

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultāte

Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts

Anda Fridrihsone

Doktora studiju programmas “Vides zinātne” doktorante

APRITES CIKLA NOVĒRTĒJUMS POLIURETĀNU IEGŪŠANĀ IZMANTOTIEM ATJAUNOJAMO IZEJVIELU POLIOLU MONOMĒRIEM

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji:

profesors *Dr. sc. ing.*
FRANCESCO ROMAGNOLI

Dr. sc. ing.
UGIS CĀBULIS

RTU Izdevniecība
Rīga 2020

Fridrihsone, A. Aprite cikla novērtējums poliuretānu iegūšanā izmantotiem atjaunojamo izejvielu poliolu monomēriem. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2020. 43 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes "RTU P-19" 2020. gada 11. maija lēmumu, protokols Nr. 115.

Promocijas darbs izstrādāts ar šādu atbalstu:



Eiropas Reģionālās attīstības fonds, projekts Nr. 2010/0214/2DP/2.1.1.1.0/10/APIA/VIAA/054 "Gaistošus organiskus savienojumus nesaturošu, uzsmidzināmu poliuretānu pārklājumu izstrādne no atjaunojamo izejvielu resursiem";



valsts pētījumu programma (VPP), projekts "Inovatīvi materiāli un viedās tehnoloģijas vides drošumam (IMATEH)";



Eiropas Reģionālās attīstības fonds, projekts Nr. 1.1.1.5/ERANET/18/03 kā daļa no *M-ERA.NET* projekta *Bio4Cryo* "No atjaunojamām izejvielām iegūtas un nanokristālisko celulozi modificētas kriogēnās izolācijas izstrāde".



L'Oréal-UNESCO "Sievietēm zinātnē 2018".



Promocijas darbs izstrādāts Latvijas Valsts koksnes ķīmijas institūta Polimēru laboratorijā un Rīgas Tehniskās universitātes Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūtā.

ISBN 978-9934-22-475-1 (print)

ISBN 978-9934-22-476-8 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts RTU promocijas padomes atklātā sēdē 2020. gada 27. augustā plkst. 16.00 tiešsaistē.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesore *Dr. habil. sc. ing.* Dagnija Blumberga,
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Asociētā profesore *Dr. sc. agr. Lucia Rocchi*,
Perudžas Universitāte, Itālija

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

APSTIPRINĀJUMS

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

Anda Fridrihsone (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 43 attēli, 21 tabula, kopā 115 lappušu. Literatūras sarakstā ir 229 nosaukumi.

SATURA RĀDĪTĀJS

IEVADS.....	5
Pētījuma joma	5
Promocijas darba mērķi	6
Pētniecības metodes.....	7
Promocijas darba zinātniskā aktualitāte	8
Pētījuma praktiskā nozīme	9
Promocijas darba aprobācija.....	10
1. LITERATŪRAS ANALĪZES KOPSAVILKUMS.....	13
1.1. Ilgtspējīga attīstība un ar to saistītās problēmas	13
1.2. Atjaunojamajos resursos balstīta Eiropa	13
1.3. Poliuretāns un ilgtspējība	14
2. METODIKA	16
3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA	17
3.1. ACI rapša audzēšanai.....	17
3.1.1. Mērķa un darbības jomas definēšana, funkcionālā vienība, sistēmas robežas .	17
3.1.2. Rapša audzēšanas un datu sniedzēja vispārējs apraksts	18
3.1.3. Kopsavilkums par ACI rapša sēklu audzēšanas posmu.....	18
3.1.4. ACIN rapša audzēšanas posmam	21
3.2. ACN rapšu eļļas ražošanas posmam	23
3.2.1. Mērķa un darbības jomas definēšana, funkcionālā vienība, sistēmas robežas .	23
3.2.2. ACIN rapšu eļļas ražošanas posmam	24
3.3. ACN rapšu eļļas biopololiu ražošanai.....	25
3.3.1. Mērķa un darbības jomas definēšana, funkcionālā vienība, sistēmas robežas .	25
3.3.2. Biopololiu sintēze	26
3.3.3. ACI kopsavilkums rapšu eļļas biopololiem.....	27
3.3.4. ACIN rapšu eļļas biopololiem: <i>ReCiPe</i> metode	27
3.3.5. ACIN rapšu eļļas biopololiem: <i>CED</i> metode	33
3.3.6. Jūtīguma analīze biopololiu ražošanai.....	35
SECINĀJUMI.....	37
PRIEKŠLIKUMI	39
IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS.....	40

IEVADS

Pētījuma joma

Ierobežotie fosilie resursi un dažādie ar vidi saistītie jautājumi, no kuriem viens no neatliekamākajiem ir globālā sasilšana un tās ietekme uz klimatu, ir veicinājuši materiālu no atjaunojamām izejvielām renesansi. Mūsdienās Eiropas Savienība (ES) atzīst, ka bioloģiskas izcelsmes materiāli ieņem nozīmīgu vietu pārejā no fosilajiem resursiem balstītas ekonomikas uz atjaunojamiem resursiem balstītu ekonomiku un ka tiem ir būtiska nozīme, lai veicinātu cirkulārākas un dekarbonizētas ekonomikas attīstību. Šo materiālu izstrādi atbalsta un popularizē gan politikas veidotāji, gan arī valstiska līmeņa konsultatīvās iestādes. Piemēram, Latvijā ir izstrādāts informatīvais ziņojums “Latvijas Bioekonomikas stratēģija 2030” (LIBRA) [1]. Starpvalstu līmenī ES ir izstrādāta Bioekonomikas stratēģija (2012) [2], atjaunināta Bioekonomikas stratēģija (2018) [3] un Apvienoto Nāciju Organizācijas (ANO) programma “Pārveidosim mūsu pasauli: ilgtspējīgas attīstības programma 2030. gadam” [4].

Līdz ar to ilgtspējīgu materiālu no atjaunojamām izejvielām izstrāde ir viens no stūrakmeņiem, dodoties ilgtspējīgas attīstības virzienā un veidojot oglekļa emisiju neitrālu nākotni saskaņā ar Parīzes nolīgumā [5] ietvertajiem klimata aizsardzības mērķiem.

Pētījumu, kas vērsti uz to, lai dažādas naftas ķīmijas izejvielas aizstātu ar atjaunojamās izcelsmes izejvielām, ko iespējams iegūt dažādu ķīmisko procesu rezultātā, ir daudz. Ilgu laiku atjaunojamās izcelsmes izejvielām piedēvētie ieguvumi apkārtējai videi netika pamatoti. Vides un klimata pārmaiņu jautājumi pasaulē ir prioritāte, tāpēc izejvielu priekšrocības un to ražošanas patiesā ietekme uz vidi un klimata pārmaiņām ir jāpamato. To iespējams izdarīt, veicot aprites cikla novērtējumu (ACN), kas ir mūsdienīga metode produktu un procesu ietekmes uz vidi novērtēšanai, izmantojot visaptverošu pieeju, ietverot visus posmus, sākot ar izejvielu ieguvu un beidzot ar aprites cikla beigu procesiem. Saskaņā ar Starptautiskās standartizācijas organizācijas (ISO) definējumu, ACN ir “produkta sistēmas ielaides, izlaides un iespējamās ietekmes uz vidi visā tā aprites ciklā apkopošana un novērtēšana” [6]. ACN veikšana ir sarežģīts process, ko ietekmē dažādi faktori – sistēmas robežu noteikšana, precīzu datu ieguve, rezultātu interpretēšana un citi. Visprecīzākos un konsekvētākos rezultātus ACN izmantošana dod, piemērojot to jau funkcionējošās ražošanas sistēmās. Tomēr ACN ir iespējams izmantot arī izpētes un attīstības fāzē, lai identificētu lielākos vides piesārņojuma avotus, t. s. “karstos punktus”, un veiktu pasākumus to ietekmes mazināšanai.

ES un Latvija turpmākajās desmitgadēs ir apņēmusies likt uzsvaru uz bioekonomikas attīstību, piešķirot tai prioritāru lomu tautsaimniecībā. Divi no galvenajiem LIBRA ietvertajiem mērķiem ir bioekonomikas produktu pievienotās vērtības palielināšana un bioekonomikas eksporta produkcijas vērtības palielināšana. Saskaņā ar autores rīcībā esošo informāciju, šajā promocijas darbā sniegtie rezultāti ir Latvijā pirmais izstrādātais produkts no atjaunojamām izejvielām, kuram ir veikts novērtējums arī no vides ietekmes viedokļa.

Promocijas darba temats ir aktuāls šī brīža situācijā. Promocijas darba mērķis ir novērtēt no atjaunojamām izejvielām, kas pieejamas Latvijā, izstrādāta materiāla – rapšu eļļas poliolu, kas

tiek izmantoti poliuretāna (PU) ražošanā – ekoloģiskos raksturlielumus. Šie aspekti ir kalpojuši par pamatu šī promocijas darba mērķu izvēlē un satura izstrādē.

Promocijas darba mērķi

Promocijas darba pamatmērķis ir veikt visaptverošu PU materiālu ražošanai piemērotu rapšu eļļas bio-poliolu “no šūpuļa līdz vārtiem” ACN.

Galvenā mērķa sasniegšanai tika noformulēti vairāki apakšmērķi:

- veikt zinātniskās literatūras analīzi par dabīgas izcelsmes eļļu poliolu (angļu val. *natural oil polyols (NOPs)*) ACN;
- veikt detalizētu rapšu sēklu un to eļļas ražošanas aprites cikla inventarizācija (ACI) Latvijā, izmantojot to kā Ziemeļeiropas valsts analīzes piemēru;
- izvērtēt nelabvēlīgo ietekmi uz vidi, kas saistīta ar rapšu eļļas biopoliolu ražošanu pilotreaktora mērogā.

Lai sasniegtu šajā pētījumā izvirzītos mērķus, promocijas darbā ir formulēti šādi pētījuma jautājumi.

Pētījuma 1. jautājums

Kādas ir Latvijā izplatītās lauksaimniecības prakses? Kāda ir Latvijā iegūto ziemas un vasaras rapša sēklu audzēšanas aktuālā ACI, izmantojot to kā Ziemeļeiropas reģiona analīzes piemēru? Kāda ir reģionam specifiskā rapšu eļļas ražošanas inventarizācija, ņemot vērā konkrētā analīzes piemēra specifisko ražību un izmantotās tehnoloģijas? Vai pastāv kādas ar ACI un *ecoinvent* datubāzes saskaņošanu saistītas problēmas?

Atbilde uz pirmo jautājumu kalpos kā padziļinātas, aktuālas, reģionam specifiskas ACI izveide rapšu sēklu audzēšanas fāzei un rapšu eļļas ražošanas fāzei. Šī posma laikā var tikt identificēti saskaņošanas procesa kritiskie un vājie punkti. Atbildei uz pētījuma 1. jautājumu ir liela ietekme uz pētījuma 2. jautājumu, jo ACI veido ACN pamatu un pieejamo datu kvalitāte zināmā mērā nosaka ACN kvalitāti.

Pētījuma 2. jautājums

Kāds ir Latvijā veiktā rapšu sēklu ieguves un rapšu eļļas ražošanas procesa raksturojums attiecībā uz vidi? Kas ir lielākie vides piesārņojuma avoti? Kādas ir būtiskākās iespējas šo produktu ekoloģisko raksturlielumu uzlabošanai? Rapšu eļļas ražošanas procesā tiek iegūti divi produkti – eļļa un rauši. Kāda ir blakusprodukta sadalījumu ietekme rapšu eļļas ražošanas ACN rezultātos?

Atbilde uz pētījuma 2. jautājumu ļaus identificēt rapšu sēklu ieguves un rapšu eļļas ražošanas procesu ietekmi uz vidi Latvijā. Tiks pētīta blakusprodukta dažādo sadalījumu ietekme, un šī informācija tiks izmantota arī pētījuma 3. jautājumā.

Pētījuma 3. jautājums

Vai polioli, kas ražoti no atjaunojamām izejvielām, ir labāki par naftas ķīmijas produktu alternatīvu? Vai biopoliola ražošanas procesā ir vērojams siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisijas

ietaupījums? Vai biopoliola ražošanas sistēmā ir vērojams neatjaunojamo energoresursu ietaupījums? Kas ir lielākie vides piesārņojuma avoti? Kādas ir rapšu eļļas blakusprodukta sadalījumu ietekmes uz biopoliola ietekmi uz vidi? Kāda ir Latvijas energoresursu struktūras ietekme, salīdzinot ar citām valstīm uz poliolu ekoloģiskajiem raksturlielumiem?

Uz pētījuma 3. jautājumu atbildi iespējams gūt, veicot izstrādāto biopoliolu ACN, kas balstīts aktuālajā un reģionam specifiskajā lauksaimniecības izejvielu ACI datu kopā, kombinējot to ar detalizētu, eksperimentālos rezultātos balstītu poliolu sintēzes ACI.

Pētniecības metodes

Pētniecības metodes ir balstītas ACN metodoloģiskajā sistēmā, ko reglamentē starptautiskie standarti *ISO 14040/44*. Izmantotās pētniecības metodes balstās primārajos datos, kas iegūti, veicot padziļinātas intervijas ar rapšu sēklu ieguves un rapšu eļļas ražošanas uzņēmumu pārstāvjiem, kā arī augsnes aizsardzības līdzekļu un mēslojuma ražotājiem un izplatītājiem. Primārie dati tika iegūti arī par rapšu eļļas biopoliolu sintēzi pilotreaktora mērogā un to raksturojumu; šie dati balstās ķīmiskā laboratorijā veiktu eksperimentu rezultātos. Pētījumā tika izmantoti arī sekundārie dati, piemēram, Latvijas Centrālās statistikas pārvaldes datubāzes, *Eurostat* datubāzes un publikāciju, ANO Pārtikas un lauksaimniecības organizācijas statistikas datubāzes (*FAOSTAT*), Pesticīdu īpašību datubāzes informācija, kā arī fakti no dažādām zinātniskajām publikācijām un oficiālajiem ziņojumiem. Metodes aprobētas uz konkrētā Latvijas kontekstā pētītā analīzes piemēra.

ACN modeļa izveidei un ietekmes novērtējuma aprēķiniem tika izmantota *Pré Consultants* izstrādātā ACN programmatūra *SimaPro 9.0*, kā arī *ecoinvent v3.5* ACI datubāze.

Pētījums izstrādāts, sadalot to posmos, lai izvairītos no nepārredzamajiem (angļu val. *black box*) vienības procesiem un nodrošinātu rezultātu caurredzamību. Ja netiek nodrošināta caurredzamība, ACN rezultātiem nav lielas nozīmes. Pētījuma galvenie posmi ir šādi:

- detalizēta rapšu sēklu ieguves ACI Ziemeļeiropas reģionā, izmantojot Latviju kā analīzes piemēra valsti;
- rapšu eļļas ražošanas ACI;
- rapšu sēklu ieguves un rapšu eļļas ražošanas ACN;
- rapšu eļļas biopoliolu ražošanas ACN.

Atsevišķi nodalītie vienības procesi, kas aprakstīti promocijas darba turpmākajās sadaļās, piešķir rezultātiem lielāku zinātnisko un praktisko vērtību.

Promocijas darbam ir piecas daļas – ievads, literatūras analīze, metodika, rezultāti un diskusija, secinājumi un ieteikumi turpmākajam darbam.

Ievadā ir sniegts pārskats par promocijas darba pētījuma jomu. Tajā ir norādīti pētījuma galvenie mērķi un uzdevumi. Promocijas darbā izmantotās metodes un promocijas darba struktūra ir aprakstīta pirmās daļas beigās.

Literatūras analīzes daļā ir sniegts īss pārskats par izaicinājumiem ilgtspējības jautājumā, plastmasu, īpaši pievēršoties PU materiāliem, kā arī jaunākajām tendencēm PU nozarē, kas iegūti no *NOPs*, un to ekoloģiskajiem raksturlielumiem.

Metodikas daļā ir aprakstītas ACN metodes un sniegts īss pārskats par ACN. ACN metožu četras fāzes ir aprakstītas saskaņā ar *ISO 14040* un *ISO 14044* standartiem. Tiek sniegts īss programmatūras un datubāzu apraksts. Noslēgumā īsi aprakstīts rapšu eļļas biopoliolu sintēzes process.

Rezultātu un diskusijas daļā tiek sniegti detalizēti rapšu sēklu lauksaimniecības fāzes ACI rezultāti, salāgošana ar *ecoinvent* datubāzēm, kā arī rapšu sēklu ACN. Pēc tam tiek veikts rapšu eļļas ACN, parādot ietekmi uz dažādajām sadalījumu pieejām. Noslēgumā tiek sniegts divu no rapšu eļļas atvasinātu polioliu ACN. Lai pārbaudītu ACN pētījuma ticamību, rezultāti ir salīdzināti ar starptautisku pētījumu rezultātiem.

Secinājumu un ieteikumu daļā ir sniegts darba kopsavilkums, apkopojot secinājumus un perspektīvas attiecībā uz turpmākiem pētījumiem.

Promocijas darba zinātniskā aktualitāte

ACN rezultāti dažādiem produktiem var ievērojami atšķirties atkarībā no izejvielu veida un to ražošanas procesa, izmantotās ķīmiskās pārveides tehnoloģijas, izmantotajiem transporta veidiem un citiem faktoriem – nepastāv nemainīgs koncepts “viens ACN der visam”.

Pētījumā tiek sniegti zinātniski pamatoti rezultāti par konkrētu no atjaunojamām, Latvijā pieejamām izejvielām izgatavotu produktu – rapšu eļļas dietanolamīda un rapšu eļļas trietanolamīna esteru polioliu – ietekmi uz vidi. Rapšu eļļas biopoliolu ražošanas inventarizācija ir balstīta laboratorijas apstākļos eksperimentāli iegūtos datos, kur polioliu sintēzes process ir ticis validēts pilotražošanas apjomā. Izstrādātie rapšu eļļas biopolioli ir demonstrēti un tikuši validēti izsmidzināma PU pārklājuma ražošanā un cietu PU putuplastu siltumizolācijas materiālos. Šis ir svarīgs aspekts no atjaunojamām izejvielām ražotu produktu attīstībā, jo ne visi tehnoloģiskie risinājumi tiek sekmīgi pilnveidoti un pierāda savu veikspēju gala lietojumā. Pētījumā tiek prezentēta pilnīga un precīza rapšu eļļas biopoliolu ekoloģisko raksturlielumu kvalitatīvā un kvantitatīvā analīze. Tā palīdzēs mazināt informācijas trūkumu par *NOP* ekoloģiskajiem raksturlielumiem. *NOP* aprites cikla inventarizāciju iespējams arī izmantot citos pētījumos, lai salīdzinātu dažādus biopoliolus, to tehnoloģiskās ražošanas risinājumus un no tiem izrietošās ietekmes uz vidi.

ACN rezultāti ļauj izdarīt secinājumus: salīdzinot no rapšu eļļas ražotus polioliu ar naftas ķīmijas polioliem, šajā darbā analizētajiem biopolioliem “no šūpuļa līdz vārtiem” ACN uzrāda ieguvumus apkārtējai videi. Tika pierādīts kumulatīvais enerģijas, tostarp kumulatīvais neatjaunojamās enerģijas, pieprasījuma ietaupījums. Tika iegūts apstiprinājums apgalvojumam par ieguvumiem apkārtējai videi, ko rada zemākās SEG emisijas biopoliolu ražošanas procesā.

Iegūtie rezultāti palīdzēs sekmēt nākotnes bioekonomikas politikas attīstību un lēmumu pieņemšanas procesus ES līmenī.

