem

Ietekmes kategorija	Vienība	Darbs kā parasti	Ierosinātais scenārijs
Paskābināšanās potenciāls	kg SO ₂ ekv.	-0,023	-0,059
Eitifikācijas potenciāls	kg PO ₄ eq	-0,005	-0,011
Globālās sasilšanas potenciāls	kg CO ₂ ekv.	-4,155	-0,524
Troposfēras fotoķīmisko oksidantu veidošanās potenciāls	kg CH ₂ eqv	-0,002	-0,008
Nefosilo resursu abiotiskais izsmelšanas potenciāls	kg Sb ekv.	-1,43E-05	-2,35E-05
Fosilo resursu abiotiskais izsīkšanas potenciāls	MJ	-0,005	-122,457
Stratosfēras ozona slāņa noārdīšanās potenciāls	kg CFC-11 ekv.	5,13E-07	-9,20E-07

Saskaņā ar scenāriju, kas paredz darbības turpināšanu, lielākā daļa ietekmes kategoriju liecina par ieguvumu videi, jo ir saprotams, ka elektrība un siltumenerģija, kas iegūta, sadedzinot *CLT* materiālu, aizvieto tradicionālo elektroenerģijas ražošanu Latvijā saskaņā ar *Ecoinvent 3.6* datubāzē iekļauto elektroenerģijas tirgus struktūru. Ierosinātajā scenārijā ir vēl lielāks ieguvums videi, jo joprojām tiek atgūti 30,28 % enerģijas no atlikušajiem atgriezumiem un tiek novērsta ietekme no jauniem *CLT* moduļiem.

Procentuālās izmaiņas, kas rodas, pārejot no parastā scenārija uz ierosināto scenāriju, labi redzamas 2.6. attēlā.

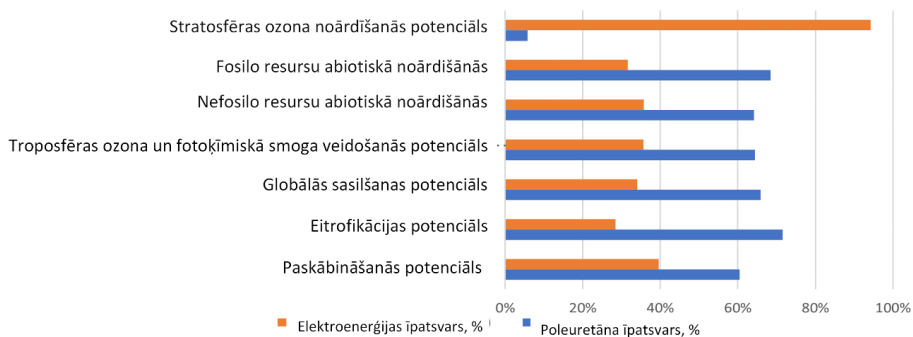


2.6. att. Raksturojuma rezultāti.

Kopumā mūsdienās *CLT* dzīves cikla beigu posms vai atkritumu apstrāde nodrošina ieguvumus videi gandrīz visās ietekmes kategorijās, kas novērtētas saskaņā ar *EDP* metodi, izņemot ozona slāņa noārdīšanās kategoriju. Tomēr ierosinātais jaunais darbību kopums, kas

rada jaunus *CLT* paneļus, samazinot sadedzināmo atkritumu daudzumu, palīdz palielināt jau gūtus ieguvumus visās jomās, izņemot globālās sasilšanas potenciālu, kas ir saistīts ar mazāku elektroenerģijas ražošanu, kura aizstātu ražošanu no tradicionālajiem avotiem konkrētajā Latvijas tirgū. Jāatzīmē, ka *GSP* ieguvumi saskaņā ar darbības scenāriju ir saistīti ar to, ka vietējā tirgū saražotā enerģija tiek aizstāta ar enerģijas reģenerāciju no simtprocentīgi atjaunojama avota, piemēram, koksnes. Visās pārējās jomās ieguvumi no jaunās pieejas pārsniedz sākotnējos ieguvumus.

Attiecībā uz ierosināto *CLT* atgriezumu otrreizējās pārstrādes scenāriju nelabvēlīgo ietekmi uz vidi rada otrreizējās pārstrādes darbība, jo atkritumu scenārijs ir tāds pats kā parastās darbības gadījumā, tādējādi radot ieguvumu videi, un jauniegūtie *CLT* moduļi tiek uzskatīti par novērstu produktu. Saskaņā ar ierosinātā scenārija novērtējumu tika konstatēts, ka lielākajā daļā novērtēto ietekmes kategoriju galvenais virzītājspēks ir poliuretāna līmes izmantošana (2.7. att.), izņemot ozona slāņa noārdīšanas kategoriju.

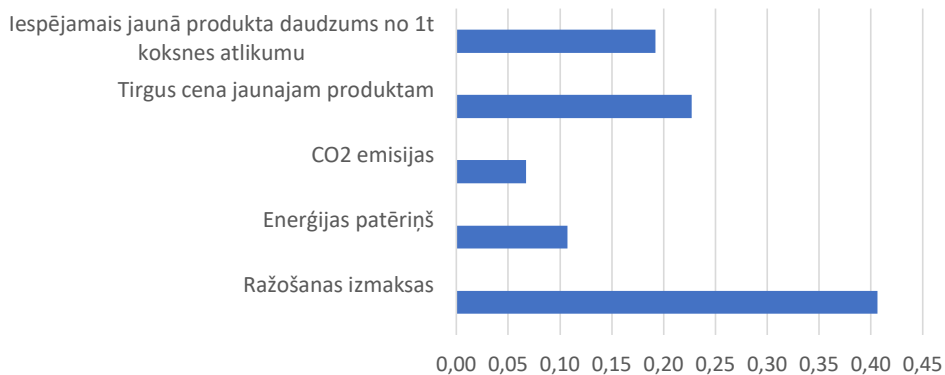


2.7. att. Ietekme uz vidi, ko rada katra pārstrādes darbība/plūsma.

Daudzkritēriju lēmumu pieņemšana

Pamatojoties uz veikto AHP kritēriju svāriem, koksnes atlikumu pārstrādes kritēriji tika aprēķināti un izmantoti *TOPSIS* analīzē, lai noskaidrotu labāko alternatīvu no uzņēmumu, kas strādā ar *CLT*, viedokļa.

Saskaņā ar ekspertu vērtējumu, apsverot koksnes atlieku izmantošanas iespējas, vissvarīgākās ir ražošanas izmaksas. Ražošanas izmaksām seko produkta tirgus cena un koksnes atlikumu attiecība pret jaunu produktu. AHP rezultāti parādīti 2.8. attēlā.



