RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultāte
Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts

Laura Pastare

Doktora studiju programmas "Vides zinātne" doktorante

AĻĢU IZMANTOŠANAS NOVĒRTĒJUMS BIOGĀZES RAŽOŠANAI LATVIJĀ

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
profesors *Dr. sc. ing.*
FRANCESCO ROMAGNOLI

RTU Izdevniecība
Rīga 2020

Pastare, L. Aļģu izmantošanas novērtējums biogāzes ražošanai Latvijā. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2020. 35 lpp.

Iespiests saskaņā ar Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūta 2020. gada 12. maija lēmumu, protokols Nr. 118.

ISBN 978-9934-22-487-4 (print)
ISBN 978-9934-22-488-1 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora grāda (*Ph. D.*) iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2020. gada 3. septembrī plkst. 14 Rīgas Tehniskās universitātes Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultātē, Āzenes ielā 12 k-1, 115. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

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

Asociētais profesors *Dr. sc. ing. Raimondas Grubliauskas*,
Viļņas Ģedimina tehniskā universitāte, Lietuva

Asociētais profesors *Ph. D. Giuseppe Tomasoni*,
Brešas Universitāte, Itālija

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.

Laura Pastare ..... (paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, tajā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, septiņi pielikumi, 17 attēlu, 16 tabulu, kopā 136 lappuses. Literatūras sarakstā ir 191 nosaukums.

SATURS

IEVADS **5**
Tēmas aktualitāte 5
Darba mērķis un uzdevumi 6
Pētījuma metodika 7
Promocijas darba zinātniskā novitāte 8
Darba praktiskā nozīme 8
Darba aprobācija 9
Promocijas darba struktūra un apraksts 11
1. NOVĒRTĒJUMA METODOLOĢIJAS IZSTRĀDE **12**
1.1. Enerģētiskie kritēriji 14
1.2. Vides kritēriji 15
1.3. Ekonomiskie kritēriji 16
1.4. Kritēriju svaru noteikšana 18
1.5. Daudzkritēriju analīze 18
2. SITUĀCIJAS ANALĪZE **19**
3. REZULTĀTI UN ANALĪZE **22**
3.1. Enerģētiskie kritēriji 22
3.2. Vides kritēriji 24
3.3. Ekonomiskie kritēriji 25
3.4. Kritēriju svari 26
3.5. Daudzkritēriju analīze 27
3.6. Jutības analīze 28
SECINĀJUMI **32**
KOPSAVILKUMĀ IZMANTOTĀ LITERATŪRA **34**

IEVADS

Tēmas aktualitāte

Neņemot vērā to, ka pastāv dažādas teorijas par to, cik daudz fosilo energoresursu ir pieejami, tām visām ir kopīga tendence – atlikušais resursu daudzums ir limitēts un pietiks ierobežotam gadu skaitam (50–100 gadu, atkarībā no resursa veida un vērā ņemtajiem parametriem; Aurora Liquefied Natural Gas Ltd., 2013). Lai nodrošinātu pieaugošo pieprasījumu pēc energoresursiem, rodas nepieciešamība pēc alternatīviem un atjaunojamiem dabas resursiem. Atjaunojamie energoresursi nodrošinātu to, ka pieprasījums tiktu apmierināts un nodrošināts ilgtermiņā. Atjaunojamie energoresursi ir arī oglekļa neitrāli. Oglekļa dioksīda un citu siltumnīcefekta gāzu ietekme uz globālo sasilšanu un klimata pārmaiņām vēl aizvien pasaulē ir plaši debatēta tēma. Neskatoties uz viedokļu atšķirībām arī pasaules līderu vidū, Eiropas Savienība (ES) ir definējusi mērķus gan samazināt siltumnīcefekta gāzu emisijas, gan palielināt atjaunojamo energoresursu īpatsvaru. ES mērķi 2020. gadam (saukti arī par 20-20-20) nosaka trīs galvenos mērķus klimata un enerģētikas jomās:

- par 20 % samazināt siltumnīcefekta gāzu emisijas (salīdzinot ar 1990. gada līmeni);
- 20 % enerģijas gala patēriņa veido atjaunojamie energoresursi;
- 20 % uzlabojums energoefektivitātē (European Commission, 2019).