Promocijas darbā ir sniegta detalizēta rapšu sēklu ieguves, rapšu eļļas ražošanas un rapšu eļļas biopoliolu ražošanas ACI kvantitatīvā un kvalitatīvā analīze, kas balstīta vērtīgos primārajos datos. Publicētā pētījuma rezultāti attiecībā gan uz ACI, gan ACN būs svarīgi rezultātu sasniegšanā gan vietējā mērogā (t. i., Ziemeļeiropas reģiona valstī Latvijā), gan arī lai

ar šī brīža zināšanām labāk spētu salīdzināt procesa kopējo ilgtspējību ES mērogā un pasaules kontekstā.

Pētījuma galvenie secinājumi un rezultāti ir prezentēti starptautiskās konferencēs un zinātniski recenzētās publikācijās, un tajās ir atzīta veiktā pētījuma novitāte un nozīmīgums.

Pētījuma praktiskā nozīme

Šajā promocijas darbā aprakstītos rezultātus var izmantot citi ACN pētnieki, lai veicinātu iegūto rezultātu praktisko piemērojamību un noderīgumu vairākās jomās.

- Rapšu sēklu lauksaimniecības fāzes ACI – rezultātus var pievienot ACI datubāzēm, piemēram, *ecoinvent* datubāzei, kur šobrīd nav attiecīgu datu kopu par Latviju, Baltijas valstīm vai Ziemeļeiropas reģionu. Tas veicinās ACI reģionalizāciju. Rezultātus var izmantot arī citos pētījumos, kur tiek veikta pilnībā attīstījusies, uz atjaunojamiem resursiem balstīta bioekonomikas pētīšana. Rezultāti būtu specifiski konkrētam reģionam, nevis tiktu balstīti datu kopā, kas iegūta no datubāzes. Dati par izejvielu ražošanu tiktu balstīti aktuālās, konkrētā reģionā izmantotās lauksaimniecības praksēs.
- Rapšu eļļas ACI – rezultātu var pievienot ACI datubāzēm, piemēram, *ecoinvent* datubāzei, kur šobrīd nav attiecīgu datu kopu par Latviju, Baltijas valstīm vai Ziemeļeiropas reģionu. Uz rapšu eļļu attiecināmos rezultātus var izmantot turpmākos ACN pētījumos, kuros tiek veikta biopoliolu sintēze, izmantojot jaunas sintēzes metodes, piemēram, enzimatisko katalīzi vai citas metodes. Šos rezultātus var izmantot arī, lai pētītu biodīzeļa ražošanas procesu Latvijā un veiktu dažādu scenāriju salīdzināšanu – bioloģisko izejvielu izmantošana degvielas ražošanā un to izmantošana ķīmisko vielu ražošanā. Rezultāti būtu specifiski konkrētam reģionam, nevis tiktu balstīti datu kopā, kas iegūta no datubāzes.
- Rapšu eļļas biopoliolu ACI – rezultātus var pievienot iepriekš minētajai *ecoinvent* datubāzei, jo tajā šobrīd ir atrodamas datu kopas tikai par naftas ķīmijas polioliem, kas reprezentē nozares vidējos rādītājus, un sojas biopolioliem no ASV ACI datubāzes. Rezultātus var izmantot, lai sagatavotu izstrādājumu vides deklarāciju (angļu val. *Environmental Product Declaration (EPD)*), kas ir neatkarīgi pārbaudīts un reģistrēts dokuments, kurā ietverta caurredzama un salīdzināma informācija par produktu aprites cikla ietekmi uz vidi. No atjaunojamām izejvielām ražots produkts, kas šajā gadījumā ir rapšu eļļas poliols, ar *EPD* varētu veicināt pieprasījumu pēc šāda vidi mazāk noslogojoša produkta.
- Sekmējot Latvijas integrācijas procesu savstarpēji saistītā Eiropas pētniecības telpā, kurā tiek pētīti materiāli no atjaunojamām izejvielām un to ekoloģiskie raksturlielumi.

Promocijas darba aprobācija

Pētījuma rezultāti ir publicēti zinātniskos žurnālos, kas ir indeksēti *Scopus* un *Web of Science* datubāzēs, kā arī ir prezentēti starptautiskās zinātniskās konferencēs.

1. **Anda Fridrihsone**, Francesco Romagnoli, Ugis Cabulis. Environmental Life Cycle Assessment of rapeseed and rapeseed oil produced in Northern Europe: a Latvian case study. Sustainability 2020, 12(14), 5699; <https://doi.org/10.3390/su12145699>
2. **Anda Fridrihsone**, Francesco Romagnoli, Vladimirs Kirsanovs, Ugis Cabulis. Life Cycle Assessment of Vegetable Oil Based Polyols for Polyurethane Production. Journal of Cleaner Production 266 (2020) 121403. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121403>.
3. **Anda Fridrihsone**, Francesco Romagnoli, Ugis Cabulis. Life Cycle Inventory for winter and spring rapeseed production in Northern Europe. Journal of Cleaner Production 177 (2018) 79–88. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.214>.
4. **Anda Fridrihsone-Girone**. Preliminary Life Cycle Inventory of Rapeseed Oil Polyols for Polyurethane Production. Journal of Renewable Materials, Volume 3, Number 1, March 2015, pp. 28–33 (6), DOI: <http://dx.doi.org/10.7569/JRM.2014.634136>.
5. U. Stirna, **A. Fridrihsone**, B. Lazdiņa, M. Misāne. Dz. Vilsone. Biobased Polyurethanes from Rapeseed Oil Polyols: Structure, Mechanical and Thermal Properties. Journal of Polymers and the Environment 21 (4) 2013, pp 952–962. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10924-012-0560-0>.

Papildus piecām publikācijām, kas veido promocijas darba pamatu, doktorantūras laikā tika izstrādātas un publicētas arī vairākas publikācijas par izstrādātajiem rapšu eļļas biopololiem un to lietojumu izsmidzināmo poliuretāna pārklājumu izstrādē.

1. **Fridrihsone-Girone, A.**, Stirna, U., Misane, M., Lazdiņa, B., Deme, L. Spray-applied 100% volatile organic compounds free two component polyurethane coatings based on rapeseed oil polyols. Progress in Organic Coatings, 2016, 94, 90–97. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2015.11.022>.
2. EU patents. U. Stirna, M. Misane, **A. Fridrihsone-Girone**, U. Cabulis, S. Gaidukovs, V. Tupureina. Method for producing spray-applied polyurethane coatings on metal constructions. EP2865724 (A1). 29.04.2015.
3. **A. Fridrihsone-Girone**, U. Stirna. Characterization of polyurethane networks based on rapeseed oil derived polyol. Polimery/Polymers, Volume 59, Issue 4, 2014, Pages 333–338. DOI: dx.doi.org/10.14314/polimery.2014.333.
4. U. Stirna, **A. Fridrihsone-Girone**, V. Yakushin, D. Vilsone. Processing and properties of spray-applied, 100% solids polyurethane coatings from rapeseed oil polyols. Journal of Coatings Technology Research. 11 (3) 409–420, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11998-013-9545-8>.
5. **Fridrihsone, A.**, Stirna, U., Lazdiņa, B., Misāne, M., Vilsone, Dz. Characterization of Polyurethane Networks Structure and Properties Based on Rapeseed Oil Derived Polyol. European Polymer Journal 49 (2013) 1204–1214 pp. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2013.03.012>.

Pētījuma rezultāti ir prezentēti starptautiskās zinātniskās konferencēs.

1. A. Fridrihsone, F. Romagnoli, U. Cabulis. Life Cycle Assessment of Polyurethane Materials from Biobased Feedstock. Sixth International Conference on Natural Polymers (ICNP 2018), 7.–9. decembris, 2018. gads, Indija. Konferences tēzes SIL 15, 49. lpp (mutiska prezentācija).
2. A. Fridrihsone, F. Romagnoli, U. Cabulis. Rapeseed Oil as a Feedstock for Polyols and Polyurethane Materials from the Life Cycle Perspective. SETAC Europe 24th LCA Symposium, 24.–26. septembris 2018. gads, Austrija. Konferences tēzes MO002, 22. lpp. (stenda referāts).
3. Anda Fridrihsone, Francesco Romagnoli, Vladimirs Kirsanovs. Rapeseed oil based polyols from the perspective of environmental footprint. International Conference on Bio-based Polymers and Composites 2018 (BiPoCo), 2.–6. septembris, 2018. gads, Ungārija. Konferences tēzes. P40, 292. lpp. (stenda referāts).
4. Anda Fridrihsone, UgisCabulis, Francesco Romagnoli. Life cycle assessment of rapeseed oil based polyols for biobased polyurethane. The 6th International Conference on Biobased and Biodegradable Polymers (BIOPOL-2017). 11.–13. septembris 2017. gads, Beļģija, Konferences tēzes zibatmiņā (P. 1–47) (stenda referāts).
5. Urethanes Technology international. Februāris/marts 2014. Vol. 31, Nr. 1.
6. Fridrihsone-Girone, A. Preliminary LCA of Rapeseed oil Polyols synthesized by transesterification with triethanolamine. 5th Workshop Green Chemistry and Nanotechnologies in Polymer Chemistry, ECLIPSE Workshop, BIOPURFIL Workshop. 9.–11. jūlijs, 2014. gads, Spānija. Konferences tēzes zibatmiņā (P-19) (stenda referāts).
7. Fridrihsone-Girone, A., Stirna, U. Post curing kinetics of VOC-free, 100 % solids, spray-applied polyurethane coatings from rapeseed oil polyols. 4th Workshop of Green chemistry and nanotechnologies in Polymer Chemistry. 4.–6. septembris, 2013. gads, Itālija. Konferences tēzes 23.–24. lpp. (mutiska prezentācija).
8. A. Fridrihsone, U. Stirna, L. Deme, V. Zeltins, B. Lazdina, V. Yakushin. Accelerated aging, chemical resistance and hydrolytic stability of polyurethane coatings based on rapeseed oil polyol. In: Book of abstracts Coatings Science International 2013, 24.–28. jūnijs, 2013. gads, Nīderlande, Konferences tēzes 214.–217. lpp. (stenda referāts).
9. Zeltins, V., Deme, L., Lazdina, B., Fridrihsone, A., Yakushin, V., Stirna, U. Degradation study of rapeseed oil bases polyurethane coatings. Baltic Polymer Symposium 2012, Programme and Proceedings, 19.–22. septembris, 2012. gads, Latvija. Konferences tēzes 103. lpp. (stenda referāts).
10. Fridrihsone, A., Stirna, U., Zeltins, V., Mechanical and thermal properties of polyurethanes from biobased rapeseed oil polyols. In: Baltic Polymer Symposium 2012, Programme and Proceedings, 19.–22. septembris, 2012. gads, Latvija, Konferences tēzes 105. lpp. (stenda referāts).
11. Fridrihsone, A., Stirna, U. Biobased rapeseed oil polyols and their use in polyurethane coatings. 3rd Workshop Green Chemistry and Nanotechnologies in Polymer Chemistry,

24.–26. septembris, 2012. gads, Polija, Konferences tēzes 33.–34. lpp. (mutiska prezentācija).

1. LITERATŪRAS ANALĪZES KOPSAVILKUMS

1.1. Ilgtspējīga attīstība un ar to saistītās problēmas

Ilgtspējīgas attīstības jēdziens pirmo reizi tika minēts Pasaules vides un attīstības komisijas 1987. gada ziņojumā “Mūsu kopīgā nākotne” (plašāk pazīstams kā Bruntlandes ziņojums) [7], kurā tika sniegta šāda ilgtspējīgas attīstības definīcija: “Ilgtspējīga attīstība ir attīstība, kas apmierina pašreizējās vajadzības, neapdraudot nākotnes paaudžu spēju nodrošināt savas vajadzības”. Ilgtspējīgas attīstības mērķis ir atrast līdzsvaru un harmoniju starp vides ilgtspēju, ekonomikas ilgtspēju un sociālpolitisko ilgtspēju [8].

Pēdējās desmitgadēs ir bijušas vairākas pasaules mēroga iniciatīvas, kas vērstas uz to, lai pilnveidotu dažādus ilgtspējas attīstības jautājuma aspektus. 2015. gada ANO ilgtspējīgas attīstības samitā pasaules valstu vadītāji pieņēma jaunāko atskaites iniciatīvu “Pārveidosim mūsu pasauli: ilgtspējīgas attīstības programma 2030. gadam”, kurā ietverts 17 ilgtspējīgas attīstības mērķu kopums, kas vērsts uz nabadzības izskaušanu, nevienlīdzības apkarošanu un klimata pārmaiņu ierobežošanu līdz 2030. gadam. ANO programmas pamatu, lai sasniegtu šos 17 definētos mērķus, veido tas pats princips, kas ietverts Bruntlandes ziņojumā, un tas tiek definēts šādi: “Tie ir integrēti un nedalāmi, un tajos tiek panākts līdzsvars visās trīs ilgtspējīgas attīstības dimensijās – ekonomiskajā, sociālajā un vides dimensijā” [4].

Siltumnīcefekta gāzu emisijas un globālās klimata pārmaiņas neapšaubāmi ir vieni no centrālajiem ilgtspējas problēmu aspektiem, ar kuriem cilvēcei ir jāsaskaras mūsdienās. Mūsdienu sabiedrība ir arī pilnībā atkarīga no naftas produktu materiāla – plastmasas. Plastmasas aprites cikls veicina globālās vides problēmu saasināšanos, jo tajā tiek izmantoti fosilie resursi [9]. Saskaņā ar Lielbritānijas Plastmasas federācijas aplēsēm Eiropā 4–6 % naftas un dabasgāzes tiek izmantots plastmasas ražošanā, savukārt 87 % – transportam, elektroenerģijai un apkurei (līdz ar to tā rada lielāko oglekļa emisiju apjomu) [10].

1.2. Atjaunojamajos resursos balstīta Eiropa

Pēdējās desmitgadēs, jo īpaši pēdējos 10–15 gados, ES tiecas kļūt inovatīvāka, resursu ziņā efektīvāka, konkurētspējīgāka un ilgtspējīgāka, virzoties prom no naftas produktos balstītas sabiedrības. ES ir apņēmusies pilna kļūt par līderi attiecībā uz globālās Ilgtspējīgas attīstības programmas 2030. gadam ieviešanu [11]. Latvija ir viena no ES dalībvalstīm, kurai valstiskā līmenī ir izstrādāta īpaša bioekonomikas stratēģija. 2017. gadā tika publicēta LIBRA 2030. Divi no galvenajiem LIBRA ietvertajiem mērķiem ir bioekonomikas produktu pievienotās vērtības palielināšana un bioekonomikas eksporta produkcijas vērtības palielināšana. Trešais stratēģijā ietvertais mērķis ir veicināt un saglabāt nodarbinātību bioekonomikas nozarēs līdz 2030. gadam [1].

Viena no uz bioekonomiku attiecināmajām nozarēm ir saražoto atjaunojamo bioloģisko resursu pārvēršana ķīmiskos produktos; tas ir svarīgs aspekts ilgtspējīgi pamatotas pārejas procesā, [3] un ar to tiek definēta transformācija uz videi draudzīgāku darbību [12]. Augu eļļu izmantošana polimēru un citu ķīmisko vielu ražošanā labi iekļaujas bioekonomikas konceptā.

Augu eļļas tiek uzskatītas par vienu no svarīgākajām atjaunojamo izejvielu klasēm polimēru ražošanā, jo tām ir plašas ķīmiskās pārveides un modifikāciju iespējas, tās ir plaši pieejamas, tām ir zema cena, un tās vienlaikus ir arī akceptējama alternatīva ķīmijas industrijā. Modificējot augu eļļas, iespējams iegūt lielu monomēru un polimēru daudzveidību [13].

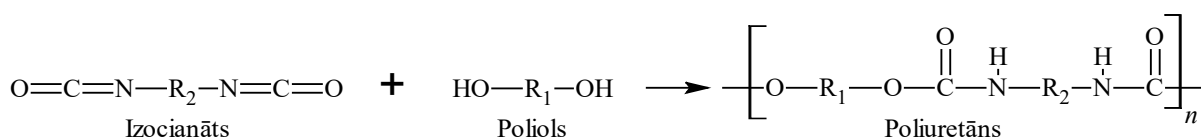
Saskaņā ar Eiropas Ķīmijas rūpniecības padomes 2017. gadā publicēto ilgtspējības ziņojumu, atjaunojamie energoresursi veido 10 % (7,8 milj. tonnu) no kopējā organisko izejvielu daudzuma (kas izmantots tikai kā izejvielas); augu eļļas veido 18 % (1,42 milj. tonnu) no kopējā atjaunojamo energoresursu daudzuma [14].

Rapsis ir pasaulē plaši audzēta kultūra galvenokārt tā sēklu dēļ, kas satur lielu daudzumu eļļas (>40 %). ES-28 dalībvalstis, Kanāda un Ķīna ir lielākie rapšu sēklu audzētāji pasaulē. Rapsis kā eļļas ieguves kultūraugs plaši tiek audzēts arī Latvijā. Rapša audzēšanai izmantotās lauksaimniecības zemes platība kopš 2000. gada ir ievērojami palielinājusies [15].

1.3. Poliuretāns un ilgtspējība

Polimēru nozare joprojām ir pakļauta spiedienam kļūt ilgtspējīgākai – atrast inovatīvus risinājumus vides un ilgtspējas jomā [16].

Par poliuretānu sauc materiālu, kas polimēra galvenajā ķēdē satur uretāna grupas (1.1. att.). Poliuretāni tiek sintezēti diizocianāta vai poliizocianāta, kas satur izocianāta grupas ($-N=C=O$), reakcijā ar poliolu, kas satur ($-OH$ grupas) [17].



1.1. att. Poliuretāna materiālu iegūšanas ķīmiskā reakcija [18].

Rūpīgi izvēloties dažādus poliolus un izocianātus (un citas komponentes), iespējams izstrādāt dažāda veida PU materiālus ar konkrētām īpašībām, kas piemēroti plašam lietojumam, piemēram, putuplastu, krāsu, termoplastisku materiālu, šķiedru un adhezīvu ražošanai, kas izmantojami dažādās nozarēs (autobiļu rūpniecībā, celtniecībā, elektroiekārtu ražošanā, mēbeļu rūpniecībā, kuģniecībā, medicīnā u. c.); poliuretāna materiālu lietojuma loks ir ārkārtīgi plašs [18].

Katru gadu tiek saražots miljoniem tonnu PU plaša mēroga lietojumam, tas ir sestais visvairāk izmantotais polimērs pasaulē [19]. 2016. gadā PU veidoja 7,5 % no Eiropā izmantotā plastmasas apjoma [20]. 2018. gadā tika lēsts, ka no biopolioliem ražoti PU materiāli veido apmēram pusi no kopējā biopolimēru ražošanas apjoma [21].

Lai PU materiālu ražošanā varētu izmantot dabīgās izcelsmes eļļas, kas pilnībā vai daļēji aizstātu naftas ķīmijas poliolus, tās ir ķīmiski jāpārveido, to struktūrā ievadot $-OH$ grupas. Pētījumos par atjaunojamām izejvielām, ko iespējams izmantot PU materiālu ražošanā, ir pētītas dažādas dabīgas izcelsmes eļļas, piemēram, rīcineļļa [22], sojas pupiņu eļļa [23], palmu eļļa [24], jatrofā (angļu val. *jatropha*) eļļa [25], saulespuķu sēklu eļļa [26], rapšu eļļa [27] un citas (linsēklu eļļa, kokosriekstu eļļa [19]). Izstrādātajiem polioliem ir ļoti atšķirīgas īpašības, tās ir atkarīgas gan no izvēlētajām izejvielām un tās taukskābju sastāva, gan arī no sintēzes

procesam izvēlētās ķīmiskās reakcijas. Piemēram, viskozitāte 25 °C temperatūrā var būt robežās no 150 mPa·s līdz 35 000 mPa·s, savukārt hidroksilskaitlis var būt robežās no 71 mg KOH/g līdz 465 mg KOH/g [19], [28]–[31]. Pastāv dažādi procesi, kuru rezultātā augu eļļas iespējams pārvērst poliolos, tostarp epoksidēšana un sekojoša gredzena atvēršana, pāresterificēšana, amidēšana, hidroformilēšana, ozonēšana un citi [29].