2.8. att. Svērtie kritēriji. Kritēriju svērumi ir noteikti, izmantojot analītiskās hierarhijas procesu un ekspertu interviju datus. Visu svaru summa ir vienāda ar 1.

Aprēķinātie svāri tika izmantoti *TOPSIS* analīzei, kā aprakstīts 2. nodaļā. Alternatīvu un tām atbilstošo kritēriju datu matrica kopā ar aprēķinātajiem svāriem redzama 2.4. tabulā.

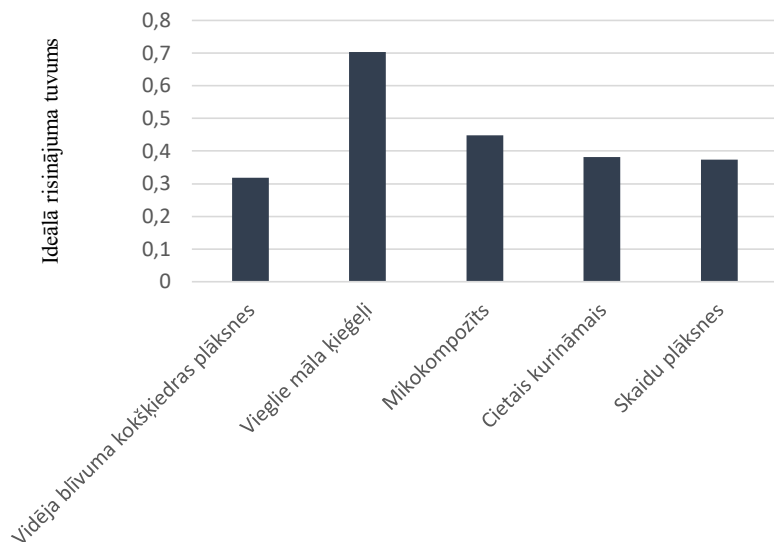
2.4. tabula

Datu matrica ar apsvērtajām alternatīvām (A_n) un atbilstošajiem svērtu kritēriju datiem (x_n)

	(x_1) Ražošanas izmaksas	(x_2) Enerģijas patēriņš	(x_3) CO ₂ emisijas	(x_4) Produkta tirgus cena	(x_5) Jaunā produkta un koksnes atkritumu attiecība
Kritēriju svāri (ω) ¹	0,41	0,11	0,07	0,23	0,19
Vienības	€/tonna	MWh/t	Kg CO ₂ /t	€/tonna	t
(A ₁) Vidēja blīvuma kokšķiedru plātne	250	1,6	1088	586	0,9
(A ₂) Mikokompozīts	68	0,28	47	140	0,9
(A ₃) Cietais kurināmais	113	0,02	38	204	1
(A ₄) Skaidu plātnes	147	0,77	150	350	0,9

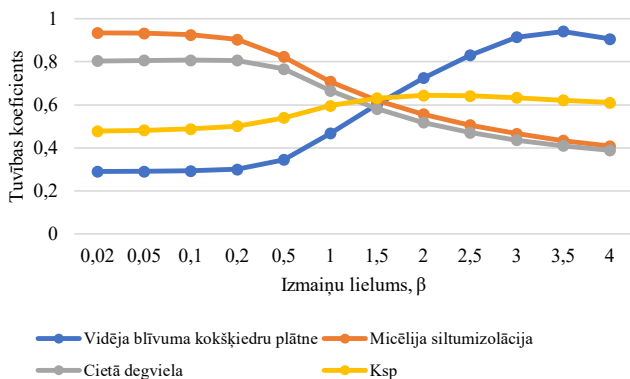
Piezīme¹. Svāri, kas aprēķināti, izmantojot analītiskā hierarhijas procesa pieeju.

TOPSIS pieeja noteica, ka visperspektīvākais koksnes atlikumu izmantošanas variants ir micēlija siltumizolācijas materiāls, bet vismazāk vēlamais variants ir *MDF* ražošana (2.6. att.). Mikokompozīta siltumizolācija ieguva tuvuma koeficientu (*CC*) 0,65 ideālajam risinājumam. Saskaņā ar ekspertu vērtējumu un literatūras datiem cietā kurināmā *CC* ir 0,59, kas liecina, ka cietā kurināmā ražošana joprojām ir tuvāk ideālajam. Tomēr, ņemot vērā izejvielu kaskādes, blakusprodukta sadedzināšana tiek uzskatīta par vismazāk vēlamo risinājumu, jo īpaši tad, ja blakusproduktu vēl varētu pārstrādāt citiem mērķiem.



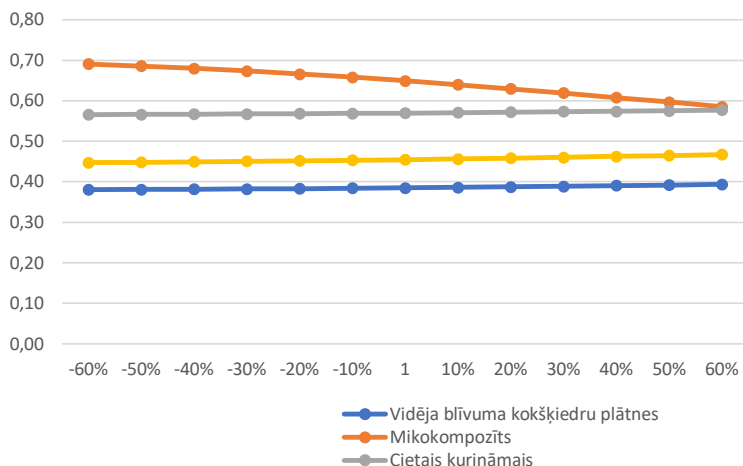
2.6. att. Daudzkritēriju analīzes rezultāti, kuros uz y ass attēlotas izskatītās iespējas un to tuvums vispiemērotākajai alternatīvai.

Kritēriju svara jutīguma analīze parādīja divu vēlamo variantu – mikokompozīta siltumizolācijas un cietā kurināmā – līdzību. Mainot produkta tirgus cenas svērumu atbilstoši vienotības variācijai β_{pm} , mikokompozīta siltumizolācijas materiāla un cietā kurināmā alternatīvām bija vienāda tendence. Kad produkta tirgus cenas svars divkāršojas, šīs divas alternatīvas zaudē savu pozitīvo tuvumu ideālajam risinājumam. *MDF* ir vērojama līdzīga tendence kā mikokompozīta siltumizolācijas materiāla un cietā kurināmā alternatīvām, savukārt *PB* vismazāk ietekmē produktu tirgus cenas izmaiņas (2.7. att.).



2.7. att. *TOPSIS* rezultātu jutīguma analīze. Jutīguma analīze tiek veikta, mainot produkta tirgus cenas svaru un pārreķinot pārējos piešķirtos svarus. x ass attēlo produkta tirgus cenas izmaiņu lielumu (β), y ass – visu alternatīvu tuvuma koeficientu ideālajam risinājumam.