Nākamajam plānošanas periodam no 2021. līdz 2030. gadam ES klimata un enerģētikas jomās ir definējusi šādus mērķus:

- vismaz par 40 % samazināt siltumnīcefekta gāzu emisijas (salīdzinot ar 1990. gada līmeni);
- vismaz 32 % enerģijas gala patēriņa veido atjaunojamie energoresursi;
- vismaz 32,5 % uzlabojums energoefektivitātē (European Commission, 2019).

ES dalībvalstīm ir iespēja definēt arī augstākus mērķus jebkurā no šīm jomām, izstrādājot nacionālos atjaunojamās enerģijas rīcības plānus ar konkrētiem mērķiem un veidiem, kā tos sasniegt. Latvijas Nacionālais enerģētikas un klimata plāns (NEKP) 2021.–2030. gadam nosaka palielināt atjaunojamo energoresursu īpatsvaru kopējā enerģijas gala patēriņā līdz 45 %. Galvenie rīcības virzieni NEKP mērķu sasniegšanai ietver atjaunojamo energoresursu tehnoloģiju veicināšanu, ilgtspējīgu resursu veicināšanu, dažādu nozaru apsaimniekošanas efektivitātes veicināšanu (Kauliņš, 2019).

Latvijas ilgtspējīgas attīstības stratēģija līdz 2030. gadam un Latvijas bioekonomikas stratēģija 2030. gadam nosaka nepieciešamību pilnvērtīgāk izmantot Latvijā pieejamos dabas resursus. To skaitā ietilpst dažādi atjaunojamie energoresursi, kas jau šobrīd tiek izmantoti, kā arī atbalsts pētniecībai jaunu atjaunojamo energoresursu izpētei. Šajos dokumentos ir minēta arī jūras aļģu izmantošana un pētniecība kā viens no visnepilnīgāk izmantotajiem dabas resursiem Latvijā (Latvijas Republikas Saeima, 2010; Latvijas Republikas Zemkopības ministrija, 2017).

Baltijas jūras piekrastē ik gadu tiek izskalotas aļģes. Izskalotās un nenovāktās aļģes var radīt gan negatīvu ietekmi uz tūrismu (nepatīkamā smaka), gan uz vidi (eitrofikācija,

piekrastes zonu biotopu izmaiņas). Ik gadu tiek izskaloti vairāki tūkstoši tonnu jūras aļģu, kas potenciāli varētu tikt izmantotas kā atjaunojamais energoresurss. Direktīva *EK 2006/7* nosaka, ka atpūtas zonās izskalotās aļģes obligāti ir jānovāc peldēšanas sezonas laikā. Patlaban Latvijā šo problēmu risina pašvaldību līmenī, izskalotās aļģes novācot un nododot kā atkritumus vai aprokot kāpu zonā, vai neko ar tām nedarot (Brūniņa, 2018; European Commission, 2006).

Aļģu augšanas ātrums ir lielāks nekā sauszemes augiem, un tās neaizņem auglīgo aramzemi, tāpēc tām ir liels potenciāls tikt izmantotām kā bioresursam.

Līdzšinējie pētījumi atjaunojamo energoresursu iegūšanā no aļģēm ir fokusēti uz piemērotāko enerģētisko produktu un to ieguves tehnoloģiju pētniecību. Liela daļa pētījumu norāda uz tādiem vājajiem punktiem kā augstas enerģijas intensitātes ražošanas procesi, augstas kapitālizmaksas un ieguldījumi tehnoloģiju ieviešanai. Biogāzes ražošana, no otras puses, ir jau attīstīta tehnoloģija ar mazāku pārstrādes procesu skaitu un mazākām investīcijām (Wiley, Campbell, & McKuin, 2011).