Lai jauns produkts no atjaunojamām izejvielām varētu sekmīgi ienākt tirgū, svarīga nozīme ir ne tikai galaprodukta kvalitātei, bet arī citiem faktoriem, tostarp biomasas pieejamībai, apjomam un cenai. Galvenie eļļas ieguvē izmantotie kultūraugi atšķiras atkarībā no reģiona, un to ietekmē reģiona ģeogrāfiskais novietojums un šī reģiona lauksaimniecības kultūras (ASV dominē sojas, Eiropā – rapšu sēklu, Āzijā – palmu eļļas ražošana) [32]. Visas šīs eļļas ir īpaši piemērotas tieši liela apjoma rūpniecības produkcijai [28].

NOPs spēj nepastarpināti aizvietot naftas ķīmijas analogus, līdz ar to nav nepieciešams pielāgot vai radīt jaunus pārstrādes nosacījumus, un tas ir būtisks priekšnoteikums to ātrākai ienākšanai nozarē [33]. Neviens ekonomiskais modelis nespēs aizstāt iepriekšējo, ja tas nebūs vismaz tikpat efektīvs kā līdzšinējais. Biopolioļi stabili pozīciju tirgū spēs ieņemt tikai tad, ja tie spēs nodrošināt tādu pašu vai labāku veiktspēju nekā esošie naftas ķīmijas analogi un ja to ekoloģiskie raksturlielumi, salīdzinot ar to naftas ķīmijas analogiem, būs labāki. Lai gan 2018. gadā no *NOPs* ražoti PU materiāli bija vairāk nekā 50 % no kopējā specializētā biopolimēru ražošanas apjoma, par to ekoloģiskajiem raksturlielumiem joprojām ir pieejams ļoti maz informācijas.

Vairumā gadījumu PU materiālos, kas daļēji ražoti no ilgtspējīgām izejvielām, izmanto no dabīgajām eļļām iegūtus *NOPs*, jo tikai šīs tehnoloģijas ir pietiekami komerciāli attīstītas un pilnveidotas. Tomēr joprojām ir vērojams *NOPs* ekoloģisko raksturlielumu trūkums. Ir neliels skaits publikāciju par biopolioļu ekoloģiskajiem raksturlielumiem, tomēr kā izejvielas ir pētītas tikai sojas pupiņu eļļa un/vai rīcineļļa [34], [35] un palmu eļļa [36]. ACN ir nepieciešams, lai pilnībā izprastu no atjaunojamām izejvielām ražotu materiālu priekšrocības un ar tiem saistītos nepieciešamos kompromisus [37]. Pastāv vairāki iespējamie izejvielu veidi *NOPs* izstrādei, kā arī dažādi ķīmiskie procesi, tādēļ ir svarīgi veikt novērtējumu katram gadījumam atsevišķi. Izmantojot ACN metodi un tās visaptverošo pieeju, iespējams labāk izvērtēt un izprast ar atjaunojamo izejvielu izmantošanu saistītos vides ilgtspējas aspektus un tās kopējo ietekmi uz vidi, kā arī vājās vietas un potenciālos ieguvumus.

2. METODIKA

Promocijas darbs izstrādāts saskaņā ar ACN *ISO 14040* un *ISO 14044* standartiem [6], [38]. Tālāk tekstā īsumā aprakstītas promocijas darbā izmantotās aprites cikla ietekmes novērtējuma (ACIN) metodes.

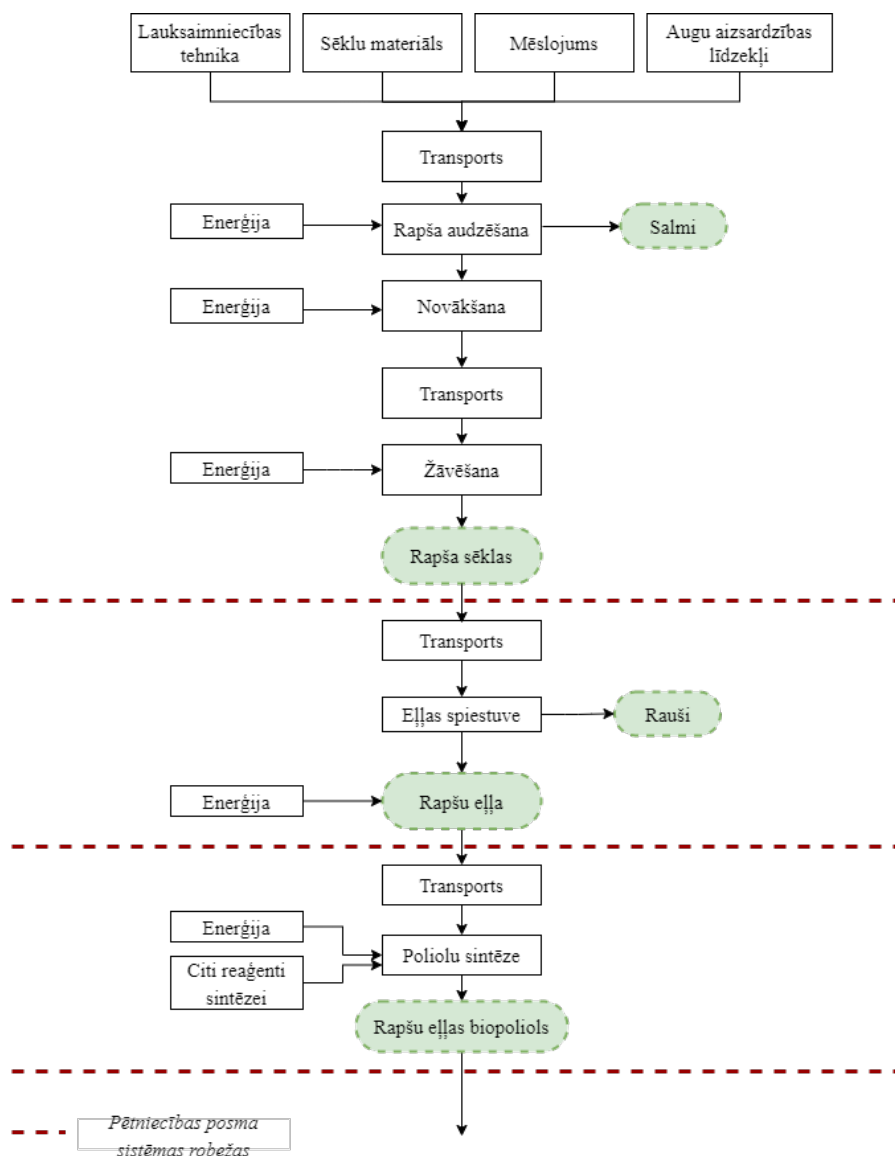
Kumulatīvais enerģijas pieprasījums (*CED*, angļu val. *Cumulative Energy Demand*) – ACIN metode, kas nosaka tiešo un netiešo enerģijas patēriņu MJ vienībās visā produkta vai procesa dzīves ciklā [39]. *CED* ņem vērā gan atjaunojamās, gan neatjaunojamās primārās enerģijas izmantošanu un enerģijas plūsmas, kas paredzētas gan enerģijas, gan materiālu vajadzībām [40]. Darbā tika izmantota *CED VI.11* metode.

ReCiPe metode – visjaunākā un harmonizētākā indikatoru pieeja [41]. Tika izmantota *ReCiPe* ietekmes novērtēšanas metodes *1.03* versija, hierarhista (H) perspektīva ar globālās normalizācijas koeficientiem 2010. pārskata gadam, lai identificētu vides “karstos punktus” un salīdzinātu ekoloģiskos raksturlielumus.

Programmatūra un datubāzes. ACN modeļa izveidei un aprēķinu veikšanai tika izmantota *Pré Consultants* izstrādātā ACN programmatūra *SimaPro 9.0* un ACI datubāze *ecoinvent v3.5* (*Cut-off* sistēmas modelis).

3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA

Promocijas darba pētījuma dizains un tā posmu vizuālais attēlojums ir dots 3.1. attēlā.



3.1. att. Pētījuma dizains un poliolu, kas iegūti no atjaunojamām izejvielām, sistēmas robežas.

3.1. ACI rapša audzēšanai

3.1.1. Mērķa un darbības jomas definēšana, funkcionālā vienība, sistēmas robežas

Pētījuma mērķis ir veikt ACI rapša (gan ziemas, gan vasaras) sēklu ražošanas posmam “no šūpuļa līdz vārtiem” Ziemeļeiropas valstī Latvijā. Par funkcionālo vienību (FV) tika izvēlēta 1 t rapša sēklu. Rapsis tika audzēts graudaugu un eļļas augu ražošanas uzņēmumā, kas atrodas Zemgales reģionā, Zemgales līdzenuma centrālajā daļā, kur ir liels aramzemes īpatsvars [77].

3.1.2. Rapša audzēšanas un datu sniedzēja vispārējs apraksts

Lauksaimniecības uzņēmums, kas sniedza datus, ir viens no lielākajiem augkopības uzņēmumiem Latvijā. 2015. gadā uzņēmumam bija 5742 ha zemes, no kuriem 18,9 % izmantoja ziemas rapša audzēšanai. Intervētais Latvijas uzņēmums nodarbojas ar intensīvo lauksaimniecību. Mākslīgā apūdeņošana netiek izmantota [42]. Tika pieņemts, ka tiešas zemes izmantojuma izmaiņas nav notikušas, jo pēdējo 20 gadu laikā neviens no zemes izmantojuma veidiem nav pārveidots kādā citā veidā [43]. Netiešas zemes izmantojuma izmaiņu (angļu val. *indirect land use change, iLUC*) novērtējums bija ārpus šī pētījuma jomas. Ziemas rapša vidējā ražība laika posmā no 2008. līdz 2016. gadam bija 3,5 t/ha. Vasaras rapša vidējā ražība laika posmā no 2008. līdz 2014. gadam bija 2,5 t/ha. Uzņēmums īsteno lauksaimniecības praksi, kurā atlikušo saražoto biomasu atstāj uz lauka un iestrādā atpakaļ augsnē. Līdz ar to 100 % no potenciālās ietekmes uz vidi tiek piešķirts eļļas sēklām [42].

3.1.3. Kopsavilkums par ACI rapša sēklu audzēšanas posmu

No lauksaimniecības uzņēmuma tika iegūti ACI dati par priekšplāna procesiem (ražīgums, augu aizsardzības līdzekļu lietojums, mēslošanas līdzekļi, sēklas materiāls, izmantotā lauksaimniecības tehnika u. c.). Dati par mēslojuma, augu aizsardzības līdzekļu un sēklu materiāla piegādes ķēdi no to ražošanas līdz lauksaimniecības uzņēmuma noliktavai tika iegūti no izplatītājiem Latvijā. ACI kopsavilkums ir apkopots 3.1. tabulā.

3.1. tabula

Inventarizācija ziemas un vasaras rapša ražošanai, FV – 1 t rapša sēklu

Plūsma	Mērvienība	Ziemas	Vasaras	Skaidrojums
Ražīgums	t/ha	3,5	2,5	
Ievadplūsma				
Sēklu materiāls	kg/t	1,4	1,6	Katru gadu importē jaunas hibrīda sēklas
Mēslojuma devas				
P ₂ O ₅	kg P ₂ O ₅ /t	17,4	24,3	Modelēts kā diamonija fosfāts
K ₂ O	kg K ₂ O/t	36,9	51,7	Modelēts kā kālija hlorīds
Slāpeklis, kopā	kg N/t	63,2	74,8	
(6,9 % kā NPKS 4-16-32-2S)	kg N/t	4,3	–	Slāpeklis NPKS mēslojumā modelēts kā amonija sulfāts
(46,7 % kā amonija nitrāts)	kg N/t	29,5	–	
(17,1 % kā amonija sulfāts)	kg N/t	10,8	–	
(29,4 % kā KAS N25+S3)	kg N/t	18,6	–	Modelēts kā 14,5 kg urīnvielas amonija nitrāts ar N saturu 32 %*
(8,1 % kā NPKS 4-16-32-2S)		–	6,1	
(40,5 % kā amonija nitrāts)		–	30,3	
(18,0 % kā amonija sulfāts)		–	13,4	
(33,4 % kā KAS N25+S3)		–	25,0	19,5 kg urīnvielas amonija nitrāta*

Plūsma	Mērvienība	Ziemas	Vasaras	Skaidrojums
Augu aizsardzības līdzekļi				Apkopoti atbilstoši to ķīmiskajai klasei kā <i>ecoinvent v3.5</i> [44]
Acetamīda-anilīda savienojumi	kg/t	0,24	0,33	
Pesticīdi, nespecifiski	kg/t	0,094	0,13	
Difenilētera savienojumi	kg/t	0,029	–	Tikai ziemas rapsim
Piretroīdu savienojumi	kg/t	0,0043	0,0060	
Cikliskie N-savienojumi (triazols)	kg/t	0,032	0,044	
Bipiridīna savienojumi	kg/t	–	0,15	Tikai vasaras rapsim
Sēklu žāvēšana	MJ/t	189,2	189,2	Nodrošina ar dabasgāzi
Dīzeļdegviela lauksaimniecības tehnikai				
Aršana	L/t	–	10,8	
Diskošana	L/t	2,1	3,0	
Šļūkšana	L/t	–	3,4	
Sēšana	L/t	4,6	3,8	
Minerālmēslu izkliede	L/t	0,8	0,9	
Augu aizsardzības līdzekļu izkliede	L/t	1,3	1,8	
Novākšana	L/t	5,7	8,0	
Transports				
Kravas automašīna 7,5–16 t	tkm	0,1	0,2	
Kravas automašīna 16–32 t	tkm	146,7	183,7	
Kravas kuģis	tkm	1,1	3,0	
Kravas automašīna 3,5–7,5 t	tkm	0,1	0,1	
Traktors	tkm	4,8	6,1	
Emisijas				
Ūdenī				
Fosfors	kg P/t	0,04	0,13	Izskalošanās 2,9 % no fosfora pārpalikuma [45]
Nitrāti	kgNO ₃ /t	83,97	99,38	<i>IPCC 2006 Tier 1</i> [46]
Augu aizsardzības līdzekļi				0,50 % no devas
Metazahloris	kg/t	0,0012	0,0017	
Kvinmerakss	kg/t	0,00030	0,00042	
Metkonazols	kg/t	0,000090	0,00013	Modelēts kā epoksikanazols
λ cihalotrīns	kg/t	0,000014	0,000020	
Ciprokonazols	kg/t	0,000069	0,00096	
Azoksistrobīns	kg/t	0,00017	0,00024	
Deltametrīns	kg/t	0,0000071	0,000010	
Propakvizatops	kg/t	0,00014	–	Tikai ziemas rapsim
Dikvāta dibromīds	kg/t	–	0,00075	Tikai vasaras rapsim
Gaisā				
Dislāpēkļa oksīds, kopējais	kg N ₂ O/t	1,73	1,88	<i>GNOC***</i> [47]
Tiešās N ₂ O emisijas no minerālmēsliem	kg N ₂ O/t	0,97	1,07	
Netiešās N ₂ O emisijas no minerālmēsliem noteces un izskalošanās dēļ	kg N ₂ O/t	0,22	0,26	

Plūsma	Mērvienība	Ziemas	Vasaras	Skaidrojums
Netiešās N ₂ O emisijas no atmosfēras nokrišņiem iztvaikojušā N daudzuma dēļ	kg N ₂ O/t	0,10	0,12	
Tiešās N ₂ O emisijas no N augkopības atlikumos	kg N ₂ O/t	0,036	0,34	
Netiešās N ₂ O emisijas no izskaloātā/noplūdušā N augkopības atlikumos	kg N ₂ O/t	0,08	0,08	
Augu aizsardzības līdzekļi				10 % no devas
Metazahlors	kg/t	0,012	0,017	
Kvinmeraks	kg/t	0,00059	0,00083	
Metkonazols	kg/t	0,00018	0,00025	Modelēts kā epoksikanazols
λ cihalotrīns	kg/t	0,000029	0,000040	
Ciprokonazols	kg/t	0,00069	0,00096	
Azoksistrobīns	kg/t	0,00034	0,00048	
Deltametrīns	kg/t	0,000014	0,000020	
Propakvizatops	kg/t	0,00029	–	Tikai ziemas rapsim
Dikvāta dibromīds	kg/t	–	0,23	Tikai vasaras rapsim
Oglekļa dioksīds, fosils	kgCO ₂ /t	7,97	10,73	
Slāpekļa oksīdi NO _x	kg NO _x /t	0,36	0,40	N ₂ O reizināts ar 0,21 [48]
Amonjaks	kg NH ₃ /t	2,69	3,35	Konstants emisijas faktors konkrētai mēslojuma grupai [48]
(6,9 % k NPKS 4-16-32-2S)	kg NH ₃ / t	0,17	–	4 %
(46,7 % kā amonija sulfāts)	kg NH ₃ / t	0,59	–	2 %
(17,1 % kā amonija sulfāts)	kg NH ₃ / t	0,86	–	8 %
(29,4 % kā KAS N25+S3)	kg NH ₃ / t	1,06	–	5,7 %
(6,9 % kā NPKS 4-16-32-2S)	kg NH ₃ / t	–	0,24	4 %
(46,7 % kā amonija sulfāts)	kg NH ₃ / t	–	0,61	2 %
(17,1 % kā amonija sulfāts)	kg NH ₃ / t	–	1,08	8 %
(29,4 % kā KAS N25+S3)	kg NH ₃ / t	–	1,43	5,7 %
Ūdens	kg H ₂ O/t	45,45	45,45	Sēklu žāvēšanā iztvaicētais ūdens daudzums aprēķināts kā [44] atsaucē
Augsnē				
Augu aizsardzības līdzekļi				50 % no devas
Metazahlors	kg/t	0,012	0,017	
Kvinmeraks	kg/t	0,030	0,042	
Metkonazols	kg/t	0,0090	0,013	Modelēts kā epoksikanazols
λ cihalotrīns	kg/t	0,0014	0,0020	
Ciprokonazols	kg/t	0,0069	0,010	
Azoksistrobīns	kg/t	0,017	0,024	
Deltametrīns	kg/t	0,00071	0,001	
Propakvizatops	kg/t	0,014	–	Tikai ziemas rapsim
Dikvāta dibromīds	kg/t	–	0,075	Tikai vasaras rapsim

Plūsma	Mērvienība	Ziemas	Vasaras	Skaidrojums
* Modelēts kā urīnvielas amonija nitrāts ar N saturu 32 %. N saturs pārrēķināts, lai atbilstu N saturam mēslojuma līdzeklī KAS N25+S3.				
** Nav <i>ecoinvent</i> v3.5 datubāzē. Modelēts kā epoksikanazols [49].				
*** <i>Global Nitrous Oxide Calculator</i> .				