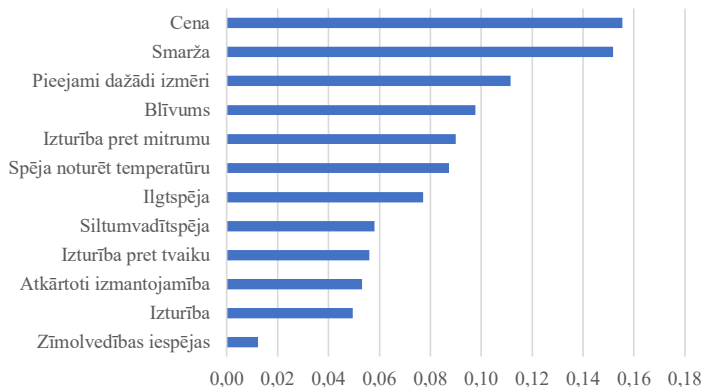
Ražošanas izmaksas bija vienīgais kritērijs, kurā mikokompozīta siltumizolācijas materiāls jau no paša sākuma ieņēma vadošo pozīciju, tāpēc tika veikta jutīguma analīze, lai noskaidrotu, cik lielām jābūt izmaiņām mikokompozīta siltumizolācijas ražošanā, lai materiāls zaudētu visvēlamāko pozīciju. Jutīguma analīze attiecībā uz mikokompozīta siltumizolācijas ražošanas izmaksām (2.8. att.) liecina, ka, ražošanas izmaksām palielinoties par 60 %, mikokompozīta alternatīva kļūtu mazāk vēlama cietā kurināmā ražošanai.



2.8. att. Jutīguma analīze attiecībā uz mikokompozīta siltumizolācijas ražošanas izmaksu izmaiņām.

2.4. Dabiskā termiskā iepakojuma tirgus piemērotības novērtējums

Lai inovācijas tiktu ieviestas, ir nepieciešams tirgus pieprasījums pēc tām. Šajā gadījumā, kad tiek izgudrots pilnīgi jauns materiāls, tas ir jānovērtē, izmantojot visu 12 kritēriju pāru salīdzināšanu. Svēršanas process sniedz vispārēju ieskatu par katra kritērija nozīmīgumu attiecībā pret pārējiem. Svēršanas rezultāti parādīti 2.9. attēlā.

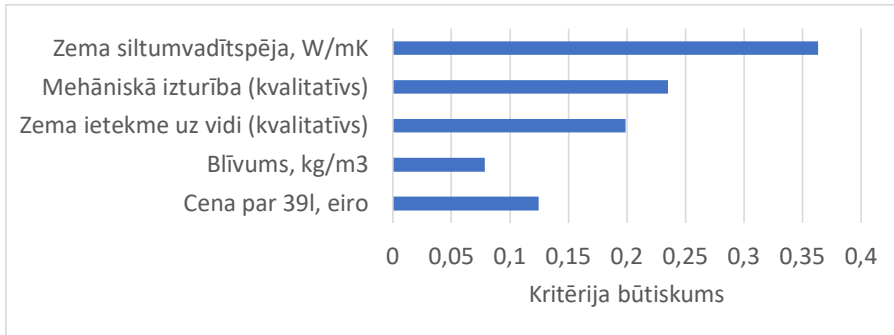


2.9. att. Nosvērtie kritēriji augošā secībā pēc to nozīmīguma.

Uzņēmumi, kas specializējas smalko ķīmisko vielu ražošanā, un uzņēmumi, kas izmanto termisko iepakojumu iekšējām vajadzībām, uzsver vairākkārt lietojama iepakojuma vērtību. Piemēram, uzņēmumi meklē termisko iepakojumu, kas izturētu vismaz 10 lietojumus. Turpretī farmācijas uzņēmumi izvēlas vienreizlietojamo iepakojumu, ņemot vērā tā bojāto izskatu pēc pirmās izmantošanas. Lai novērtētu pieejamās termiskā iepakojuma iespējas, analīzei tika izvēlēti tikai pieci kritēriji. Tādi kritēriji kā neitrāla smarža tika izslēgti, jo tie nav vispārēji piemērojami. Izmēru pieejamība netika rūpīgi pārbaudīta, ņemot vērā atšķirīgās uzņēmumu vēlmes. Ūdensizturība tika atzīta par nozīmīgu, ietverot tādus aspektus kā ūdens absorbcija, ūdens atbrīvošana un materiāla integritāte. Tomēr kritērija nozīme atšķiras atkarībā no konteksta. Piemēram, lai gan kukurūzas cietes putas ir piemērotas elektronikai, jo tās absorbē triecienus, tās šķīst ūdenī, tāpēc nav piemērotas mitriem sūtījumiem, piemēram, ledus produktiem. Ūdensizturība nav tik būtiska elektronikas pārvadājumos, jo krava parasti ir aizsargāta un bojātas pakas var tikt atsauktas.

Turklāt analīzē netika ņemti vērā izturības, tvaika izturības, atkārtotas lietošanas un grafiskās identitātes kritēriji. Izturība pret tvaiku ir saistīta ar bīstamiem sausā ledus pārvadājumiem, no kuriem uzņēmumi cenšas izvairīties. Uzņēmumi deva atšķirīgas priekšrokas atkārtotai izmantošanai, daži no tiem iepakojumu izmantoja vismaz desmit reizes, priekšroku dodot funkcionalitātei, nevis izskatam. Turpretim farmācijas uzņēmumi izvēlas vienreizlietojamo iepakojumu, lai katru transportēšanas reizi tiktu izmantots jauns iepakojums. Grafiskā identitāte netika iekļauta līdzīgu kā kritērijs smarža, netika iekļauta, ņemot vērā tās bināro raksturu.

Kopumā uzņēmumu izvēle attiecībā uz termisko iepakojumu ir atkarīga no tādiem faktoriem kā paredzētais lietojums un atkārtotas izmantošanas iespējas, savukārt daži kritēriji, piemēram, ūdensizturība, ir atšķirīgi atkarībā no lietojuma konteksta. Tālākai analīzei izvēlētie kritēriji tika izsvērti, un rezultāti parādīti 2.10. attēlā.