Balstoties uz šo informāciju, biogāzes ražošana no aļģēm ir potenciāls risinājums gan izskaloto aļģu atkritumu jautājuma atrisināšanā, gan atjaunojamo energoresursu īpatsvara gala patēriņa palielināšanā. Esošie pētījumi ir fragmentāri, un, lai gan ir iespējams novērtēt aļģu izmantošanas projektus biogāzes ražošanai no ekonomiskās perspektīvas vai no ietekmes uz vidi aspekta, pietrūkst tādas metodoloģijas, kas ņemtu vērā abus šos aspektus. Pieejamās aļģu sugas un to raksturlielumi atšķiras reģionāli, tāpēc pietrūkst arī uzticamu enerģētisko datu par lokāli pieejamām aļģu sugām. Eksperimentālā enerģētisko vērtību noteikšana ir svarīgs solis, lai novērtētu aļģu izmantošanas potenciālu. Novērtējuma metodika, kas ņemtu vērā gan enerģētiskos, gan vides, gan ekonomiskos aspektus, aizpildītu šo pētniecības metožu trūkumu, lai izvērtētu aļģu projektus biogāzes ražošanai.

Pamatojoties uz ES izvirzītajiem mērķiem klimata un enerģētikas jomā un Latvijas izvirzītajiem rīcības plāniem šo mērķu sasniegšanai, autore promocijas darbā izvirza mērķi izstrādāt biogāzes, kas ražota no aļģēm, novērtējuma metodiku, iekļaujot enerģētiskos aspektus (enerģijas potenciāla novērtēšana), vides aspektus (ietekmes uz vidi novērtējums) un ekonomiskos aspektus (pilna dzīves cikla izmaksu novērtējums).

Darba mērķis un uzdevumi

Darba mērķis ir izveidot, piemērot un izvērtēt metodoloģiju aļģu izmantošanas novērtējumam biogāzes ražošanai. Lai aprobētu metodoloģiju, tiek veikta Latvijas situācijas analīze. Lai sasniegtu mērķi, tika definēti šādi uzdevumi:

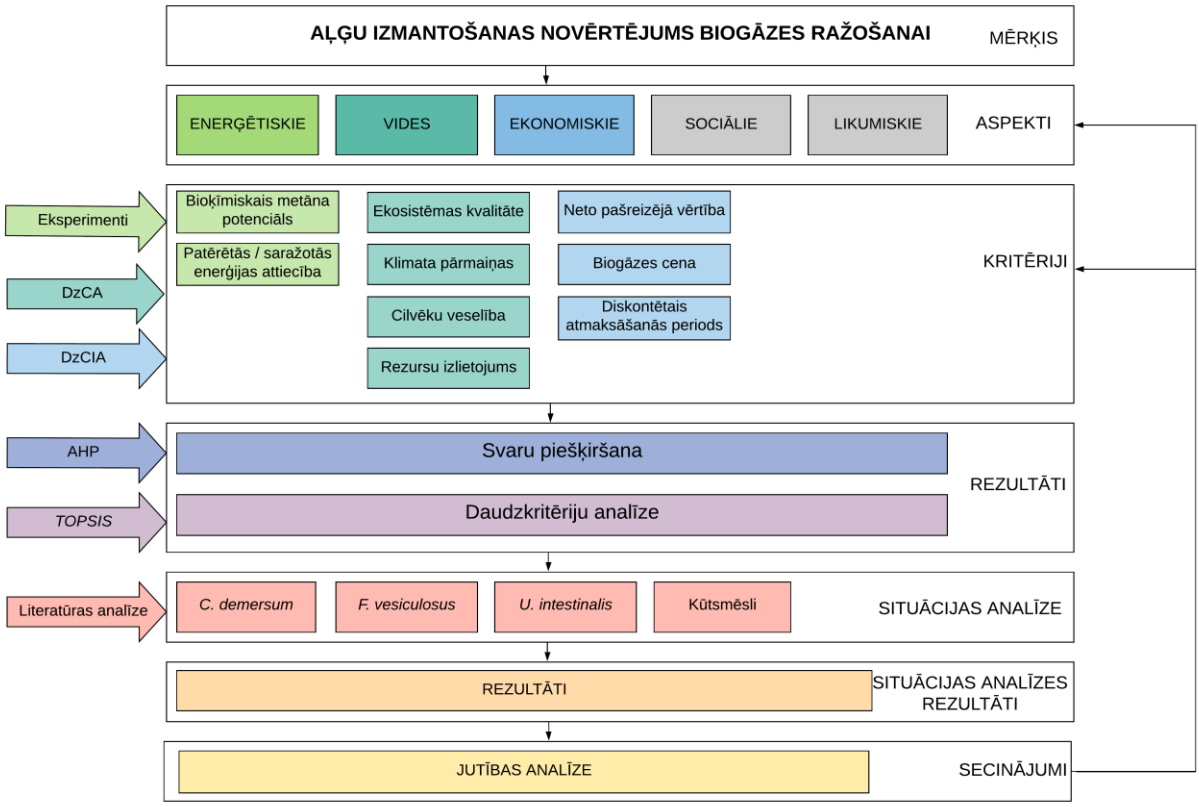
1) veikt aļģu iegūšanas, pārstrādāšanas un izmantošanas procesa un biogāzes ražošanas procesa izpēti;
2) izstrādāt aļģu izmantošanas biogāzes ražošanai novērtējuma metodoloģiju un scenārijus Latvijas situācijas izvērtēšanai:
    a) izstrādāt dizainu eksperimentālai biogāzes potenciāla noteikšanai laboratorijas apstākļos un veikt eksperimentus ar Latvijā pieejamajām aļģēm;
    b) veikt dzīves cikla analīzi un novērtēt izstrādāto scenāriju ietekmi uz vidi;