Rapšu audzēšanā lieto slāpekļa, kālija, sēra un fosfora minerālmēslojumu. Gada deva var mainīties $\pm 10\%$ atkarībā no dažādiem faktoriem. Uzņēmums neņem vērā priekšauga barības vielas, un standarta mēslošanas shēma nav pielāgota šim faktoram. Kopējais slāpekļa, fosfora un kālija minerālmēslojuma daudzums ziemas rapsim sasniedz 117,5 kg/t, savukārt vasaras rapsim tas palielinās līdz 150,8 kg/t. Kopējais izlietotā slāpekļa mēslojuma daudzums ziemas un vasaras rapsim sasniedz attiecīgi 63,2 kg N/t un 74,8 kg N/t. Slāpekļa mēslojums tiek nodrošināts ar četriem dažādiem mēslošanas līdzekļiem. Padziļinātie ACI dati par mēslošanas līdzekļiem ir jāsālāgo ar procesiem un materiāliem, kas ir pieejami *ecoinvent* v3.5. datubāzē. Mēslošanas līdzekļu modelēšanai tika izmantoti Valsts augu aizsardzības dienesta dati par saražoto un importēto minerālmēslojumu apjomu Latvijā [50].

Nozares pārstāvji pieprasa rapša žāvēšanu, lai izvairītos no sēnīšu un ērcu radītiem bojājumiem sēklu uzglabāšanas laikā [51]. Rapša sēklu mitrums katru gadu ir atšķirīgs atkarībā no nokrišņu daudzuma attiecīgajā gadā, līdz ar to žāvēšanai nepieciešamais gāzes daudzums būtiski atšķiras. Rapša sēklu mitruma saturs pēc ražas novākšanas vidēji ir 12 %. Rapsi žāvē, līdz mitruma saturs ir 8 % [42].

ACI netika identificētas dažiem rapšu audzēšanā izmantotajiem mēslošanas līdzekļiem (piemēram, sēram un mikroelementiem), tāpēc tie netika iekļauti rapša ACI (3.1. tabula). Smago metālu emisijas no mēslošanas līdzekļiem netika iekļautas, jo citos pētījumos ziņots, ka smago metālu ietekme ir tikai neliela daļa (0,065 %) no kopējās ekotoksicitātes [52]. Detalizētus datus par kapitālieguldījumiem un cilvēku darbu iegūt nebija iespējams, tāpēc tie netika iekļauti rapša ACI.

3.1.4. ACIN rapša audzēšanas posmam

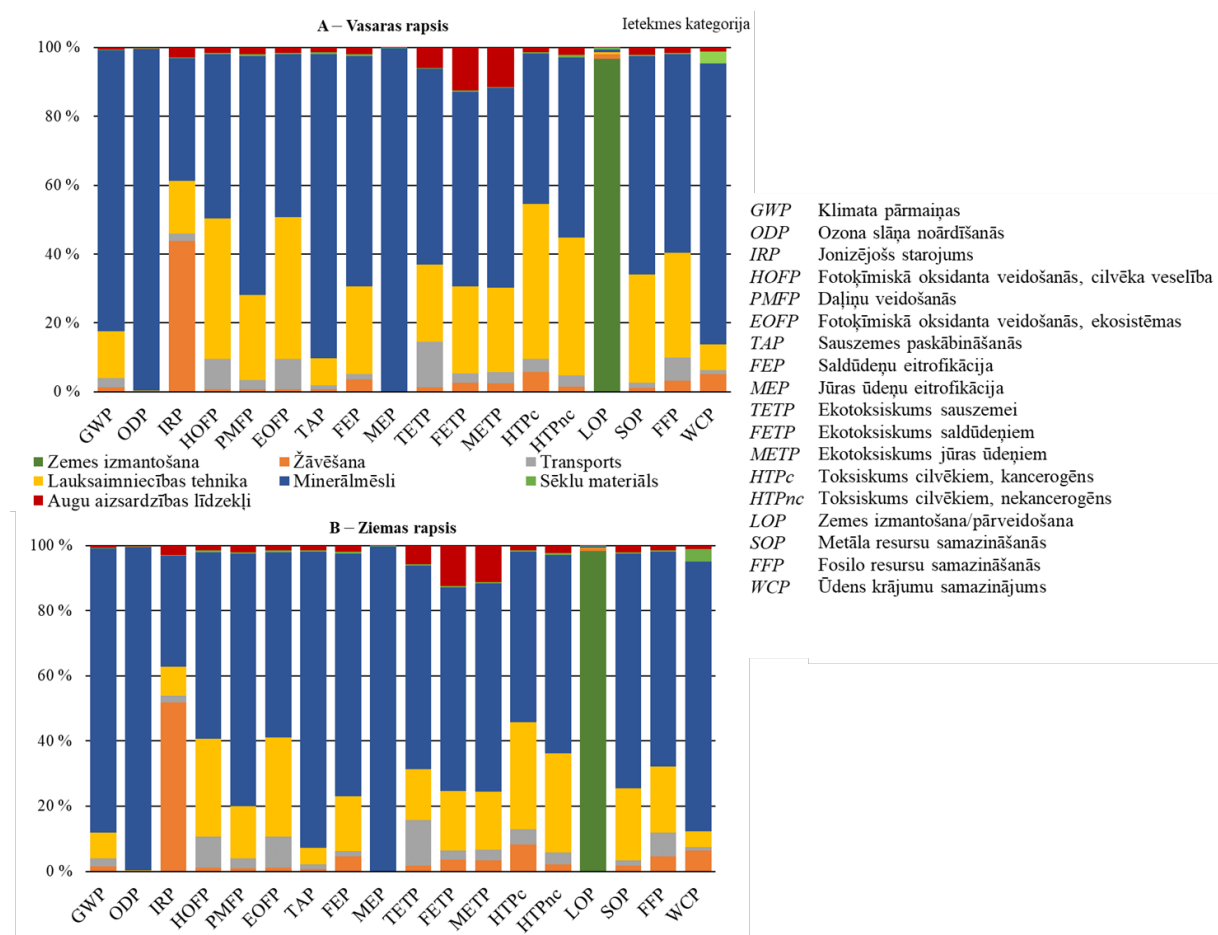
CED 1 t ziemas un vasaras rapša audzēšanai Latvijā ir 6450 un 8809 MJ (22,6 GJ/ha un 22,0 GJ/ha). Vispārzināms, ka fosilo resursu izsīkumu un globālo sasilšanu galvenokārt ietekmē fosilo resursu izmantošana enerģijas un materiālu ražošanā [53]. Neatjaunojamās kumulatīvās enerģijas pieprasījums (*NRCED*) apzīmē kopējo izmantoto fosilo un kodolenerģiju. *NRCED* ziemas un vasaras rapsim veido 94 % no kopējā *CED*, no kuriem lielākā daļa ir fosilie energoresursi.

Rezultātu salīdzinājums liecina, ka *CED* vasaras rapša audzēšanai ir par 36 % lielāks nekā ziemas rapsim, kas izskaidrojams ar zemāku vasaras rapša ražīgumu un lielāku resursu patēriņu audzēšanas posmā. Ziemas rapša kultivēšanā minerālmēsli veido 61,8 % no kopējā *CED*, kam sekoja lauksaimniecības traktortehnikas izmantošana (19,3 %), žāvēšana (9,6 %) un transports (6,6 %). Salīdzinoši, vasaras rapsim minerālmēslojuma izmantošana veido aptuveni 54,8 %, lauksaimniecības traktortehnikas izmantošana – 29,3 %.

Ietekmes uz vidi novērtējumā *ReCiPe* metodē ir trīs galapunkti: “Kaitējums cilvēku veselībai”, “Kaitējums ekosistēmas daudzveidībai” un “Kaitējums resursu pieejamībai”.

Galapunktu ietekmes rezultāts ir izteikts kā *ReCiPe* rezultāts normalizētos un svērtos milipunktos (mPt). Galapunktu līmenī vislielāko ietekmi no kopējā rezultātā veido kategorija “Kaitējums cilvēku veselībai”, kas ziemas un vasaras rapsim attiecīgi veidoja 67,3 % un 78,9 % no kopējās ietekmes. “Kaitējums ekosistēmas daudzveidībai” bija nākamā galapunktu ietekmes kategorija, kur attiecīgi ziemas un vasaras rapša ietekme bija 32,2 % un 20,4 %. Mazāk nekā 1 % veido ietekmes kategorija “Kaitējums resursu pieejamībai”.

ReCiPe metodes viduspunktu līmenī ietekme uz vidi tiek pārvērsta 18 vides problēmjaudājumos (viduspunktu indikatoros). Lauksaimniecības ievadplūsmu relatīvais īpatsvars vasaras un ziemas rapša audzēšanas ietekmē uz vidi ir parādīts 3.2. attēlā.



3.2. att. Lauksaimniecības ievadplūsmu relatīvais ieguldījums vasaras un ziemas rapša audzēšanā (indikatoru abreviatūra saglabāta ar oriģinālvalodā lietoto).

Gan ziemas, gan vasaras rapsim visās ietekmes kategorijās, izņemot zemes izmantošanā/pārveidošanā un jonizējošajā starojumā, visvairāk vidi ietekmē minerālmēslojuma lietošana. Salīdzinoši liela ietekme ir arī lauksaimniecības teknikai. Sēklu žāvēšana rada ievērojamu ietekmi uz vidi jonizējošā starojuma viduspunkta ietekmes kategorijā. Sēklas materiāla, augu aizsardzības līdzekļu un transporta ietekme ir neliela, un tā nepārsniedz 10 %.

Vislielākās SEG emisijas (galvenokārt dislāpekļa monoksīdu) *GWP* ietekmes kategorijā rada mēslošanas līdzekļu izmantošana – ziemas rapsim 87,5 %, vasaras rapsim – 81,5 % (3.1. tabula). Vasaras rapsim ir augstākas SEG emisijas galvenokārt lielākas minerālmēslo-

devas dēļ (74,8 kg N/t rapšu sēklu). Salīdzinoši 1 t ziemas rapša sēklu iegūšanai patērē 63,2 kg N. Otrā ievērojamāka ietekme attiecīgi 7,8 % un 13,7 % uz ziemas un vasaras rapsi ir lauksaimniecības tehnikai. Lauksaimniecības tehnikas ietekme ir lielāka vasaras rapša gadījumā, jo tā izaudzēšanā patērē divas reizes vairāk dīzeļdegvielas nekā ziemas rapsim. Transporta ietekme 14 ietekmes kategorijās ir mazāka par 5 %. Vienīgi kategorijā “Ekotoksiskums sauszemei” īpatsvars ir virs 10 %, kas skaidrojams ar transporta izmantošanu un saistītajām smago metālu emisijām. Kopējās SEG emisijas ir 1267,9 kg CO₂ ekv./t vasaras rapsim un 1064,1 kg CO₂ ekv./t ziemas rapsim. *Forleo et al.* izskatīja dažādus pētījumus par ACN rapsim un konstatēja, ka SEG emisijas ievērojami atšķiras [43]. SEG emisijas variē plašā amplitūdā un ir atkarīgas no dažādiem faktoriem, sākot no datiem ACI un līdz pat izvēlētajai ACIN metodei.

Rapšu audzēšanas jutīguma analīze. Vislielāko īpatsvaru gandrīz visās ietekmes kategorijās dod NPK minerālmēslu lietošana. Kā jau tika minēts, gada deva var mainīties ± 10 % atkarībā no dažādiem faktoriem. Lai novērtētu mēslošanas līdzekļu ietekmi uz viduspunkta ietekmes kategorijām, rezultāts tika pārrēķināts, mainot mēslojuma devu ± 10 % apmērā (3.2. tabula).

3.2. tabula

Jutīguma analīze ReCiPe viduspunkta kategorijām, mainot gada mēslojuma devu ± 10 %

	Viduspunkta ietekmes kategorija								
	<i>GWP</i>	<i>ODP</i>	<i>IRP</i>	<i>HOFP</i>	<i>PMFP</i>	<i>EOFP</i>	<i>TAP</i>	<i>FEP</i>	<i>MEP</i>
Izmaiņa, %	$\pm 8,7$	$\pm 9,9$	$\pm 3,4$	$\pm 5,7$	$\pm 7,8$	$\pm 5,7$	$\pm 9,1$	$\pm 7,5$	$\pm 10,0$
	<i>TETP</i>	<i>FETP</i>	<i>METP</i>	<i>HTPc</i>	<i>HTPnc</i>	<i>LOP</i>	<i>SOP</i>	<i>FFP</i>	<i>WCP</i>
Izmaiņa, %	$\pm 6,3$	$\pm 6,3$	$\pm 6,6$	$\pm 5,2$	$\pm 6,2$	0,0	$\pm 7,3$	$\pm 6,6$	$\pm 8,3$

Jutīguma analīze parādīja, ka rezultāti dažādās viduspunktu ietekmes kategorijās kopumā izmainās ± 10 % robežās. Vislielākā izmaiņa ir jūras ūdeņu eutrofikācijas ietekmes kategorijā, jo gandrīz 100 % no minerālmēslu lietošanas veicina ietekmi šajā kategorijā. Citas vairāk ietekmētās kategorijas ir *GWP*, ozona slāņa noārdīšanās un sauszemes paskābināšanās.

Rezultātus ietekmē arī ACIN metodes izvēle. *ReCiPe* metodes jutības analīzei izmanto *IPCC 2013 GWP* 100a un *EDP* (2018) metodes SEG emisiju salīdzināšanai. *ReCiPe* metode visaugstāko *GWP* uzrādīja rapšu kultivēšanai. Pārējo divu ACIN metožu aprēķinātais *GWP* bija identisks. Ziemas rapsim *GWP* ir par 7,9 % zemāks, bet vasaras rapsim – par 7,2 % zemāks, salīdzinot ar *ReCiPe* metodes iegūto rezultātu.

3.2. ACN rapšu eļļas ražošanas posmam

3.2.1. Mērķa un darbības jomas definēšana, funkcionālā vienība, sistēmas robežas

Par FV izvēlēta 1 t rapšu eļļas, kas ražota ar aukstās spiešanas metodi, pie ražotāja “vārtiem” (skat. 3.1. att. sistēmas robežām un attiecīgajiem vienības procesiem). Vietējais uzņēmums Zemgales reģionā, kas atrodas 34 km attālumā no rapšu ražošanas uzņēmuma, sniedza primāros datus par rapšu eļļas presēšanu ar aukstās spiešanas paņēmieni. Rapša sēklu presēšanai tika izmantota skrūves tipa prese. Uzņēmums katru gadu saražo ~4000 t rapšu eļļas. ACI dati par

1 t eļļas ražošanu no ziemas un vasaras rapša ir šādi: lai saražotu 1 t eļļas no ziemas rapša, ir nepieciešams 2778 kg sēklu, 126 kWh elektroenerģijas, 97,2 tkm transportēšana ar traktoru, kā blakusprodukts rodas 1722 kg raušu; 1 t rapšu eļļas saražošanai no vasaras rapša nepieciešami 3125 kg sēklu, 142 kWh elektroenerģijas, 109 tkm transportēšana ar traktoru, rodas 2063 kg raušu [54].

Eļļas spiešanas procesā rodas ne tikai pamatprodukts – rapšu eļļa, bet arī blakusprodukts – rapšu rauši. Pētījumā tika izmantotas četras dažādas sadalījuma metodes: sadalījums ar sistēmas paplašināšanu (SP), masas sadalījums (MS), enerģijas sadalījums (ES) un tirgus vērtības sadalījums (TVS) (sadalījuma metožu saīsinājumi tiks lietoti tabulās un attēlos, bet ne pamattekstā). Sadalījums ar sistēmas paplašināšanu (SP) tika izmantots, lai izvairītos no pētāmās produktu sistēmas un citu produktu sistēmas sadalījuma. Tika pieņemts, ka rapša raušu izmantošana lopbarībā kompensētu ekvivalentu sojas miltu daudzuma ražošanu lopbarībai (aizstāšanas koeficients – 1,4 kg rapša raušu, kas nepieciešami, lai nodrošinātu tādu pašu olbaltumvielu daudzumu kā 1 kg sojas miltu [55]). Tirgus vērtības (ekonomiskā) sadalījuma pamatā ir eļļas spiestuves uzņēmuma sniegtie dati par 2016. gadu: eļļas cena – 715 EUR/t, raušu cena – 235 EUR/t [54]. Tirgus vērtības sadalījumam tiks veikta jutīguma analīze, jo 2017. gadā rapšu eļļas cena, salīdzinot ar 2016. gadu, palielinājās par 17 %, savukārt 2018. gadā cena saruka līdz 2016. gada līmenim. Rapšu raušu cena nav mainījusies. Attiecībā uz enerģijas sadalījumu tika pieņemts, ka zemākais sadegšanas siltums eļļai ir 36,0 MJ/kg, raušiem – 18,4 MJ/kg [56].

3.2.2. ACIN rapšu eļļas ražošanas posmam

3.2.1. sadaļā minētais eļļas ražotājs galvenokārt ražo auksti spiestu rapšu eļļu no ziemas rapša, jo tam ir lielāks iznākums nekā vasaras rapsim [54]. Ja ziemas un vasaras rapsim piemēro sadalījumu ar sistēmas paplašināšanu, t. i., saražotie rapšu rauši aizvieto ekvivalentu sojas miltu daudzumu, tad gala *CED* vērtība ir negatīva –28 GJ/t saražotās eļļas. Sojas miltu ražošana globālā mērogā *ecoinvent v3.5* datubāzē tika izvēlēta par produktu, no kura ražošanas jāizvairās. Rezultāti rāda, ka, paplašinot sistēmu, būs mazāka iekļaušanās, kas saistīta ar primārā meža izciršanu, lai nodrošinātu aramzemi sojas pupu audzēšanai.

Citu sadales metožu gadījumā viszemāko *CED* uzrādīja masas sadalījums, kam sekoja enerģijas sadalījums, savukārt visaugstāko *CED* rezultātu deva tirgus vērtības sadalījuma metode.

Kopumā rapšu eļļai, kas ražota no ziemas rapša sēklām, ir zemāks vides pēdas nospiedums lielākas eļļas produktivitātes dēļ. To parāda *ReCiPe* metodes galapunktu ietekmes uz vidi novērtējums rapšu eļļai, kas ražota no ziemas un vasaras rapšu sēklām, izmantojot dažādas sadalījuma metodes eļļas spiestuves posmā. Ziemas rapša gadījumā, ja sistēmas paplašināšanas scenārijs tiek pieņemts kā pamatscenārijs ar kopējo ietekmi uz vidi 45 mPt apmērā, tad masas sadalījumam kopējā ietekme ir augstāka par 25,8 %, enerģijas sadalījumam – par 84,1 %, tirgus vērtības sadalei – par 119,1 %. Vasaras rapsim ar pamatscenāriju 60 mPt pieaugums masas, enerģijas un tirgus vērtības sadalījumam attiecīgi ir: 3,7 %, 56,4 % un 89,5 %.

ReCiPe viduspunkta ietekmes *GWP* kategorijas rezultāti bija līdzīgi *ReCiPe* galapunktu parametru tendencēm. SEG emisijas palielinājās šādi: sistēmas paplašināšanās < masas

sadalījums < enerģijas sadalījums < tirgus vērtības sadalījums. Tomēr, ražojot eļļu no ziemas rapša sēklām un izmantojot sistēmas paplašinājuma sadalījumu, iegūtais rezultāts ir negatīvs (SEG ietaupījums –100 kg CO₂ ekv.), un tas nozīmē, ka, aizstājot sojas miltus ar rapša raušiem kā barību lopiem un mājputniem, SEG emisijas samazinātos. Vasaras rapšu eļļas *GWP* vidējā vērtība bija 291,2 kg CO₂ ekv. Jebkuras izmaiņas eļļas un rapšu raušu iznākumā, kā arī jebkuras svārstības enerģijas saturā vai ekonomiskajā vērtībā, var būtiski ietekmēt rezultātu. Šī gadījuma izpēte apstiprina, ka sadalījuma metodes izvēlei ir būtiska ietekme uz eļļas spiestuves ACN rezultātiem.