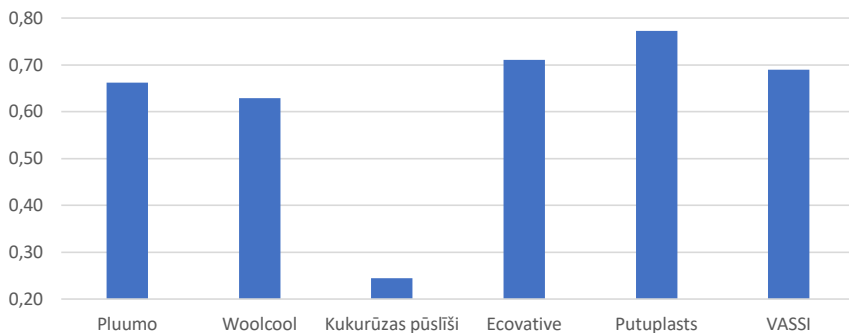


2.10. att. Izvēlētie kvantitatīvie kritēriji un to svāri, kas parāda katra kritērija nozīmi galīgā lēmuma pieņemšanā.

Kā redzams no iepriekš teiktā, pēc kritēriju daudzuma samazināšanas kritēriji “cena” un “spēja noturēt temperatūru” kļuva par vissvarīgākajiem kritērijiem, kas kopā veidoja vairāk nekā pusi no ietekmes uz galīgo lēmumu.

Vēlamākais materiāls

Lai novērtētu vislabāko tirgū pieejamo zaļo termisko iepakojumu, tika salīdzināti četri produkti ar putu polistirola iepakojumu. Izmantojot iepriekš noteiktos svarus, tika salīdzināti šādi siltumizolācijas materiāli: neaustas spalvas; neausta vilna; cietes putas; mikokompozīta siltumizolācijas materiāls; polistirols (2.11. att.).



2.11. att. Termiski iepakojamo materiāli prioritāte secībā pēc līdzības ideālajam risinājumam metode. Y ass attēlo tuvumu ideālajam risinājumam 1.

Piemērojot *TOPSIS* metodi, no termiskā iepakojuma variantiem vistuvāk ideālajam risinājumam (2.11. att. uz Y ass attēlots ar 1) bija neaustā vilna, kam sekoja spalvas un polistirols, viszemākā vieta tika piešķirta cietes putām, savukārt micēlijs ierindojās priekšpēdējā vietā.

2.5. CO₂ uzglabāšana koka paneļos

Uzglabātais biogēnā CO₂ daudzums jaunajā šķiedru plātņu izolācijas materiālā astoņiem dažādiem uzskaites standartiem redzams 2.5. tabulā. Uzglabātais daudzums ir aprēķināts vienam kubikmetram jaunā *fiberboard* izolācijas materiāla.

2.5. tabula

Uzglabātais biogēnais CO₂ atkarībā no uzskaites standarta

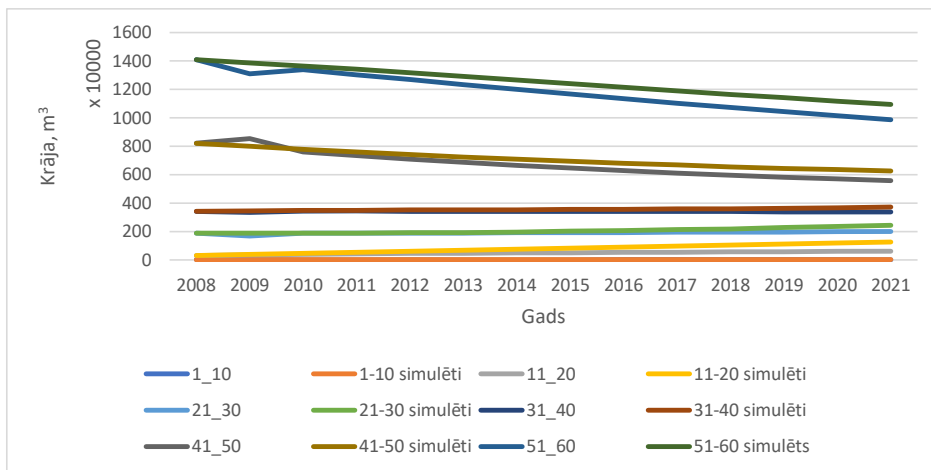
Tehniskais standarts	Uzglabātais CO ₂ , kg/m ³
<i>EN-15804</i> (2012)	359
<i>ISO/DIS-21930</i> (2015)	251
<i>EN-15804</i> (2012) + <i>A1:2013</i>	359
<i>CEN/TR-16970</i> (2016)	359
<i>EN-16485</i> (2014)	359
<i>ISO/TS-14067</i> (2013)	90
<i>PEF v2.2</i> (2016)	90
<i>PAS-2050</i> (2011)	291

Standartiem *EN-15804* (2012), *EN-15804* (2012) + *A1:2013*, *CEN/TR-16970* (2016) un *EN-16485* (2014) aprēķinātais uzkrātā CO₂ daudzums ir vienāds, jo tie visi ir balstīti vienā un tajā pašā standartā *EN-15804* (2012) un pieņem, ka daudzumu aprēķina pēc formulas, kas parādīta 3. vienādojumā, bez papildu precizējumiem. *ISO/TS-14067* (2013) un *PEF v2.2* (2016) standarti ir balstīti iepriekšējā *ISO-14040/44* standartā *LCA*, un tie neatšķiras uzkrātā CO₂ aprēķināšanā.

Standartos, kas balstīti *EN-15804* standartā, ir norādīts lielākais uzkrātā CO₂ daudzums vienā kubikmetrā produkta – 359 kgCO₂/m³, savukārt vismazākais uzkrātā CO₂ daudzums ir standartos, kas balstīti iepriekšējā *ISO-14040/44 LCA* standartā, – 90 kgCO₂/m³. Ņemot vērā visus standartus, var pieņemt, ka, ja netiek izvēlēta viena oglekļa dioksīda uzskaites metode, vidējā uzkrātā vērtība ir 270 kgCO₂/m³.