Tika veikta jutīguma analīze tirgus vērtības sadalījumam. Par pamatscenāriju tika izvēlēti 2016. gada dati, taču cenu attiecības laika gaitā ir mainīgas. Jutīguma analīze tika veikta, mainot eļļas cenu $\pm 30\%$ diapazonā ar soli 10% . Kā tika minēts, sadalījuma izvēle ir viens no pretrunīgākajiem jautājumiem ACN. Saskaņā ar *ISO 14044* sadalījuma hierarhiju, tirgus vērtības sadalījums ir trešā izvēle [38], t. i., pēc *ISO* standarta vismazāk vēlamā sadalījuma metode. Tomēr citi autori apgalvo, ka tieši tirgus vērtības sadalījuma metode ir ieteicama lielākajā daļā ACN, kas saskaras ar daudzfunkcionalitāti [57]. Jutīguma analīzes rezultāti rāda, ka, paaugstinot ziemas rapša eļļas cenu par 30% , tās *ReCiPe* ekoindicators palielinās par 9% , vasaras rapšu eļļai – par 10% . Ja eļļas cena tiek samazināta par 30% , vides rādītājs ziemas un vasaras rapša eļļai attiecīgi samazinās par 13% un 15% . Nav skaidru kritēriju, kas būtu jāizmanto jutīguma novērtēšanai. Citi autori norāda, ka, ja vērtības ir $\pm 15\%$ robežās cita no citas, rezultātus var uzskatīt par līdzvērtīgiem [58].

Lai vēl vairāk pārbaudītu viena procesa ietekmi uz kopējo ekoloģisko raksturlielumu, tika vērtēta nobrauktā attāluma ietekme no rapša sēklu noliktavas līdz eļļas ražotnei. Pamatscenārijā attālums ir tikai 34 km, taču tika modelēti scenāriji ar rapšu sēklas pārvadāšanu līdz 250 km attālumā. Scenārijos, kur tika izmantots tirgus vērtības, masas un enerģijas sadalījums, *ReCiPe* kopējais punktu skaits pieaugums bija par $8,6\%$ lielāks nekā sākotnējā līmenī. Vislielākais pieaugums bija kategorijā “Kaitējums resursu pieejamībai” ar $15,2\%$ pieaugumu, kam sekoja kategorija “Kaitējums cilvēku veselībai”. Šajos gadījumos ietekmi palielina lielāks nobrauktais attālums, sadedzinot vairāk fosilās degvielas, tādējādi tiek izsmelti vairāk fosilo resursu un radītas emisijas.

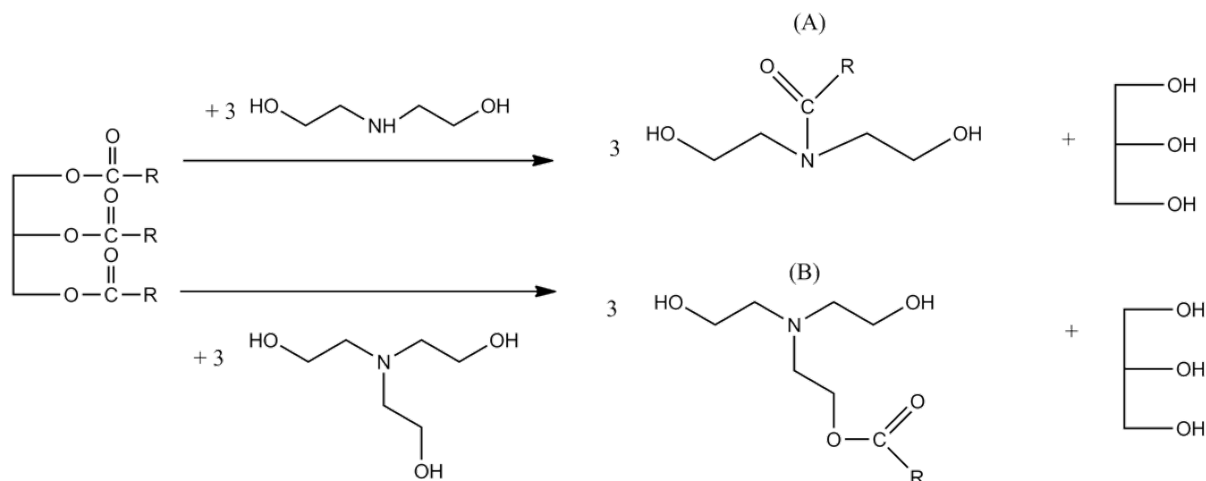
3.3. ACN rapšu eļļas biopoliolu ražošanai

3.3.1. Mērķa un darbības jomas definēšana, funkcionālā vienība, sistēmas robežas

Šajā nodaļā aprakstīts rapšu eļļas polioli ACN “no šūpuļa līdz vārtiem”. Rapšu eļļas polioli tika analizēti, izmantojot trīs dažādas sadalījuma metodes attiecībā uz atjaunojamās izejvielas ieguves posmu. Izmantotie sadalījuma koeficienti ir apskatīti 3.2.1. sadaļā. Izvēlēta FV bija 1 kg rapšu eļļas poliola, ko var izmantot izsmidzināmus PU pārklājumus un cieto PU siltumizolācijas putuplastu izstrādē. Rapšu eļļas poliolu ražošanas sistēmas robeža ir attēlota 3.1. attēlā.

3.3.2. Biopoliolu sintēze

Polioli tika sintezēti, transesterificējot rapšu eļļu ar trietanolamīnu (TEA), kā arī amidizējot ar dietanolamīnu (DEA). Rapšu eļļas poliolu sintēze tika veikta pilotreaktorā, kura tilpums ir 50 L. Ar detalizētāku rapšu eļļas poliolu sintēzes aprakstu var iepazīties autora iepriekšējos darbos [27]. Amidizācija ar DEA tika veikta $140\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrā. Transesterifikācija ar TEA tika veikta $170\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrā. Šajā sintēzes procesā nav nepieciešama attīrīšana un filtrēšana. Rapšu eļļas biopoliola idealizētā sintēzes shēma ir redzama 3.3. attēlā, savukārt rapšu eļļas biopoliolu raksturojums ir dots 3.3. tabula



3.3. att. Idealizēta sintēzes shēma rapšu eļļas biopoliolu ieguvei, A – RE/DEA poliols, B – RE/TEA poliols, RE – rapšu eļļa [27].

3.3. tabula

Rapšu eļļas biopoliolu raksturojums (adaptēts no [27])

Poliols	Hidroksilskaitlis, mg KOH/g	Vidējā funkcionalitāte f_n	Viskozitāte, mPa·s pie 25 °C	Atjaunojamo vielu saturs, %
RE/DEA	416	2,25	825	74
RE/TEA	374	2,25	156	67

Abiem rapšu eļļas polioliem ir augsts hidroksilskaitlis un zema funkcionalitāte, viskozitāte ir piemērota izmantošanai rūpniecībā. Turklāt RE/TEA poliols satur trešējo amīna grupu, kas katalizē uretāna veidošanās reakciju. Tas samazina vai izslēdz nepieciešamību PU receptūrā izmantot tradicionālos katalizatorus – trešējos amīnus vai metālorganiskos katalizatorus [59].

Izstrādāto rapšu eļļas poliolu lietojums tika demonstrēts, izmantojot rūpnieciskās PU izsmidzināšanas iekārtas. Tika izstrādātas sešas ātri cietējošas divkomponentu PU pārklājumu sistēmas. Atjaunojamo izejvielu saturs galaproduktā bija 21,7–31,9 % [59]. Šie polioli tika izmantoti arī cieto PU siltumizolācijas putuplastu izstrādē, aizstājot 70 % (masas) naftas ķīmijas poliola ar rapšu eļļas biopolioliem. Atjaunojamo izejvielu saturs cietajā PU putuplastā sasniedza 16,1 % [60], [61].

3.3.3. ACI kopsavilkums rapšu eļļas biopolioliem

Rapšu eļļas biopoliolu ražošanas inventarizācijas kopsavilkums ir atspoguļots 3.4. tabulā.

3.4. tabula

Rapšu eļļas biopoliolu sintēzes ACI dati, FV – 1 kg poliola

Ievadplūsma	Mērvienība	RE/DEA	RE/TEA	Skaidrojumi / datu avots
Rapšu eļļa	kg	0,74	0,67	Rapša ACI modelēta pēc <i>Fridrihsone et al.</i> [62]
DEA CAS # 111-42-2	kg	0,26	–	<i>ecoinvent v3.5</i>
TEA CAS# 102-71-6	kg	–	0,33	<i>ecoinvent v3.5</i>
Katalizators. Cinka acetāta dihidrāts 0,15 % (masas)	kg	0,0015	0,0015	Modelēts kā 37 % (masas) cinka oksīds, 55 % (masas) etiķskābe, 8 % (masas) ūdens <i>ecoinvent v3.5</i> .
Inerta gāze	kg	0,021	0,18	<i>ecoinvent v3.5</i>
Elektrība	kWh	0,44	0,48	<i>ecoinvent v3.5</i> , zems spriegums, LV energoresursu struktūra
Transports, 20 t kravas automašīna	tkm	0,43	0,55	<i>ecoinvent v3.5</i>
Transports, 3,5–7,5 t kravas automašīna	tkm	0,036	0,033	
Izvadplūsma				
Poliols	kg	1,00	1,00	
Kondensāts	g	0,02	0,02	Nenožīmīgs

Rapšu eļļas biopolioli tika salīdzināti ar naftas ķīmijas polioliu, kas pieejams *ecoinvent v3.5* datubāzē. Naftas ķīmijas poliētera poliols reprezentē Eiropas vidējos datus, ko sniedza asociācija *Plastics Europe* [63].

3.3.4. ACIN rapšu eļļas biopolioliem: *ReCiPe* metode

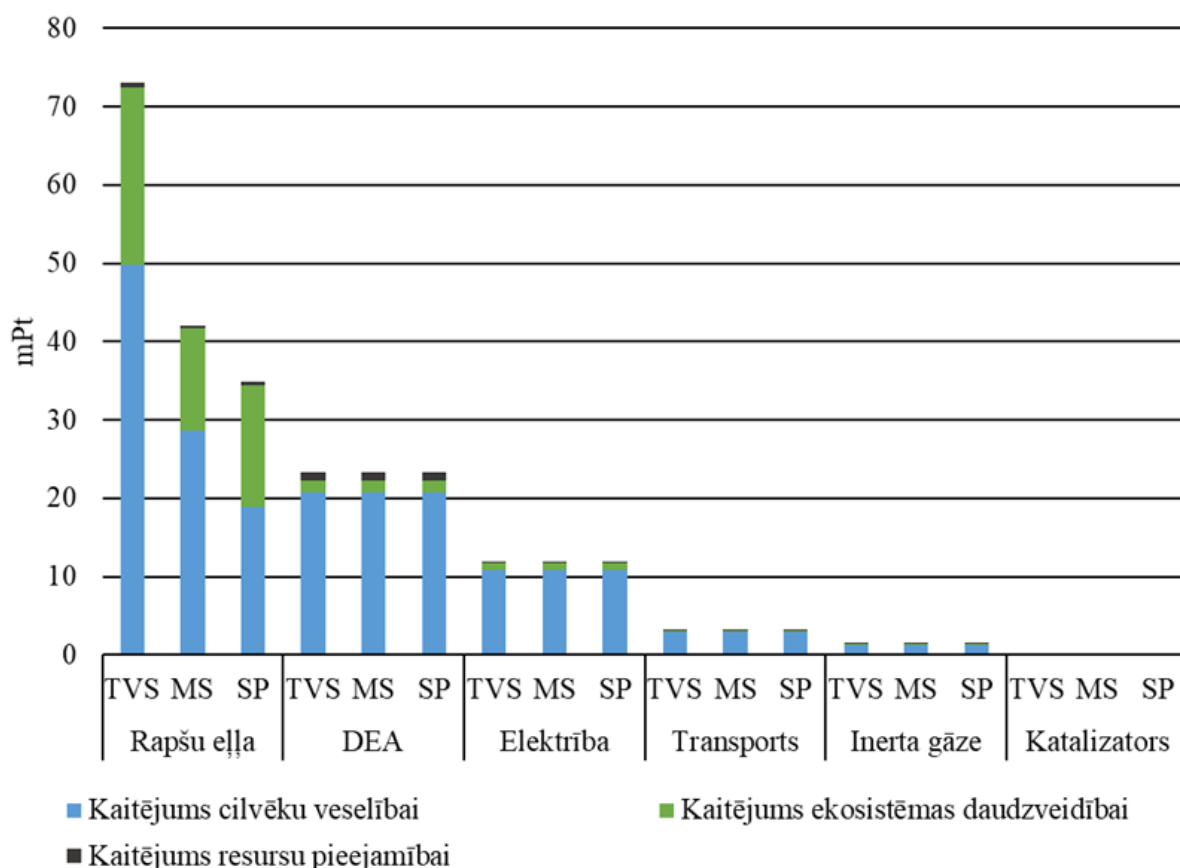
3.3.4.1. Galapunktu ietekmes kategorijas

Ja eļļas spiestuves posmam piemēro dažādas sadalījuma metodes un salīdzina ar naftas ķīmijas alternatīvu, ACIN rezultāti RE/DEA un RE/TEA pololiem *ReCiPe* galapunktu ietekmes kategorijās rāda, ka abiem rapšu eļļas biopolioliem ir zemāki ekoloģisko raksturlielumu rādītāji nekā naftas ķīmijas polioliem. Nelielās atšķirības starp abiem polioliem ir saistītas ar neredzamiem atšķirīgām ievadplūsmām katrā poliola (3.4. tabula). Atkarībā no izvēlētajām sadalījuma metodēm rapšu eļļas spiestuves posmā rapšu eļļas polioliem būtiski mainās arī kopējais vides novērtējums. Sistēmas paplašināšanas gadījumā RE/DEA polioliem kopējās ietekmes galapunkta vērtība bija 73,3 mPt, masas sadalījuma gadījumā vērtība – 81,9 mPt (par 11,7 % vairāk), tirgus vērtības sadalījumam bija lielākais rezultāts 113,0 mPt – pieaugums par 54,1 %, salīdzinot ar vismazākās ietekmes sadalījuma metodi. Ja RE/DEA polioli salīdzina ar naftas ķīmijas poliola kopējās ietekmes galapunkta vērtību, tad atšķirība atkarībā no izvēlētajām

sadalījuma metodes ir ievērojama. Ekoloģiskais raksturlielums ir par 50,1 % zemāks nekā naftas ķīmijas poliolum, ja izmanto sistēmas paplašināšanu, un par 24,2 % mazāks tirgus vērtības sadalījuma gadījumā. Rezultāti liecina, ka sadalījuma pieejas izvēle ķīmisku vielu no atjaunojamām izejvielām ražošanas posmā var būtiski ietekmēt ķīmiskās vielas ekoloģiskos raksturlielumus.

Neatkarīgi no poliola tipa – no atjaunojamām izejvielām vai no naftas ķīmijas – galapunkta kategorijas “Kaitējums cilvēku veselībai” ietekmei bija augstākais īpatsvars. Naftas ķīmijas alternatīvas gadījumā tās īpatsvars bija 90,5 % no kopējās ietekmes. Biopoliolum RE/DEA kategorijas “Kaitējums cilvēka veselībai” īpatsvars samazinājās no 78,7 % (masas sadalījums) līdz 75,8 % (tirgus vērtības sadalījums), un viszemākā vērtība bija sistēmas paplašināšanas scenārijam – 72,8 %. Kategorijā “Kaitējums ekosistēmu daudzveidībai” rapšu eļļas polioliem bija vissliktākie rezultāti, jo to devums galapunktu izteiksmē bija trīs līdz četras reizes sliktāks (atkarībā no izvēlētas sadalījuma metodes) nekā naftas ķīmijas poliolum. Iemesls ir atjaunojamo izejvielu izmantošana rapšu eļļu biopoliolu ražošanā. Kategorijā “Kaitējums ekosistēmu daudzveidībai” sistēmas paplašināšanas sadalījuma metode deva vislielāko īpatsvaru – 24,7 %, savukārt masas sadalījuma gadījumā vismazāko – 19,3 %. Masas sadalījuma gadījumā rapšu eļļas spiestuves posmā eļļai ir ievērojami mazāks īpatsvars nekā rapšu raušiem, savukārt tirgus vērtības sadalījuma gadījumā tas ir pretēji. Neatkarīgi no poliola tipa – no atjaunojamām izejvielām vai no naftas ķīmijas – viszemākais īpatsvars bija galapunkta kategorijai “Kaitējums resursu pieejamībai”. Visām sadalījuma metodēm tas bija 2–3 % robežās. RE/TEA poliolum kopējā tendence visās galapunkta ietekmes kategorijās saglabājās tāda pati kā RE/DEA poliolum.

Rapšu eļļas poliolu ražošanas sistēmas un atsevišķu ražošanas posmu padziļināta analīze ir attēlota 3.4. attēlā. Vienīgā atšķirība rodas atkarībā no izvēlētas sadalījuma metodes rapšu eļļas ražošanas posmā, jo tiek saražots arī blakusprodukts – rapšu rauši. Latvijā rapšu raušus galvenokārt iepērk mājputnu un govju audzētāji [54]. Galapunkta ietekmes kategorija “Kaitējums resursu pieejamībai” veidojas no viduspunktu ietekmes kategorijām “Minerālo resursu noplicināšanās” un “Fosilo resursu noplicināšanās”. *ReCiPe* metodē nukleārā enerģija, rūdu izsmelšana kodolenerģijas ražošanai, tiek ieskaitīta “Minerālo resursu noplicināšanās” kategorijā, fosilā enerģija – “Fosilo resursu noplicināšanās” kategorijā [64]. *ReCiPe* galapunkta kategorija “Kaitējums resursu pieejamībai” korelē ar *CED*, jo abi raksturo fosilo resursu izmantošanu konkrētā produkta ražošanā. *CED* sniedz atbilstošāku ainu un nodrošina pārlicinātos rezultātus attiecībā uz neatjaunojamo energoresursu izsmelšanu. *CED* rezultāti tiks apskatīti 3.3.5. apakšnodaļā.



3.4. att. *ReCiPe* metodes galapunktu ietekmes kategorijas RE/DEA biopoliolam atkarībā no atsevišķiem ražošanas posmiem un sadalījuma metodes eļļas ražošanas posmā.

Lielāko ietekmi galapunkta ietekmes kategorijā “Kaitējums resursu pieejamībai” rada polioliu sintēzē izmantotie alkanolamīni un rapšu eļļas ražošana, kur lauksaimniecības tehnikai izmanto dīzeļdegvielu rapša audzēšanas posmā. Nelielas atšķirības šajā kategorijā ir saistītas ar zemāku elektroenerģijas patēriņu RE/DEA poliola sintēzei un zemāku alkanolamīna īpatsvaru. Salīdzinājumam, ņemot vērā naftas ķīmijas poliolu kā referenci, kategorijā “Kaitējums resursu pieejamībai” rapšu eļļas RE/DEA un RE/TEA poliolu vērtība ir par 65,1 % un 58,1 % zemāka par naftas ķīmijas poliola vērtību.

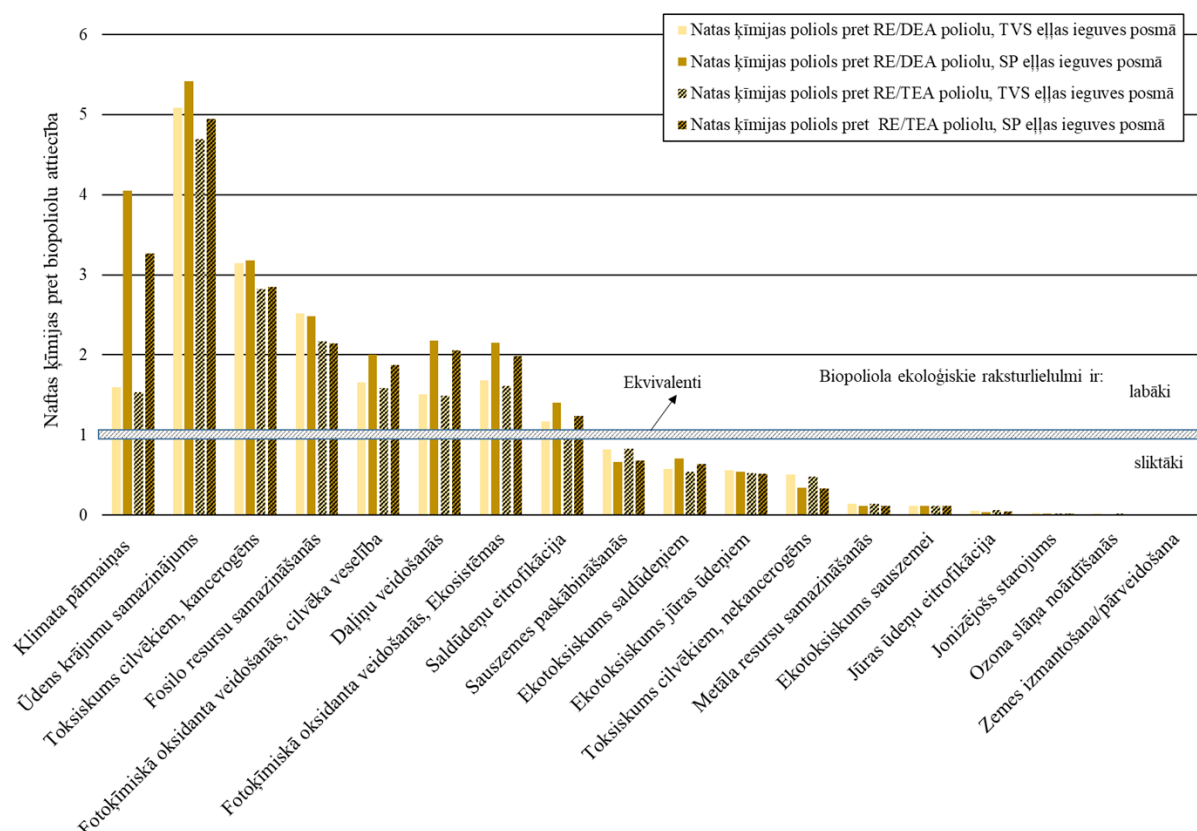
Galapunkta ietekmes kategorija “Kaitējums cilvēka veselībai” veidojas no šādām viduspunkta ietekmes kategorijām: klimata pārmaiņas; ozona slāņa noārdīšanās; toksiskums cilvēkiem; fotoķīmiskā oksidanta veidošanās; daļiņu veidošanās; jonizējošais starojums [64]. Kategorijā “Kaitējums cilvēku veselībai” lielākais ietekmes īpatsvars ir rapšu eļļas ražošanai (44 %), alkanolamīnu ražošanai (32 %), kā arī elektroenerģijai (17 %). Rapšu eļļas polioliu ietekme šajā kategorijā bija apmēram puse no naftas ķīmijas poliola ietekmes. Visās galapunktu ietekmes kategorijās transportēšanas, inertās gāzes un katalizatora ietekmes īpatsvars uz kopējo kategoriju galapunktu vērtību bija nebūtisks. Tomēr jāatzīmē, ka katalizatora ietekmes īpatsvars varētu būt pārāk zemu novērtēts, jo *ecoinvent* datubāzē nebija specifiskas datu kopas, līdz ar to tika lietots aizstājējs.

Lielāko ietekmi galapunkta ietekmes kategorijā “Kaitējums ekosistēmu daudzveidībai” rada rapšu eļļas ražošana un alkanolamīnu kā hidroksilgrupas saturoša reaģenta ražošana

poliolu sintēzei. Kategorija “Kaitējums ekosistēmu daudzveidībai” rodas, apvienojot šādas viduspunkta ietekmes kategorijas: klimata pārmaiņas; sauszemes paskābināšanās; saldūdeņu eutrofikācija; ekotoksiskums sauszemei; ekotoksiskums saldūdeņiem; ekotoksiskums jūras ūdeņiem; zemes izmantošana/pārveidošana [64].

3.3.4.2. Viduspunktu ietekmes kategorijas

ReCiPe rezultātu salīdzinājums viduspunkta ietekmes kategorijām atspoguļots 3.5. attēlā.



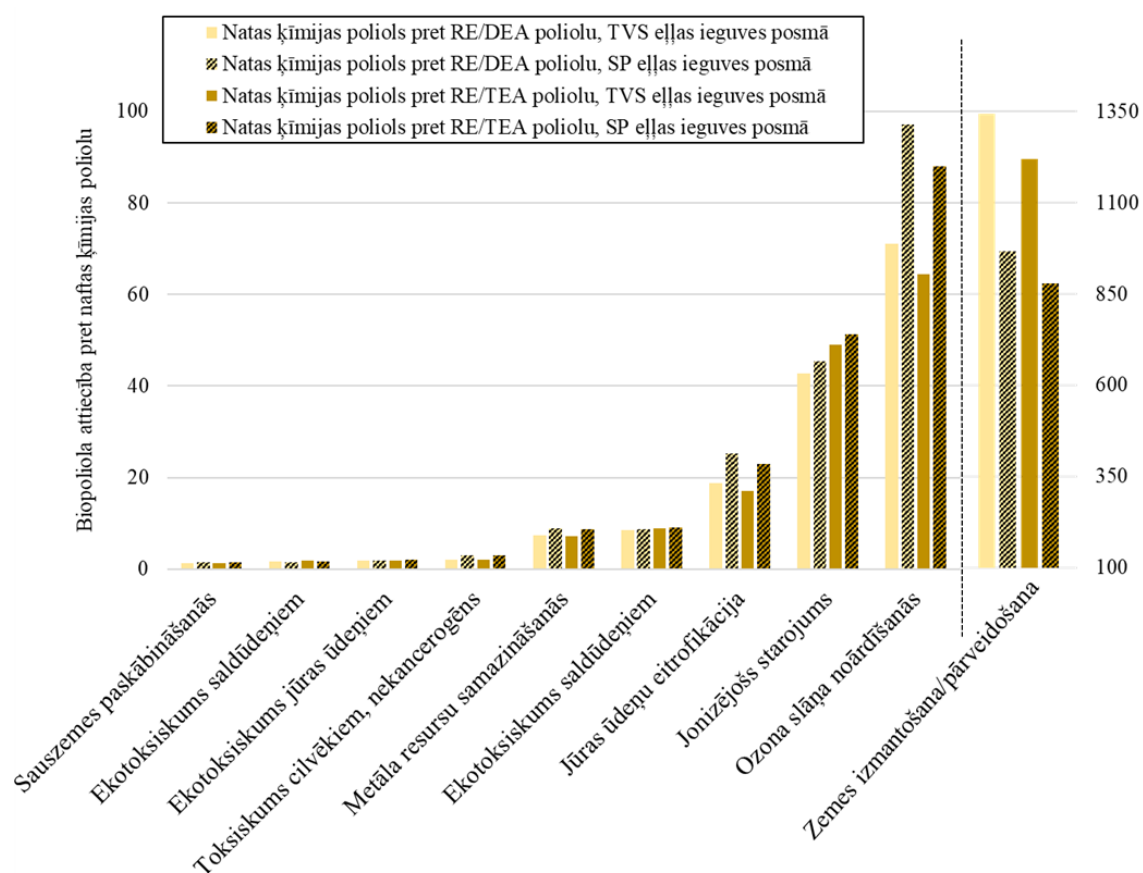
3.5. att. Rapšu eļļas biopoliolu salīdzinājums ar naftas ķīmijas polioliem (FV – 1 kg poliola).

Iegūtie *ReCiPe* rezultāti tika salīdzināti ar naftas ķīmijas poliolu kā ekoloģisko raksturlielumu attiecība naftas ķīmijas poliols/biopoliols, ja rapšu eļļas iegūšanas posmam tiek izmantota sistēmas paplašināšana un tirgus vērtību sadalījums. Ja attiecība ir >1 , tad rapšu eļļas poliolu ekoloģiskais raksturlielums ir labāks nekā naftas ķīmijas poliolum, ja vērtība ir <1 , tad biopoliolum ir sliktāks rezultāts nekā naftas ķīmijas ekvivalentam. Ja vērtības ir $\pm 15\%$ robežās, rezultātus uzskata par līdzvērtīgiem [58].

Rapšu eļļas biopolioli uzrāda labāku sniegumu šādās viduspunkta ietekmes kategorijās: klimata pārmaiņas; ūdens krājumu samazinājums; toksiskums cilvēkiem; kancerogenitāte; fosilo resursu samazināšanās; fotokīmiskā oksidanta veidošanās; cilvēka veselība; daļiņu veidošanās; fotokīmiskā oksidanta veidošanās; ekosistēmas; saldūdeņu eutrofikācija. Citi pētījumi liecina, ka ūdens patēriņa profils lielā mērā ir atkarīgs no kultūraugu apūdeņošanas sistēmas [65]. Rapšu audzēšanai Latvijā neizmanto mākslīgo apūdeņošanu, tikai dabiskos lietus ūdeņus. Arī eļļas spiestuvē neizmanto tvaiku, jo tiek izmantota aukstās ekstrakcijas metode,

līdz ar to šajā viduspunkta ietekmes kategorijā rapšu eļļas biopoliolu sniegums ir ievērojami labāks. Detalizētāks pārskats par klimata pārmaiņu viduspunktu kategoriju tiks sniegts tālāk tekstā.

Atjaunojamo resursu rapšu eļļas biopolioliem ir potenciāls samazināt neatjaunojamo enerģijas patēriņu, SEG emisijas un ūdens patēriņu, tomēr tas var radīt lielāku negatīvo ietekmi uz zemes izmantošanu un citās ar lauksaimniecisko darbību saistītajās kategorijās [66]. *Patel et al.* rekomendē: piemērots labās prakses mērķis attiecībā uz polimēriem no atjaunojamām izejvielām būtu samazināt lielāko daļu ietekmes uz vidi kritēriju vismaz par 20 % [67], tomēr rapšu eļļas polioliem to neizdodas panākt. Lai labāk parādītu rapšu eļļas poliolu trūkumus viduspunktu kategorijas, kur rapšu eļļas ietekme uz vidi bija lielāka, šie rezultāti ir attēloti apgrieztā proporcijā – biopoliols pret naftas ķīmijas poliolu (3.6. att.).

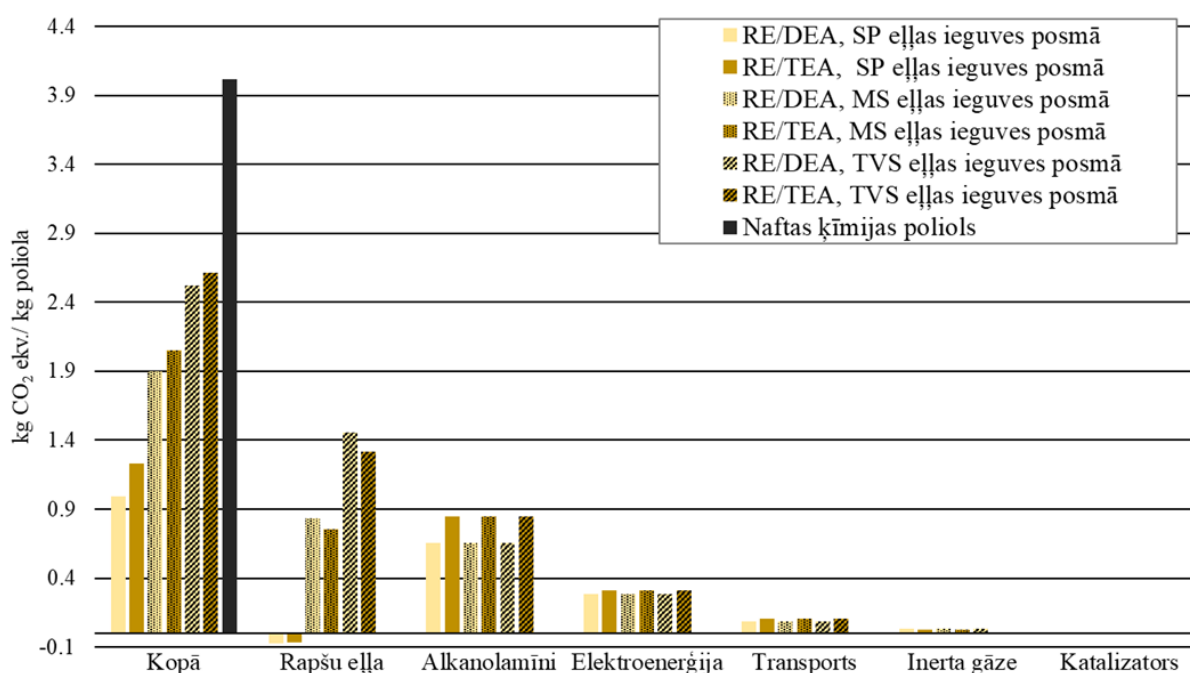


3.6. att. *ReCiPe* viduspunkta ietekmes kategorijas, kur rapšu eļļas ietekme uz vidi bija sliktāka, prezentētās apgrieztā proporcijā.

Kategorijā, kas saistīta ar zemes izmantošanu, rapšu eļļas biopoliolu rezultāts bija ievērojami sliktāks nekā naftas ķīmijas polioliem, potenciāla ietekme bija 800–1300 reizes lielāka. Lai ražotu rapšu eļļu, ir nepieciešama lauksaimniecības zeme rapšu audzēšanai, un tā rezultātā kategorija “Lauksaimniecības zemes izmantošana” ir ar vislielāko ietekmi (3.6. att.). Citas viduspunkta ietekmes kategorijas, kas ir svarīgas un tieši saistītas ar lauksaimniecisko ražošanu, ir eutrofikācija, ekotoksicitāte un paskābināšanās.

Kategorijā “Jūras ūdeņu eutrofikācija” rapšu naftas biopoliolu rezultāts atkarībā no poliola veida un arī izvēlētajās sadalījuma metodes bija ~20 reizes sliktāks nekā naftas ķīmijas poliolum. Attiecībā uz “Sauszemes paskābināšanas” kategoriju abi rapšu eļļas polioli uzrādīja 1,2–1,5 reizes (attiecīgi tirgus vērtības sadalījums un sistēmas paplašināšanas sadalījums) sliktāku rezultātu nekā naftas ķīmijas ekvivalents. Galvenais veicinātājs ir rapšu audzēšana, jo tiek izmantoti minerālmēsli. Kategorijās “Ekotoksicitāte jūras ūdeņiem” un “Ekotoksicitāte saldūdeņiem” rapšu eļļas biopolioli uzrādīja aptuveni divas reizes sliktāku rezultātu nekā naftas ķīmijas polioli. Potenciāli toksiskas emisijas lauksaimniecības kultūru audzēšanā rada minerālmēslojuma izmantošana, pesticīdu emisijas un lauksaimniecības tehnikas izmantošana [68]. Apmēram viena trešdaļa ietekmes kategorijā “Ekotoksicitātes jūras ūdeņiem” un “Ekotoksicitāte saldūdeņiem” rodas no alkanolamīnu ražošanas. Citas viduspunktu ietekmes kategorijas, kur rapšu eļļas poliols uzrādīja ievērojami sliktāku rezultātu, ir “Ozona slāņa noārdīšanās” un “Jonizējošais starojums”.

Viduspunkta ietekmes kategorijas “Klimata pārmaiņas” raksturojošais faktors ir *GWP* [64]. Tas ir viens no galvenajiem ACN izmantotajiem rādītājiem globālā mērogā. SEG emisijas laika periodā atspoguļotas 3.7. attēlā, kas parāda atsevišķu ražošanas posmu īpatsvaru atkarībā no rapšu eļļas spiestuves posmā izmantotās sadalījuma metodes, salīdzinot ar kopējo *GWP* rapšu eļļas poliola iegūšanā un *GWP* naftas ķīmijas poliolum.



3.7. att. Kopējais *GWP* rapšu eļļas polioliem un *GWP* atsevišķiem ražošanas aspektiem, salīdzinot ar naftas ķīmijas poliolu, atkarībā no rapšu eļļas sadalījuma metodes.

Naftas ķīmijas izejvielu aizstāšana ar augu eļļām biopoliolu ražošanai samazina SEG emisijas. Rapšu eļļas biopoliola kopējais *GWP* ir visaugstākais, ja piemēro tirgus vērtības sadalījumu, savukārt viszemākais *GWP*, ja piemēro sistēmas paplašināšanu. SEG emisiju ietaupījums ir 1,50 kg CO₂ ekv. (tirgus vērtības sadalījums) līdz 3,02 kg CO₂ ekv. (sistēmas paplašināšana) RE/DEA poliolum. RE/TEA poliolum 1,40 kg CO₂ ekv. uz 1 kg saražotā poliola

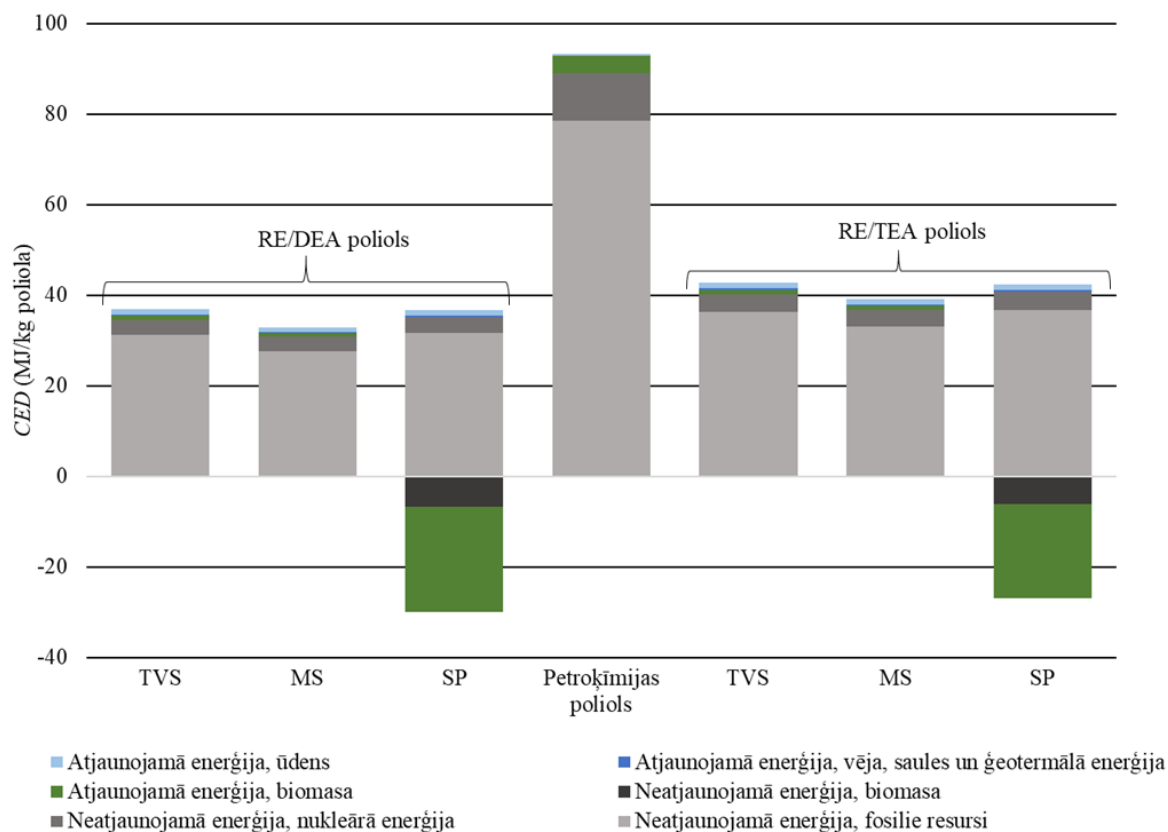
(tirgus vērtības sadalījums) līdz 2,79 kg CO₂ ekv. uz 1 kg saražotā poliola (sistēmas paplašināšana), salīdzinot ar naftas ķīmijas poliolu. *Patel et al.* ir ieteicis, ka labas prakses mērķis attiecībā uz polimēriem no atjaunojamām izejvielām būtu izvairīties no vismaz 1 kg CO₂ uz kg polimēra [67].