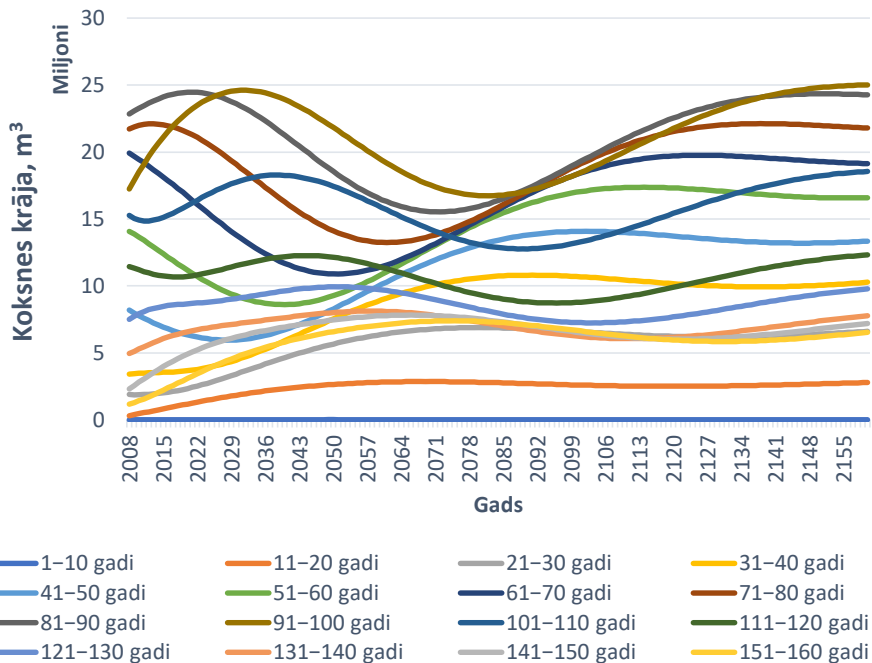
2.6. Ogleklis meža ekonomikā

Oglekļa dinamika meža saimniecībā tika novērtēta, izmantojot sistēmas dinamikas modelēšanu. Modeļa meža nozare tika validēta, izmantojot datus no valsts meža bioresursu monitoringa. Meža biomasas validācija redzama 2.12. attēlā.



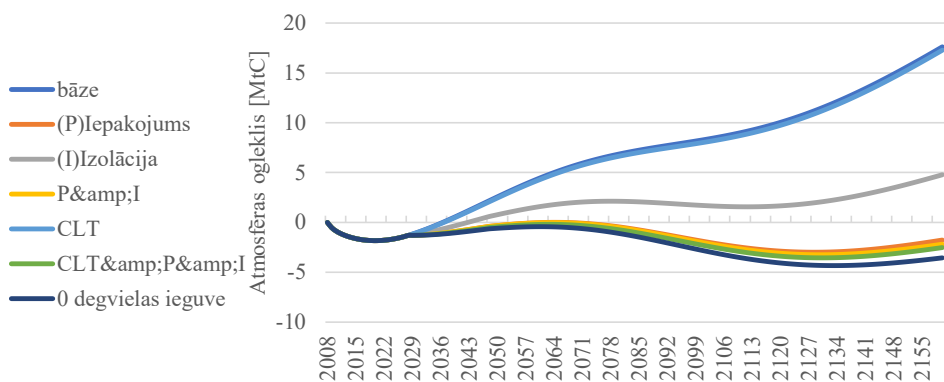
2.12. att. Modeļa validācija, izmantojot 1–60 gadus vecas parastās priedes mežaudzes Latvijas valsts mežos.

Meža biomasas dati bija pieejami laika posmā no 2008. līdz 2021. gadam, tāpēc, lai novērtētu oglekļa plūsmu nākotnē, tika modelēta situācija līdz 2160. gadam. Meža apsaimniekošana neietilpst šī pētījuma jomā, tāpēc tika izmantotas relatīvās mežizstrādes vērtības – statistiskās likmes procenti katrai meža vecuma grupai. Lai gan tas nav visizdevīgākais koksnes ieguves veids, tas nodrošināja zināmu stabilitāti. Statistikas dati parādīja, ka dažām vecuma grupām bija tendence samazināties, un, izmantojot stabili mežizstrādes likmi, tās varēja atjaunoties. Skujkoku biomasas prognozes Latvijas valsts mežu apsaimniekotajās teritorijās parādītas 2.13. attēlā.



2.13. att. Modeļa prognoze par parastās priedes biomasas krājumiem Latvijas valsts mežos

Izvēlētie produktu nozares scenāriji ietver *CLT* un siltumizolācijas materiālus iepakojumam un ēku siltumizolācijai. Rezultāti attēlo oglekļa krājumus atmosfērā 152 gadu periodā.

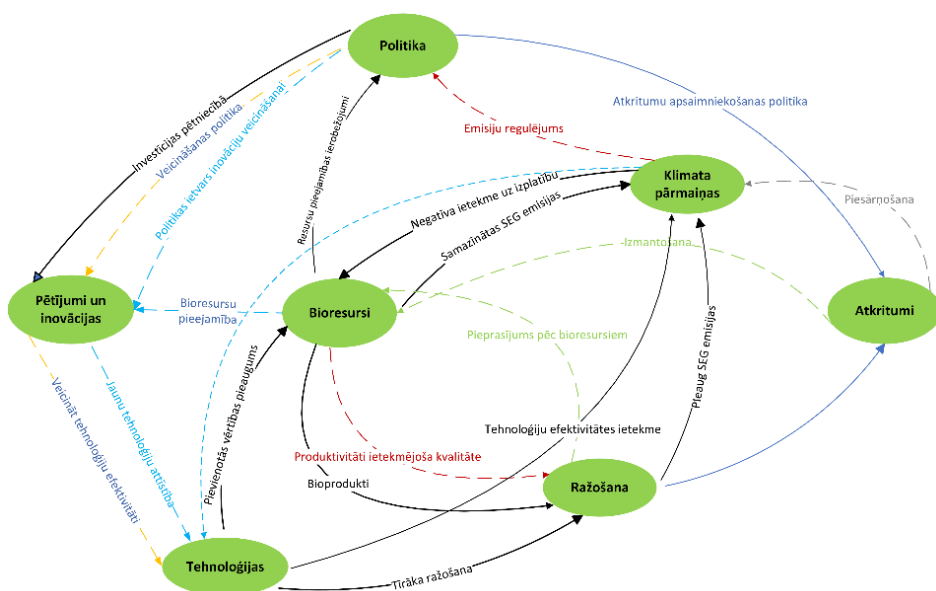


kombinētais CLT, P un I scenārijs; 0 degvielas ieguve – mežizstrādē netiek ņemta vērā nekāda degviela.

2.7. Bioekonomiku ietekmējošie faktori un rādītāji

Lejupēja pieeja

Pēc ekspertu vērtējumiem un Delfi metodes piemērošanas tika noteikti septiņi galvenie bioekonomiku ietekmējošie faktori un to savstarpējā saistība (2.15. att.). Apspriešanās saiknes tika balstītas zinātniskajā literatūrā un raksturotas kā tiešas vai netiešas atkarībā no tā, kā tās ietekmē sašaurinātos faktoros.