Atkarībā no izvēlētās sadalījuma metodes eļļas spiestuves posmā mainās arī lielākie *GWP* veicinātāji. Ja izmanto sistēmas paplašināšanu, tad visvairāk SEG emisijas veicina alkanolamīnu ražošana un (ar ievērojami mazāku vērtību) arī elektroenerģija. Ja sistēmas paplašināšana tika izmantota kā sadalījuma metode, tad sojas miltu ražošanas ietekme tika atņemta no rapšu eļļas ražošanas sistēmas, tādējādi radot negatīvu *GWP* vērtību rapša sēklu ražošanai. Ja izmanto masas un tirgus vērtības sadalījumu, tad liela ietekme ir rapšu eļļas un alkanolamīnu ražošanai. Tirgus vērtības sadalījumā rapšu eļļas ietekmes īpatsvars poliola ir ievērojami lielāks. Rapšu eļļa ir galvenā izejviela poliola sintēzē, rapšu eļļas daudzums poliola ir līdz 74 % (3.3. tabula).

Rapšu eļļa būtiski ietekmē *GWP* kategoriju, un kopumā ar rapšu eļļas ražošanu saistīto SEG emisiju avoti ir: i) mēslošanas līdzekļu izmantošana; ii) fosilo resursu izmantošana (lauksaimniecības tehnika, sēklu žāvēšana); iii) materiālu ievadplūsmas rapšu ražošanā (sēklas, augu aizsardzības līdzekļi, mēslošanas līdzekļi). Alkanolamīna, inertās gāzes un katalizatora transportēšanas ietekme uz *GWP* ir ļoti maza. Tomēr jāatzīmē, ka katalizatoru ietekme varbūt novērtēta par zemu, jo *ecoinvent v3.5* nebija pieejama konkrētā datu kopa.

3.3.5. ACIN rapšu eļļas biopolioliem: *CED* metode

Neatjaunojamās enerģijas izmantošanas un SEG emisiju negatīvie aspekti ir stimulējuši pieaugošu interesi par produktiem no atjaunojamām izejvielām, tādējādi tie ir svarīgi parametri šo produktu ekoloģiskuma raksturošanā [66]. *CED* rezultāti, kas sagrupēti pēc rapšu eļļas poliola tipa (attiecīgi RE/DEA un RE/TEA) un pēc izvēlētās sadalījuma metodes rapšu eļļas spiestuves posmā, kā arī salīdzināti ar *CED* naftas ķīmijas poliola, kas pieejams *ecoinvent v3.5* datubāzē, ir sniegti 3.8. attēlā.

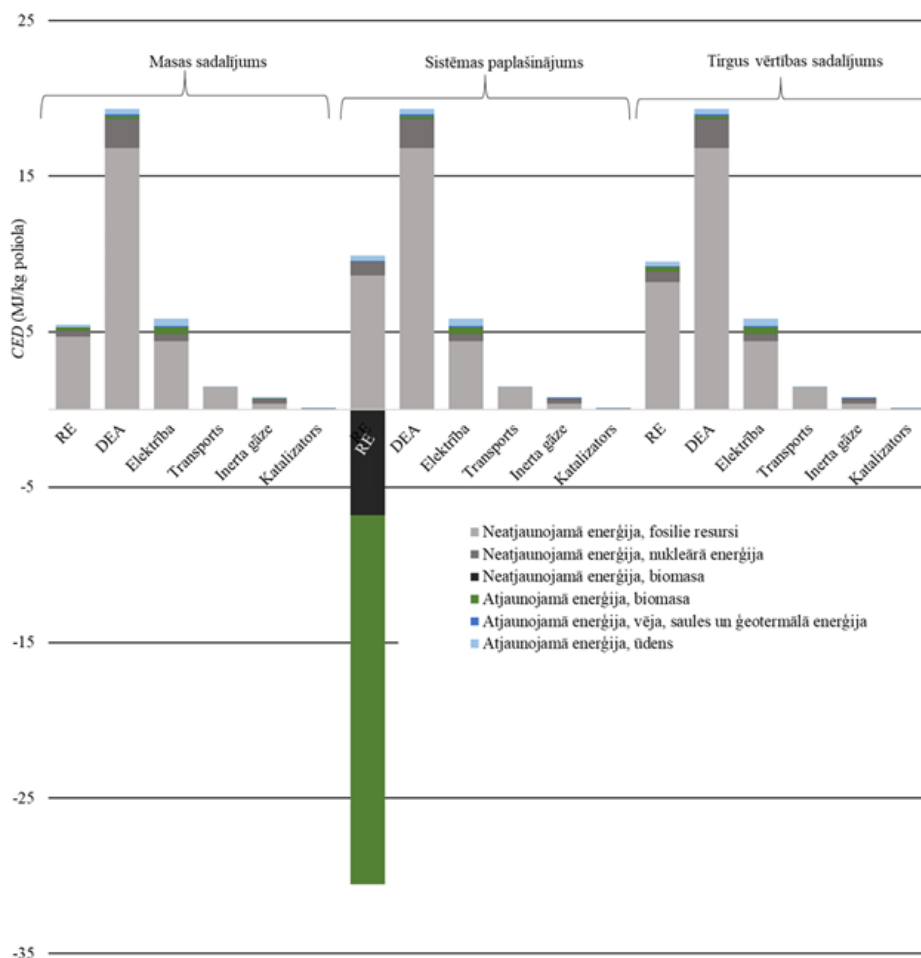


3.8. att. *CED* rapšu eļļas biopolioliem atkarībā no sadalījuma metodes rapšu eļļas ražošanā, salīdzinot ar naftas ķīmijas ekvivalentu.

Atšķirība starp abiem polioliem skaidrojama ar atšķirīgo eļļas un alkanolamīna saturu katrā polirolā un sintēzes enerģijas patēriņu (3.4. tabula). Kopumā visos sadalījuma gadījumos abiem no atjaunojamās izejvielas rapšu eļļas iegūtajiem polioliem ir zemāks *CED* nekā naftas ķīmijas polirolam, kura *CED* ir 93,4 MJ/kg. Zemākais *CED* ir tad, ja rapšu eļļas ražošanas posmā sadalījumam tiek lietota sistēmas paplašināšana. *CED* rezultāti attiecīgi ir 6,8 MJ/kg un 15,5 MJ/kg RE/DEA polirolam (par 83 % mazāk, salīdzinot ar naftas ķīmijas poliolu) un RE/TEA polirolam (par 93 % mazāk). RE/DEA polirolam tirgus vērtības sadalījuma gadījumā *CED* samazinājās par 60 %, masas sadalījuma gadījumā – par 65 %; RE/TEA polirola gadījumā vērtības attiecīgi ir 54 % un 58 %, salīdzinot ar naftas ķīmijas poliolu.

Gan atjaunojamo izejvielu, gan naftas ķīmijas polioliem *NRCED* viennozīmīgi veido lielāko īpatsvaru no kopējā *CED*, kam seko kodolenerģija. Ja atjaunojamo izejvielu poliols tiek salīdzināts ar naftas ķīmijas polirola *NRCED*, tad tirgus vērtības sadalījuma, masas sadalījuma un sistēmas paplašināšanas sadalījuma gadījumos RE/DEA polirola *NRCED* samazinās attiecīgi par 61,2 %, 65,4 % un 68,1 %. RE/TEA polirolam *NRCED* samazinājums ir 54,9 %, 58,7 % un 61,1 %. Kopumā fosilo resursu ietaupījuma procents ir ievērojams. *Patel et al.* norāda, ka labas prakses mērķi attiecībā uz “ekoloģiski pareiziem” produktiem no atjaunojamām izejvielām varētu būt ļoti noderīgi; tika rekomendēts, ka, salīdzinot ar naftas ķīmijas ekvivalentu, polimēriem no atjaunojamā izejvielām būtu jāietaupa vismaz 20 MJ (neatjaunojamās) enerģijas uz kilogramu polimēra un CO₂ samazinājumam jābūt vismaz 1 kg CO₂ uz kg polimēra [67].

Detalizētāks ieskats ir dots, veicot *CED* rezultātu dziļāku rapšu eļļas poliola ražošanas sistēmas analīzi (3.9. att.).



3.9. att. *CED* rezultāti RE/DEA poliolum no ražošanas aspektu perspektīvas atkarībā no dažādām sadalījuma metodēm.

Rezultāti skaidri parāda, ka gadījumos, kad tiek izmantota sistēmas paplašināšana rapšu eļļas spiestuves posmā, abu biopoliolu kopējais *CED* tiek kompensēts ar ietekmes kategorijām “Neatjaunojamā enerģija, biomas” un “Atjaunojamā enerģija, biomas”, savukārt citiem poliola ražošanas posmiem *CED* nemainās.

3.3.5.1. Jūtīguma analīze biopoliolu ražošanai

Šī apakšsadaļa apraksta, cik lielā mērā energoresursu struktūra ar augstāku vai zemāku atjaunojamo energoresursu īpatsvaru tajā ietekmē vidi. Izmaiņas kvantitatīvā materiālu ievadē poliola sintēzē nav vēlamas, jo izstrādātie rapšu eļļas polioli jau ir ķīmiskās sintēzes optimālais variants [27]. Elektroenerģija ir trešais lielākais vides piesārņojuma avots, tāpēc jutīguma analīze tika veikta, izmantojot dažādu valstu energoresursu struktūras, kas pieejamas *ecoinvent* v3.5 datubāzē (3.5. tabula). Pamatscenārijā rapšu eļļas biopoliolus ražo Latvijā. Salīdzinājumam tika izvēlētas vairākas citas ES valstis. Katras valsts energoresursu struktūra īsi raksturota 3.5. tabulā.

3.5. tabula

Rapšu eļļas biopoliolu ražošanas jutīguma analīze: energoresursu struktūras ietekme

Izvēlētā valsts poliola ražošanai	Energoresursu struktūra [69]	RE/DEA poliols			RE/TEA poliols		
		MS	SP	TVS	SP	MS	TVS
		Modelētā valsts pret pamatscenāriju					
Pamatscenārijs – Latvija	Hidroenerģija 32 %, fosilais kurināmais 20 %, bioenerģija 1 %, imports 48 %* (no Krievijas, ar 64 % fosilo kurināmo struktūrā)	–	–		–	–	
Austrija	Hidroenerģija 48 %, fosilais kurināmais 20 %	–8 %	–8 %	–6 %	–9 %	–8 %	–6 %
Vācija	Fosilais kurināmais 56 %, kodolenerģija 22 %, bioenerģija 10 %	–2 %	–2 %	–1 %	–2 %	–2 %	–2 %
Zviedrija	Hidroenerģija 43 %, kodolenerģija 38 %, bioenerģija 7 %	–13 %	–14 %	–9 %	–15 %	–13 %	–10 %
ENTSO-E	Fosilais kurināmais 50 %, hidroenerģija 17 %, kodolenerģija 27 %, bioenerģija 6 %	–4 %	–4 %	–3 %	–5 %	–4 %	–3 %
Igaunija	Fosilais kurināmais 85 %, no tā 79 % lignīta	8 %	9 %	6 %	10 %	9 %	7 %

Redzams, ka rezultātu vērtības izmaiņas nav lielākas par ± 15 % no pamatscenārija. Atkarībā no izvēlētās valsts vides aspekti ir nedaudz uzlabojušies vai samazinājušies. Scenārijā ar Zviedrijas energoresursu struktūru kopējā ietekme uz vidi samazinātos par 9 līdz 14 %, salīdzinot ar pamatscenāriju. Tas saistīts ar lielo hidroenerģijas īpatsvaru un mazu fosilo kurināmo īpatsvaru (2 %) energoresursu struktūrā.

No otras puses, ja apskata scenāriju, kur energoresursu struktūra ir orientēta uz fosilā kurināmā izmantošanu, kā tas ir Igaunijā, tad biopoliolu ietekme uz vidi būs augstāka nekā pamatscenārijā. Samazinot fosilo kurināmo īpatsvaru energoresursu struktūrā, samazinās arī ietekme uz vidi, tāpat kā scenārijos, kur polioli tiek ražoti Vācijā un Austrijā.

Datu nepilnības. Lai gan šī ACI tika veidota, balstoties uz datiem par rapša eļļas poliolu ražošanu pilotreaktora mērogā, liela mēroga poliola ražotnes ACI dati varētu būt atšķirīgi, un tādējādi ACIN dos atšķirīgus rezultātus. Atšķirība varētu rasties vairāku iemeslu dēļ, piemēram, sintēzei nepieciešamais elektroenerģijas patēriņš, ķīmiskās rūpnīcas veids un transporta ietekme atkarībā no ražotnes atrašanās vietas, jo sintēzes molārā attiecība paliek nemainīga.

SECINĀJUMI

Promocijas darbā izvirzītais pamatjautājums bija par to, vai no atjaunojamās izejvielas, rapšu eļļas, sintezētiem bio-polioliem, kas piemēroti PU materiālu iegūšanai, ir labāki ekoloģiskie raksturlielumi nekā naftas ķīmijas polioliem.

Lai atbildētu uz šo jautājumu un sasniegtu darba mērķi, tika veikts padziļināts ACN. Papildu vides profilu izveidei, kas nepieciešami pētniecības mērķu sasniegšanai, bija jāizstrādā aktuālas ACI, iegūstot kvantitatīvus, reģionam specifiskus datus, kas Ziemeļeiropas valstij Latvijai iepriekš nav apkopoti. Pētījums tika iedalīts četrās daļās, katrai sniedzot pārredzamus un konsekventus rezultātus par visiem būtiskajiem produktu pārveides un ražošanas posmiem. Kvalitatīviem, pārredzamiem primārajiem datiem ir izšķiroša nozīme ACN modeļu izveidē, lai iegūtu precīzus un reālistiskus ACN rezultātus. Viens no galvenajiem šī pētījuma rezultātiem ir atsevišķu ACI publicēšana, kas atspoguļo aktuālās lauksaimniecības prakses rapšu audzēšanas jomā Latvijas kontekstā un biopoliola sintēzē. Tā mērķauditorija ir ACN pētnieki un praktiķi, un ir būtiski, ka iegūtos rezultātus iespējams integrēt jebkurā ACN programmatūras datubāzē.

Darba gaitā tika izstrādāta Latvijai atbilstoša ACI vasaras un ziemas rapšu audzēšanai. Visaptveroša primāro datu ievākšana ļāva izvairīties no pieņēmumiem ACI posmā. Izmantotā ACI metodika ļāva veikt padziļinātu inventarizāciju, kas maksimāli tuvināti modelēja faktisko rapšu audzēšanas lauksaimniecības praksi Latvijā. Tas ir būtiski ACN veikšanai. Rapšu audzēšanas ACI konstatēts, ka ziemas un vasaras rapša vidējā ražība ir 3,5 t/ha un 2,5 t/ha. Rapšu ražība atbilst vidējai rapša ražībai ES-28 valstīs. Mēslošanas līdzekļu izmantošana ir līdzīga, salīdzinot ar citu ES dalībvalstu praksi. Ziemas rapšu audzēšanā tika izmantoti 63,2 kg N/t, vasaras rapša – 74,8 kg N/t. Vasaras rapša audzēšanā intensīvāk tiek izmantota lauksaimniecības tehnika, kas attiecīgi rada lielāku degvielas patēriņu (31,7 L/t, salīdzinot ar 14,5 L/t ziemas rapsim). Augu aizsardzības līdzekļu izmantošana bija 5,0 L/t ziemas un 6,6 L/t vasaras rapsim. Pētījuma laikā tika konstatēta tādu mikroelementu izmantošana rapšu audzēšanā, par kuru lietošanu nav datu citos avotos. Pētījums tika veikts par faktisko rapšu audzēšanas praksi Latvijā, vienlaikus identificējot augu atlieku izmantošanas trūkumu. ACI datu salāgošana ar *ecoinvent* datubāzi iezīmēja vairākas problemātiskās jomas, piemēram, datu trūkums par mēslošanas līdzekļiem, mikroelementiem, kā arī izaicinājumus attiecībā uz lauksaimniecības tehnikas datu salāgošanu.

CED ziemas un vasaras rapša audzēšanai Latvijā ir attiecīgi 6450 MJ/t un 8809 MJ/t. *NRCED* veidoja 94 % no kopējā *CED*, no tā lielākā daļa bija fosilā enerģija. *CED* rezultāti liecina, ka vasaras rapša audzēšanai bija nepieciešams par 36 % vairāk enerģijas nekā ziemas rapša audzēšanai, kas ir saistīts ar zemāku vasaras rapša ražību un augstāku resursu patēriņu. Attiecībā uz ziemas un vasaras rapsi vislielākā rapšu audzēšanas ietekme bija uz kategoriju “Kaitējums cilvēku veselībai” ar 67,2 % un 78,9 % no kopējās ietekmes, kam sekoja kategorija “Kaitējums ekosistēmas daudzveidībai” ar attiecīgi 32,2 % un 20,4 %. Mazāk nekā 1 % tika ietekmēta kategorija “Kaitējums resursu pieejamībai”. Minerālmēsli radīja vislielāko ietekmi uz vidi abiem rapša veidiem. Vērā ņemams piesārņojuma avots ir lauksaimniecības tehnikas izmantošana lauka apstrādes darbos. Transportēšanas un augu aizsardzības līdzekļu ietekme ir neliela – mazāka par 15 %. Sējai paredzētajām sēklām ir niecīga ietekme visās ietekmes kategorijās, izņemot ūdens patēriņu ar ietekmi zem 4 %. Pētījumu rezultāti parāda, ka ražībai ir

kritiska nozīme, vērtējot ietekmi uz vidi, jo, pieaugot ražībai, ietekme uz vidi samazinās. Ziemas rapša audzēšana ir videi mazāk kaitīga nekā vasaras rapša audzēšana.

ACN analīze rapšu eļļas ražošanas posmam liecina, ka rapšu eļļas ACN rezultātus būtiski ietekmē sadalījuma metodes izvēle. Kopumā ekoloģisko raksturlielumu gala vērtība palielinājās šādi: sistēmas paplašināšana < masas sadalījums < enerģijas sadalījums < tirgus vērtības sadalījums. Sistēmas paplašināšana uzrādīja viszemāko rezultātu *CED* 1 t rapšu eļļas ražošanai –28 GJ, savukārt tirgus vērtības sadalījuma gadījumā *CED* bija 13 GJ/t ziemas un 18 GJ/t vasaras rapsim. Tas izcēla arī ražības ietekmi uz rezultātiem, jo kopumā vasaras rapsim ekoloģiskie raksturlielumi bija sliktāki nekā ziemas rapsim. ACIN ar *ReCiPe* metodi parādīja, ka sistēmas paplašināšana deva zemāko rādītāju ar 45 mPt ziemas rapšu ražošanai, masas sadalījumā ietekme bija par 25,8 % lielāka, enerģijas sadalījumā – par 84,1 % augstāka, tirgus vērtības sadalījumā – par 119,1 % augstāka. Vasaras rapsim bija tāda pati tendence. Jūtīguma analīze liecina, ka, palielinot vai samazinot eļļas cenu par 30 %, ekoloģisko raksturlielumu izmaiņas nepārsniedz 15 %.