2.15. att. Septiņu bioekonomiku ietekmējošo faktoru un to savstarpējo saikņu grafisks attēlojums

Grafiskā attēlojuma saiknes (2.15. att.) galvenās identificētās kopsakarības ir šādas: (1) politika – pētniecība un inovācijas – tehnoloģija; (2) ražošana – atkritumi – klimata pārmaiņas; (3) ražošana – atkritumi – bioresursi; (4) politika – ražošana – bioresursi; (5) tehnoloģija – ražošana – klimata pārmaiņas; (6) klimata pārmaiņas – politika – ražošana; (7) politika – tehnoloģija – ražošana – bioresursi; (8) klimata pārmaiņas – bioresursi – ražošana. Tādi faktori kā patēriņš un ekonomiskā izaugsme galīgajā septiņu faktoru sarakstā, izmantojot lejupvērsto pieeju, neiekļuva. Saskaņā ar teorijā balstītu analīzi, ja tiek atklātas cēloņsakarību ķēdes, ir sagaidāma heterogenitāte. Bija paredzams, ka vienas dimensijas analīze neatklās visu cēloņsakarību ķēdi, tāpēc tika pievienota lejupejošā pieeja un vēl vienai fokusa grupai tika izvēlēti nozares eksperti, kuriem cēloņsakarību ķēdes precizēšanai tika izmantota Delfu

metodoloģija. Izmantojot augšupējo pieeju, tika atklāti daži jauni faktori. Tādi faktori kā uzvedība tika noskaidroti tikai tad, kad tika izmantota augšupēja pieeja. Iepriekš, izmantojot lejupvērsto pieeju, netika ņemts vērā finanšu resursu faktors, un tagad šis faktors atkal parādījās kā svarīgs.

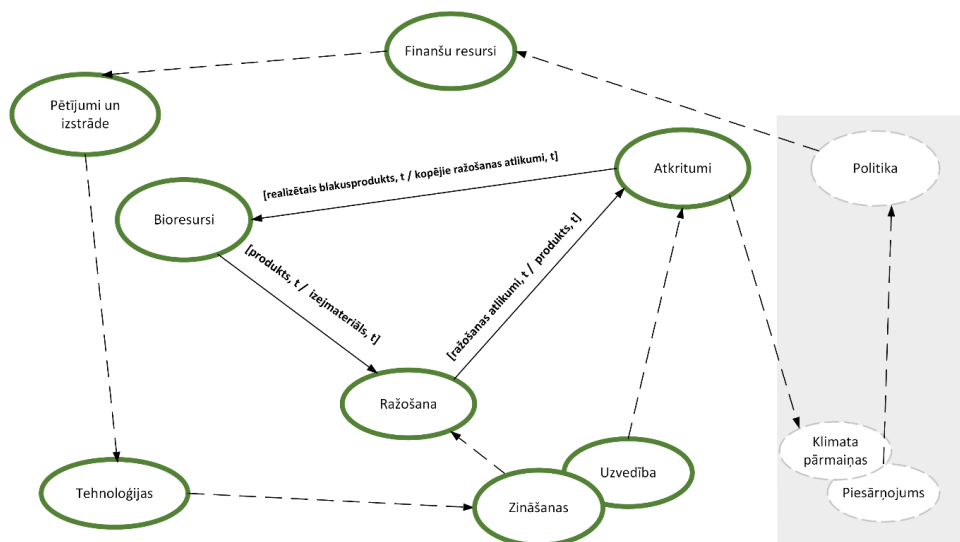
Pieceja no apakšas uz augšu

Ievērojama daļa biomasas, kas tiek dēvēta par atkritumiem, saskaņā ar ES definīcijām ir blakusprodukti. Tomēr ražošanas vadītāji var klasificēt blakusproduktus kā atkritumus tehnoloģisku ierobežojumu dēļ, piemēram, bojāšanās nepareizas uzglabāšanas vai sarežģītas atgūšanas dēļ, piemēram, atgūstot izšķīdušu cukuru no blanšētiem atkritumiem. Tomēr blakusproduktu pārveidošanā par atkritumiem liela nozīme ir uzvedībai un informētībai. Ja vadība izvairās meklēt jaunus blakusproduktu izmantošanas veidus vai pircējus, biomasa bieži tiek dēvēta par atkritumiem. Slepēnība palēnina inovāciju, jo starp uzņēmumiem, kas ievēro slēgtas inovācijas principu, nenotiek informācijas apmaiņa.

Atkritumu samazināšana ir ieteicamā apsaimniekošanas pieeja. Saistība atklāj atkritumu negatīvo finansiālo ietekmi un pozitīvo ietekmi uz bioresursu pieejamību. Piemēram, dārzenų audzēšanā efektīvāku mizošanas tehnoloģiju ieviešana samazina mizas atkritumu daudzumu. Daudzi blakusprodukti, atbilstoši apsaimniekojot, nekļūtu par atkritumiem, tādējādi samazinot relatīvo atkritumu īpatsvaru.

Šo saikņu rādītāji var būt ekonomiski vai tehnoloģiski. Tie var atspoguļot blakusproduktu vērtību, tehnoloģiju energoefektivitāti vai ražošanas efektivitāti. Finanšu stimuli veicina pētniecību un attīstību, stimulējot tīrākas tehnoloģijas. Naudas sodi attur no piesārņojuma. Esošās tehnoloģijas, kas ietekmē ražošanas efektivitāti, ietekmē arī atkritumu rašanos. Lielāks atkritumu daudzums palielina piesārņojuma un klimata pārmaiņu riskus, kas veicina politikas izmaiņas. Pienākumi veicina tīrāku ražošanu, tādējādi veicinot ieguldījumus pētniecībā un izstrādē, lai izvairītos no izdevumiem, kas saistīti ar emisiju vai piesārņošanas nodokļiem vai soda naudām. Rodas tehnoloģijas, kas samazina atkritumu daudzumu un iegūst bioresursus. Atkritumu izmantošana farmaceitisko līdzekļu un smalkās ķīmijas ražošanā ir dzīvotspējīga. Blakusproduktu pārorientēšana dažādu produktu grupu ražošanai veicina vērtības kaskādēšanu, paplašinot resursu apriti.

Uzņēmējdarbības saikne tika paplašināta, iekļaujot papildu faktoros. Uzvedībai un zināšanām ir izšķiroša nozīme, kas veicina jaunu, videi draudzīgu tehnoloģiju ieviešanu. Uzņēmumu finanses būtiski ietekmē inovācijas vides jomā, taču uzvedība un kultūra bieži tiek ignorēta. Vietējā politika, ražošana, zināšanas un lēmumu pieņēmēji ietekmē atkritumu un bioresursu saikni. Klimata pārmaiņas un piesārņojums, lai gan tie ir ārpus uzņēmuma darbības jomas (2.16. att. pelēkā krāsā), rada spiedienu uz darbību. Ilgtermiņa faktoriem, piemēram, fiskālajai politikai, ir jūtama ietekme. Bioekonomikas novērtējumam tika noteikta bioresursu, ražošanas un atkritumu kopsakarība. Efektīva blakusproduktu izmantošana noved atpakaļ pie bioresursiem, savukārt atkritumi nozīmē zaudētus resursus, kas piedāvā vērtības kaskādēšanu un cita produkta ražošanu.