Darbā tika modelēts ACN “no šūpuļa līdz vārtiem” biopoliolu sintēzei pilotmērogā. ACN rezultāti rāda, ka lielākie piesārņojuma avoti biopoliola sintēzes laikā galvenokārt rodas rapšu eļļas un alkanolamīna ražošanas rezultātā, kam seko elektroenerģijas patēriņš kā trešais lielākais piesārņojuma avots. Citu avotu (transports, inerta gāze, katalizators) ietekme ir neliela. RE/DEA un RE/TEA rapšu eļļas polioliem ir līdzīga kopējā ietekme uz vidi ar dažu procentu atšķirību, kas skaidrojama ar dažādu rapšu eļļas un alkanolamīna īpatsvaru poliolos. RE/DEA poliola sintēzei nepieciešamais *CED* bija 6,8 MJ/kg poliola, kas ir par 83 % mazāk, salīdzinot ar naftas ķīmijas alternatīvu, savukārt RE/TEA sintēzei – 15,5 MJ/kg (par 93 % mazāk). Fosilie resursi veidoja lielāko daļu no kopējā *CED*. *NRCED* ietaupījums bija ievērojams, salīdzinot ar naftas ķīmijas alternatīvu: par 54,5 MJ/kg (tirgus vērtības sadalījums); 58,3 MJ/kg (masas sadalījums); 60,7 MJ/kg (sistēmas paplašināšana) zemāks. RE/TEA poliolum *NRCED* samazinājums bija attiecīgi 54,9 %, 58,7 % un 61,1 %. RE/DEA poliola *ReCiPe* rezultāts bija 73,3 mPt sistēmas paplašināšanas gadījumā, bet tirgus sadalījuma gadījumā rezultāts bija sliktāks – 113,0 mPt.

Naftas ķīmijas izejvielu aizstāšana ar augu eļļu biopoliola ražošanai izraisa SEG emisiju samazināšanos. Kopējais SEG emisiju ietaupījums rapšu eļļas biopolioliem ir šāds: RE/DEA poliolum 1,50 kg CO₂ ekv. (tirgus vērtības sadalījums) līdz 3,02 kg CO₂ ekv. (sistēmas paplašināšana), RE/TEA poliolum 1,40 kg CO₂ ekv. (tirgus vērtības sadalījums) līdz 2,79 kg CO₂ ekv. (sistēmas paplašināšana). Jūtīguma analīze rapšu eļļas biopolioliem tika veikta, izpētot elektroenerģijas avotus dažādās valstīs. Atkarībā no energoresursu struktūras ekoloģisko raksturlielumu uzlabojums vai pasliktinājums bija 15 % robežās.

Detalizēts ACN rapšu eļļas biopolioliem ir snieguši kompleksas un daudzpusīgas atbildes. Pētījuma rezultāti liecina, ka, salīdzinot ar naftas ķīmijas polioliem, rapšu eļļas izmantošana biopoliolu ražošanā būtiski samazina ietekmi uz vidi, kas saistīts ar neatjaunojamu enerģijas izmantošanu, zemākām SEG emisijām un mazāku ūdens patēriņu. Tomēr ACN rezultāti parādīja arī to, ka tādās nozīmīgās ietekmes kategorijās kā “Zemes izmantošana/pārveidošana”, “Jūras ūdeņu eutrofikācija”, “Ekotoksicitāte sauszemei”, “Ozona slāņa noārdīšanās”, rapšu izcelsmes biopoliolu ietekme uz vidi bija lielākā nekā naftas ķīmijas polioliem.

PRIEKŠLIKUMI

Promocijas darbā aprakstītais pētniecības darbs ir aktualizējis vairākus jautājumus, par kuriem būtu lietderīgi turpināt pētījumus.

Rekomendējami ir pētījumi, kuros tiktu apskatīta pilnīga bioekonomikas un aprites cikla ekonomikas īstenošana, kur arī rapšu salmi kā blakusprodukts tiktu pilnībā izmantoti enerģijas ražošanai vai ķīmisko vielu ieguvei. Rapšu salmu izmantošana dažādās jomās un scenāriji, no kuru ietekmes jāizvairās, var tikt modelēti un izmantoti tālākos ACN pētījumos. To mērķis būtu novērtēt ekoloģiskos raksturlielumus uzlabojošas vides stratēģijas.

Šis pētījums aizsāk to PU materiālu iespējamo ietekmi uz vidi novērtējumu, kuru receptūra izstrādāta, izmantojot biopoliolus. Turpmākie pētījumi ļautu noteikt, kurām PU gala lietojuma jomām rapšu eļļas biopolioli ir vispiemērotākie vides ieguvumu un trūkumu ziņā.

Būtu interesanti un vērtīgi novērtēt enerģijas pieprasījuma izmaiņas, ja biopolioli tiktu ražoti rūpnieciskā līmenī. Noteikti mainītos *CED*, lai arī enerģijas patēriņš poliola sintēzei varētu būt zemāks nekā pilotreaktora mērogā, būtu jārēķinās ar papildu enerģijas patēriņu uz papildu iekārtu, piemēram, sūkņu, darbības rēķina.

Joprojām notiek aktīvas debates par tieša zemes izmantojuma izmaiņām un netieša zemes izmantojuma izmaiņām. Šajā pētījumā šo izmaiņu ietekme netika ņemta vērā. Tomēr būtu interesanti gūt ieskatu par zemes izmantojuma ietekmi uz pašreizējā pētījuma rezultātiem.

Promocijas darbā izstrādātie rezultāti var tikt izmantoti praktiski. ACI rapsim, rapšu eļļai un biopolioliem var implementēt dažādās ACI datubāzēs, kur citi pētnieki un ACN speciālisti var izmantot šos datus saviem pētījumiem. Pētījumu kontekstā, kas tiek veikti Latvijas Valsts koksnes ķīmijas institūtā, iegūtos datus var izmantot citu biopoliolu ACN izstrādāšanai, kas tiek sintezēti, izmantojot dažādas ķīmiskās metodes. Iespējams arī novērtēt izvēlētās ķīmiskās sintēzes metodes ietekmi uz galaprodukta ekoloģiskajiem raksturlielumiem.

IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] Ministry of Agriculture of the Republic of Latvia, *Latvian Bioeconomy Strategy 2030*. Latvia, 2017.
- [2] European Commission, *Innovating for Sustainable Growth: A Bioeconomy for Europe*. COM/2012/60/FINAL. 2012.
- [3] European Commission, *A sustainable Bioeconomy for Europe: Strengthening the connection between economy, society*. COM(2018) 673 final. 2018.
- [4] United Nations, *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*, vol. A/RES/70/1. 2015.
- [5] United Nations / Framework Convention on Climate Change, *Adoption of the Paris Agreement, 21st Conference of the Parties*, no. Paris. 2015.
- [6] ISO, *ISO 14040 International Standard. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*. 2006, p. 46.
- [7] World Commission on Environment and Development, “Brutland Report: Our Common Future,” 1987.
- [8] E. B. Barbier, “The Concept of Sustainable Economic Development,” *Environ. Conserv.*, vol. 14, no. 2, pp. 101–110, 1987.
- [9] S. Spierling *et al.*, “Bio-based plastics – A review of environmental, social and economic impact assessments,” *J. Clean. Prod.*, vol. 185, pp. 476–491, 2018.
- [10] British plastic federation, “Oil Consumption.” [Online]. Available: https://www.bpf.co.uk/Press/Oil_Consumption.aspx. [Accessed: 10-Jul-2019].
- [11] European Commission, *Next Steps for a Sustainable European Future. European Action for Sustainability*, vol. COM(2016)7. 2016.
- [12] H. H. Khoo, W. L. Ee, and V. Isoni, “Bio-chemicals from lignocellulose feedstock: sustainability, LCA and the green conundrum,” *Green Chem.*, vol. 18, no. 7, pp. 1912–1922, 2016.
- [13] L. Montero De Espinosa and M. A. R. Meier, “Plant oils: The perfect renewable resource for polymer science?!” *Eur. Polym. J.*, vol. 47, no. 5, pp. 837–852, 2011.
- [14] European Chemical Industry Council (Cefic), “Accelerating Europe towards a sustainable future,” 2017.
- [15] Central Statistical Bureau of Latvia, “LAG020. Sown area, total crop production, yield of agricultural crops. PxWeb.” [Online]. Available: https://data1.csb.gov.lv/pxweb/en/lauks/lauks__03Augk__ikgad/LAG020.px/table/tableViewLayout1/. [Accessed: 14-Jul-2019].
- [16] J. C. Philp, R. J. Ritchie, and K. Guy, “Biobased plastics in a bioeconomy,” *Trends Biotechnol.*, vol. 31, no. 2, pp. 65–67, 2013.
- [17] M. Ionescu, *Chemistry and Technology of Polyols for Polyurethane*. Smithers Rapra Press, 2008.
- [18] M. Szycher, *Szycher's Handbook of Polyurethanes*, First Edit. CRC Press, 1999.
- [19] P. Furtwengler and L. Avérous, “Renewable polyols for advanced polyurethane foams from diverse biomass resources,” *Polym. Chem.*, vol. 9, no. 32, pp. 4258–4287, 2018.

- [20] PlasticsEurope, “Annual Review 2017–2018,” *Assoc. Plast. Manuf.*, vol. 15, p. 44, 2018.
- [21] Nova Institute, “Bio-based Building Blocks and Polymers – Global Capacities, Production and Trends 2018 – 2023,” no. February, 2019.
- [22] M. A. Alaa, K. Yusoh, and S. F. Hasany, “Pure Polyurethane and Castor Oil Based Polyurethane: Synthesis and Characterization,” *J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 8, no. June, pp. 1507–1515, 2015.
- [23] Z. S. Petrović, L. Yang, A. Zlatanić, W. Zhang, and I. Javni, “Network Structure and Properties of Polyurethanes from Soybean Oil,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 105, no. 5, pp. 2717–2727, 2007.
- [24] A. Prociak, E. Malewska, M. Kurańska, S. Bąk, and P. Budny, “Flexible polyurethane foams synthesized with palm oil-based bio-polyols obtained with the use of different oxirane ring opener,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 115, no. February, pp. 69–77, 2018.
- [25] S. Saalah *et al.*, “Physicochemical Properties of jatropha oil-based polyol produced by a two steps method,” *Molecules*, vol. 22, no. 4, 2017.
- [26] I. Omrani, A. Farhadian, N. Babanejad, H. K. Shendi, A. Ahmadi, and M. R. Nabid, “Synthesis of novel high primary hydroxyl functionality polyol from sunflower oil using thiol-yne reaction and their application in polyurethane coating,” *Eur. Polym. J.*, vol. 82, pp. 220–231, 2016.
- [27] U. Stirna, A. Fridrihsone, B. Lazdiņa, M. Misane, and D. Vilsone, “Biobased Polyurethanes from Rapeseed Oil Polyols: Structure, Mechanical and Thermal Properties,” *J. Polym. Environ.*, vol. 21, no. 4, pp. 952–962, 2013.
- [28] Z. S. Petrovic, “Polyurethanes from vegetable oils,” *Polym. Rev.*, vol. 48, no. 1, pp. 109–155, 2008.
- [29] M. Desroches, M. Escouvois, R. Auvergne, S. Caillol, and B. Boutevin, “From vegetable oils to polyurethanes: Synthetic routes to polyols and main industrial products,” *Polym. Rev.*, vol. 52, no. 1, pp. 38–79, 2012.
- [30] L. Maisonneuve, G. Chollet, E. Grau, and H. Cramail, “Vegetable oils: a source of polyols for polyurethane materials,” *Ocl*, vol. 23, no. 5, p. D508, 2016.
- [31] T. F. Garrison and M. R. Kessler, *Plant Oil-Based Polyurethanes*. Elsevier Inc., 2016.
- [32] B. Leff, N. Ramankutty, and J. A. Foley, “Geographic distribution of major crops across the world,” *Global Biogeochem. Cycles*, vol. 18, no. 1, p. n/a-n/a, 2004.
- [33] R. Shogren, D. Wood, W. Orts, and G. Glenn, “Plant-based materials and transitioning to a circular economy,” *Sustain. Prod. Consum.*, vol. 19, pp. 194–215, 2019.
- [34] R. K. Helling and D. a. Russell, “Use of life cycle assessment to characterize the environmental impacts of polyol production options,” *Green Chem.*, vol. 11, no. 3, p. 380, 2009.
- [35] Cargill, “BiOH® polyol and polymer FAQs | Cargill,” 2019. [Online]. Available: <https://www.cargill.com/bioindustrial/bioh-faqs>. [Accessed: 15-Feb-2019].
- [36] N. Zolkarnain *et al.*, “Evaluation of Environmental Impacts and Ghg of Palm Polyol Production Using Life Cycle Assessment Approach,” no. June, pp. 144–155, 2015.
- [37] M. A. Curran, *Life Cycle Assessment Handbook*. 2012.
- [38] ISO, “ISO 14044 International Standard. Environmental Management-Life Cycle

- Assessment-Requirements and Guidelines.,” *Int. Organ. Stand. (ISO)*, Geneva, Switzerland., 2006.
- [39] M. Huijbregts *et al.*, “Is Cumulative Fossil Energy Demand a Useful Indicator for the Environmental Performance of Products?,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 40, no. 3, pp. 641–648, 2006.
- [40] R. Arvidsson and M. Svanstrom, “A Framework for Energy Use Indicators and Their Reporting in Life Cycle Assessment,” *Integr. Environ. Assess. Manag.*, vol. 12, no. 3, pp. 429–436, 2015.
- [41] Pré Consultants, “ReCiPe,” 2019. [Online]. Available: <https://www.pre-sustainability.com/recipe>. [Accessed: 11-Feb-2019].
- [42] S. Katanenko, “Personal communication with the lead agronomist of Uzvara lauks Ltd.” 2017.
- [43] M. B. Forleo, N. Palmieri, A. Suardi, D. Coaloa, and L. Pari, “The eco-efficiency of rapeseed and sunflower cultivation in Italy. Joining environmental and economic assessment,” *J. Clean. Prod.*, vol. 172, pp. 3138–3153, 2018.
- [44] T. Nemecek and T. Kagi, “Life cycle inventories of Swiss and European agricultural production systems. Final report ecoinvent V.2.0 No. 15a,” *Final Rep. ecoinvent V2.0*, no. 15a, p. 360, 2007.
- [45] S. A. Kārklīņš and A. Ruža, “Lauku kultūraugu mēslošanas normatīvi,” p. 55, 2013.
- [46] IPCC, “N₂O Emissions From Managed Soils, and CO₂ Emissions From Lime and Urea application,” *Guidel. Natl. Greenh. Gas Invent.*, p. 54, 2006.
- [47] R. Köble, “GNOC – Global Nitrous Oxide Calculator,” 2014. [Online]. Available: <http://gnoc.jrc.ec.europa.eu/>. [Accessed: 20-May-2019].
- [48] T. Nemecek and J. Schnetzer, “Methods of assessment of direct field emissions for LCIs of agricultural production systems,” *Agroscope Reckenholz-Tanikon Res. Stn.*, vol. 0, no. 15, p. 34, 2012.
- [49] Blonk Consultants, “Agri-footprint Description of data,” p. 131, 2014.
- [50] State Plant Protection Service, “Volume of produced and imported fertilizers in 2018, in tonnes,” 2018.
- [51] J. Malça, A. Coelho, and F. Freire, “Environmental life-cycle assessment of rapeseed-based biodiesel: Alternative cultivation systems and locations,” *Appl. Energy*, vol. 114, pp. 837–844, 2014.
- [52] J. H. Schmidt, “Life cycle assessment of rapeseed oil and palm oil. Part 3: Life cycle inventory of rapeseed oil and palm oil,” Aalborg University, 2007.
- [53] T. M. Letcher, *Why do we have global warming?* Elsevier Inc., 2019.
- [54] S. Celitane, “Personal communication with representatives from Iecavnieks Ltd.,” 2019.
- [55] W. J. Corré, J. G. Conijn, K. P. H. Meesters, and H. L. Bos, “Accounting for co-products in energy use, greenhouse gas emission savings and land use of biodiesel production from vegetable oils,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 80, pp. 220–227, 2016.
- [56] European Commission – Joint Research Centre, “Definition of input data to assess GHG

- default emissions from biofuels in EU legislation: Version 1c - July 2017,” Publications Office of the European Union, 2017.
- [57] J. B. Guinée, R. Heijungs, and G. Huppes, “LCA Methodology Economic Allocation: Examples and Derived Decision Tree,” vol. 9, no. 1, pp. 23–33, 2004.
 - [58] A. Iriarte, J. Rieradevall, and X. Gabarrell, “Life cycle assessment of sunflower and rapeseed as energy crops under Chilean conditions,” *J. Clean. Prod.*, vol. 18, no. 4, pp. 336–345, 2010.
 - [59] A. Fridrihsone-Girone, U. Stirna, M. Misane, B. Lazdiņa, and L. Deme, “Spray-applied 100% volatile organic compounds free two component polyurethane coatings based on rapeseed oil polyols,” *Prog. Org. Coatings*, vol. 94, 2016.
 - [60] M. Kurańska, A. Prociak, M. Kirpluks, and U. Cabulis, “Polyurethane-polyisocyanurate foams modified with hydroxyl derivatives of rapeseed oil,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 74, pp. 849–857, 2015.
 - [61] M. Kirpluks, U. Cabulis, M. Kurańska, and A. Prociak, “Three Different Approaches for Polyol Synthesis from Rapeseed Oil,” *Key Eng. Mater.*, vol. 559, pp. 69–74, 2013.
 - [62] A. Fridrihsone, F. Romagnoli, and U. Cabulis, “Life Cycle Inventory for winter and spring rapeseed production in Northern Europe,” *J. Clean. Prod.*, vol. 177, pp. 79–88, 2018.
 - [63] Ecoinvent v.3.5, “ecoQuery – Dataset Details (UPR), market for polyol, RER,” 2018. [Online]. Available: <https://v35.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/b3dd6c46-97b2-4710-9cb8-f1e06513af5a/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce>. [Accessed: 24-Apr-2019].
 - [64] M. A. J. Huijbregts *et al.*, “ReCiPe 2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level – Report 1 : characterization,” 2016.
 - [65] L. Badey, N. Lahitte, F. Flenet, and F. Bosque, “French environmental communication on sunflower and rapeseed oils based on life cycle assessment,” *OCL – Oilseeds fats, Crop. lipids*, vol. 20, no. 4, 2013.
 - [66] P. Pawelzik *et al.*, “Critical aspects in the life cycle assessment (LCA) of bio-based materials – Reviewing methodologies and deriving recommendations,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 73, pp. 211–228, 2013.
 - [67] M. Patel, C. Bastioli, L. Marini, and E. Würdinger, “Life-cycle Assessment of Bio-based Polymers and Natural Fiber Composites,” *Biopolym. Online*, 2005.
 - [68] F. Brentrup, J. Küsters, H. Kuhlmann, and J. Lammel, “Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment methodology: I. Theoretical concept of a LCA method tailored to crop production,” *Eur. J. Agron.*, vol. 20, no. 3, pp. 247–264, 2004.
 - [69] R. Itten, R. Frischknecht, and M. Stucki, “Life Cycle Inventories of Electricity Mixes and Grid,” no. June, p. 221, 2014.