2.16. att. Ierosinātā bioresursu plūsmas sasaiste uzņēmumā, kurā parādīti visi attiecīgie faktori. Zaļā krāsā – primārie faktori, ar pelēku svītrveida līniju – sekundārie faktori; bultiņas norāda virzienu, kādā faktori cits citu ietekmē. Centrālās bultas attēlo bioresursu-ražošanas-atkritumu-bioresursu faktoru kopu, ko izmanto ierosinātajos bioresursu izmantošanas indeksa aprēķinos. Ražošanas-atkritumu-bioloģisko resursu izmaiņu ietekmes novērtējums

Lai novērtētu uzņēmuma pievienoto vērtību aprites bioekonomikai, tika aprēķināts bioresursu izmantošanas indekss, izmantojot metodikas sadaļā aprakstīto pieeju. Šai analīzei tika izvēlēti divi uzņēmumi no trim iepriekš aptaujātajiem. Tika novērtēts kopējais bioresursu izmantošanas stāvoklis uzņēmumā – bioresursu izmantošanas indekss, kas tuvāks 1, liecina par bioresursu izmantošanu. Izstrādātie scenāriji ar attiecīgajiem biomasas izmantošanas indeksiem apkopoti 2.6. tabulā.

Divi pētītie gadījumi un četri alternatīvi scenāriji katram gadījumam. RM – izejviela, BBV no 1 līdz 0 apzīmē bioloģiskās vērtības piramīdas līmeņus, sākot no augšas. Tabulā norādītie procenti atspoguļo sausās biomasas daudzumu, kas nosūtīts uz konkrētu produktu, atkritumu vai blakusproduktu plūsmu. Scenārijos blakusproduktu izmantošana ir farmaceitiskie produkti un smalkās ķīmikālijas BBV 1, pārtika un barība BBV 0,75, bioplastmasa un polimēri BBV 0,5, birstošās ķīmikālijas un biogāze BBV 0,25, enerģija un siltums BBV 0. Atkritumi ir izlietojamo organisko blakusproduktu un atkritumu kā sapuvušu izejvielu sausā masa. BU_{ind} – aprēķinātais bioresursu izmantošanas indekss. Faktiskā situācija attiecīgajos divos uzņēmumos: II_{base} – pirmā uzņēmuma bāzes scenārijs, IX_{base} – otrā uzņēmuma bāzes scenārijs.

Alternatīvo scenāriju attēlojums pēc biomasas sadalījuma

Scenārijs		RM	BBV 1	BBV 0,7 5	BBV0 .5	BBV 0, 25	BBV0	Atkri- tumi	Produkts
1. uzņē- mums	I	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	34 %	66 %
	II _{case}	100 %	0 %	0 %	0 %	34 %	0 %	0 %	66 %
	III	100 %	0 %	5 %	0 %	12 %	0 %	17 %	66 %
	IV	100 %	0 %	0 %	0 %	12 %	7 %	16 %	66 %
	V	100 %	9 %	6 %	7 %	12 %	0 %	0 %	66 %
2. uzņē- mums	VI	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %	8 %	32 %	59 %
	VII	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	41 %	59 %
	VIII	100 %	0 %	0 %	0 %	37 %	0 %	3 %	59 %
	IX _{case}	100 %	0 %	5 %	0 %	32 %	0 %	3 %	59 %
	X	100 %	9 %	32 %	0 %	0 %	0 %	0 %	59 %

Blakusproduktu plūsmas pēc sausnas svara. RM – izejviela; BBV – biomasai pievienotās vērtības koeficients. Pievienotā vērtība tiek atspoguļota ar atbilstošo koeficientu 1 – augsta vērtība, 0,75 – vidēji augsta vērtība, 0,5 – vidēja vērtība, 0,25 – zema vērtība un 0 – nav vērtības. Tabulā attēlots biomasas sadalījums pēc sausnas sausnas sastādītajos scenārijos (I, III līdz VIII un X) un atklātajos scenārijos (II_{case} un IX_{case}) 1. un 2. uzņēmumam.

Katrs uzņēmums ir pārstāvēts ar pieciem scenārijiem, attiecīgi I līdz V un VI līdz X katram uzņēmumam, ar II bāzes scenāriju pirmajam un IX – otrajam uzņēmumam. Katram uzņēmumam II un VII sliktākajā scenārijā tiek pieņemts, ka bojātās izejvielas un visi radītie blakusprodukti, produkti, kas neatbilst tirgus standartiem, un citi ražošanas atlikumi tiek nosūtīti uz atkritumiem, un cukurs kopā ar cieti, kas netiek atgūti no ūdens vai izmantoti kādā citā veidā. Aprēķinot sliktāko scenāriju, ir iespējams novērtēt ražošanas procesa vispārējo efektivitāti, jo indekss parāda, cik daudz produkta var iegūt no noteikta izejvielu daudzuma.

SECINĀJUMI

Neskatoties uz gandrīz gadsimtu seniem ierakstiem par bažām, ka Latvija eksportē mazvērtīgu koksni, šī tēma joprojām ir aktuāla. Promocijas darbs atklāj pārveidojošas atziņas par bioekonomiku un skujkoku vērtību ķēdes inovācijām. Visas pētītās inovācijas ir vērstas uz resursu efektivitāti un ražošanas atlikumu plūsmas pārorientēšanu uz pievienotās vērtības produktiem. Pētījumi aptvēra mežizstrādes atlikumu potenciālu 100 % biošķembu plātņu ražošanā, siltumizolācijas iepakojumu un atlikumu apsaimniekošanas stratēģiju novērtējumus.

Lai gan zinātniskajā literatūrā līdz šim jau ir aplūkots mežizstrādes atlikumu un priežu mizas lietojums skaidu plātņu ražošanā, nav pietiekami izpētīta iespēja pilnībā izslēgt fosilās izcelsmes līmvielas. Ņemot vērā mūsdienu klimata mērķus, ir būtiski pilnībā pārskatīt būvniecības pieejas, pilnībā izslēdzot no tirgus fosilo oglekli. Tāpēc gan zinātnē, gan rūpniecībā ir jāatrod bioloģiskas izcelsmes alternatīvas. Šis darbs sniedz ieskatu par mežizstrādes atlikumu lietderību mežizstrādes atlikumu skaidu plātņu kompozītu ražošanā un dažus noderīgus secinājumus, kas apstiprina iepriekš veikto darbu par mežizstrādes atlikumu potenciālo lietojumu skaidu plātņu ražošanā pat bez fosilajiem saistvielām. Lai gan laboratorijas pētījumos ir izmantota daļiņu izmēru atdalīšana, izmantojot sietus, būtu lietderīgi apsvērt gravimetrisko atdalīšanu arī laboratorijā, izmantojot ciklonus, jo tādējādi tiktu iegūti vienmērīgāki daļiņu izmēri, mazinot datu izkliedi. Tika pierādīts, ka vismazākais skujkoku mežizstrādes atlieku daļiņu izmērs varētu pozitīvi ietekmēt 100 % biošķembu plātņu izturību, un varētu izpētīt metodes minerālu atdalīšanai no mizas materiāla, iespējams, izmantojot flotāciju. Tajā pašā laikā jau tiek veikti pētījumi par līmvielu radīšanu no mizas ekstraktvielām līdztekus citām bioloģiskām līmvielām, un šis pētījums apstiprina potenciālu skaidu plātņu pārejai no fosilajiem resursiem uz pilnībā bioloģiskiem materiāliem.

Izvēlēta līme uzrādīja daudzsološus rezultātus, bet efektīvākas līmes meklējumi joprojām ir atvērti. Literatūras apskats par saistvielām apkopo vairākus risinājumus no bioloģiskas izcelsmes izejvielām un pat no citiem rūpniecības atlikumiem. Veiksmīgi pētījumi šajā virzienā potenciāli varētu radīt koksnes kompozītus, kuru pamatā galvenokārt ir izejvielas no atlikumiem – biomasas un līmes.

Eksperimentālo pētījumu, tirgus izpētes un kopējā bioekonomikas novērtējuma rezultāti liecina, ka skujkoki kā dominējošā Latvijas meža sugu grupa glabā lielu potenciālu meža ekonomikas pievienotās vērtības palielināšanai. Ir iespējams uzlabot tradicionālās skujkoku vērtību ķēdes resursu izmantošanas efektivitāti, ieviešot inovatīvus produktus un tehnoloģijas efektīvākai atlieku izmantošanai, piemēram, *CLT* atgriezumam pārstrādei. Tāpēc ir iespējams pievienot vērtību skujkoku vērtību ķēdei bez būtiskas primāro izejvielu izmantošanas pārorientēšanas.

Patlaban resursu efektivitātes pasākumu īstenošana uzņēmumos ir atkarīga no lēmumu pieņēmēju subjektīvā viedokļa. Lai stimulētu tradicionālo skujkoku pārstrādes plūsmu atlieku izmantošanu augstākas pievienotās vērtības produktiem, ir nepieciešami politikas

veidotāju reglamentējoši pasākumi. Šis secinājums izriet no teorijā balstītas bioekonomikas attīstības analīzes. Kā parādīja augšupejošā pieeja, uzņēmuma resursu efektivitāte ir atkarīga no lēmumu pieņemēju zināšanām un subjektīvās attieksmes pret šo jautājumu. Ja nav iekšējo zināšanu par ražošanas atlikumu potenciālu, atlikumi tiks novirzīti enerģijai, jo šis ceļš ir labi zināms, lai gan dod vismazāko pievienoto vērtību. Tomēr, neraugoties uz pieejamajām zināšanām, ir tikai dažas veiksmīgas inovatīvu tehnoloģiju ieviešanas. Līdz ar to var secināt, ka starp abiem faktoriem – “uzvedības” un “zināšanu – uzvedības” – faktoram ir lielāka nozīme skujkoku vērtību ķēdes attīstībā.

Vēl viens aspekts, kurā būtu lietderīgi iesaistīt politikas veidotājus, ir oglekļa uzskaitē. Promocijas darbā tika salīdzinātas vairākas uzskaites metodes. Metodoloģijās ir skaidri noteiktas robežas un aprēķinu pamatā esošie aprēķini, līdz ar to rezultāti ir atšķirīgi. Ievērojamais uzskaites metožu skaits rada situācijas, kad rezultātus var izmantot tikai īpašos gadījumos, līdzīgi kā dzīves cikla novērtējumos. Pielāgota analīze var sniegt atbildes uz ļoti specifiskiem jautājumiem. Tomēr ir svarīgi vienoties par vienotu uzskaites metodi, kas ļautu novērtēt pašreizējo situāciju valsts un starptautiskās ekonomikas līmenī un modelēt nākotnes scenārijus. Šajā promocijas darbā tika piedāvāta sistēmdinamika kā visaptveroša pieeja oglekļa uzskaitē un modelēšanai. Darbā tika izmantota sistēmdinamikas modelēšanas pieeja, lai ilustrētu oglekļa dinamiskās uzskaites koncepciju. Sākotnējie modelēšanas rezultāti parādīja, ka ir jāpārskata populārais pieņēmums par koksnes izstrādājumu neto nulles emisijām, jo modelis liecina par oglekļa uzkrāšanos atmosfērā no mežsaimniecības darbības. Tāpēc koksnes produktu ilgtspēja jānovērtē ilgtermiņā un saistībā ar enerģētikas nozares iespējām. Tikai risinot jautājumu par atkarību no fosilā kurināmā un produktu ilgmūžību, koksni un tās produktus var efektīvi uzkrāt oglekli. Bioproduktiem ir spēja amortizēt oglekļa izdalīšanos atmosfērā pat tad, ja tiek izmantots fosilais kurināmais, tomēr ir svarīgi sabalansēt produkta kalpošanas ilgumu ar laiku, kas nepieciešams oglekļa asimilācijai biomasā.

Neraugoties uz plāniem, kas izklāstīti Zaļajā kursā, lai iesaistītu resursu patēriņu no ekonomikas izaugsmes, tirgus paredz, ka palielināsies pieprasījums pēc materiālu apjoma. Tāpēc ir jāizpēta papildu alternatīvas šajā pētījumā aplūkotojām inovatīvajiem produktiem. Palielinot šķērsām līmēta koka ražošanas apjomu un aizstājot betonu daudzstāvu ēkās, tiktu ievērojami palielināta Latvijas tautsaimniecības ilgtermiņa oglekļa uzglabāšanas spēja.

Visbeidzot, augšupēja pieeja palielina atkritumu samazināšanas nozīmi un jaunu tehnoloģiju meklēšanu, kas uzlabotu resursu efektivitāti, tādējādi radot finansiālus ietaupījumus. Šis darbs parāda, cik svarīgi ir ražošanas atlikumus novirzīt izmantošanai produktos, kas asimilēto oglekli varētu uzglabāt ilgāku laiku.



Ilze Vamža dzimusi 1989. gadā Rīgā. Latvijas Universitātē ieguvusi dabaszinātņu bakalaura grādu bioloģijā (2016) un maģistra grādu vides zinātnēs (2019). Kopš 2019. gada strādā Rīgas Tehniskās universitātes Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultātes Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūtā, ieņemot pētnieces amatu. Zinātniskās intereses saistītas bioekonomiku un bioresursu vērtības ķēdēm.