c) veikt dzīves cikla izmaksu analīzi un novērtēt izstrādāto scenāriju kopējās izmaksas;
d) veikt daudzkritēriju analīzi;

3) salīdzināt izstrādātos scenārijus Latvijas situācijas analīzei un novērtēt izstrādāto metodoloģiju.

Pētījuma metodika

Promocijas darba pamatā ir aļģu izmantošanas biogāzes ražošanai novērtējuma metodoloģijas izstrāde. Lai izstrādātu metodoloģiju un veiktu Latvijas situācijas analīzi, tiek izmantotas gan teorētiskās, gan analītiskās, gan praktiskās analīzes metodes (1. att.).



1. att. Promocijas darbā izstrādātās metodoloģijas uzbūve un galvenās lietotās metodes.

Eksperimenta dizains tiek izmantots, lai plānotu un veiktu eksperimentus, statistiskās analīzes metodes tiek izmantotas, lai analizētu eksperimenta rezultātus. Anaerobās fermentācijas maza mēroga eksperimenti ir balstīti uz Mollera metodi (Møller, Sommer, & Ahring, 2004). Tiek izmantotas arī citas praktiskās metodes. Dzīves cikla analīzes modelēšana programmā *SimaPro* tiek lietota, lai noteiktu ietekmi uz vidi četrās kategorijās: ekosistēmas kvalitāte; klimata pārmaiņas; cilvēku veselība un resursu izlietojums. Ekonomisko kritēriju noteikšanai tiek izmantota dzīves cikla analīze un iekļauta dzīves cikla izmaksu analīzes aprēķinā, lai noteiktu tādus ekonomiskos kritērijus kā neto pašreizējā vērtība, biogāzes cena un diskontētais atmaksāšanās periods. Izmantojot analītiskās hierarhijas procesa metodi, tiek aprēķināti kritēriju svari. Iegūtie kritēriju rezultāti tiek apkopoti ar daudzkritēriju analīzes

TOPSIS metodoloģiju. Lai testētu izveidotās metodoloģijas elastību, tiek veikta jutības analīze.

Promocijas darba zinātniskā novitāte

Promocijas darbam ir augsta zinātniskā vērtība, jo ir izstrādāta jauna metodoloģija aļģu izmantošanas novērtēšanai biogāzes ražošanai. Izstrādātā metodoloģija kombinē eksperimentāli noteiktu aļģu enerģētisko vērtību ar ietekmes uz vidi un izmaksu novērtējumu biogāzes stacijas darbināšanai. Metodoloģija ietver enerģētiskos, vides un ekonomiskos aspektus, izteiktus deviņos kritērijos, kas novērtē scenārijus, ņemot vērā lēmumu pieņēmēju piešķirto svarīgumus.

Darbā izstrādāto modeli var izmantot arī citas valstis un reģioni, lai veiktu pieejamo aļģu sugu novērtējumu biogāzes ražošanai.

Metodoloģijas izmantošana palīdz aizpildīt arī trūkstošo informāciju par aļģu enerģētiskajām vērtībām biogāzes ražošanai vietējā un reģionālā mērogā.

Izstrādātā metodoloģija aprobēta ar Latvijas situācijas analīzi, izmantojot 3 lokāli pieejamas aļģu sugas.

Darba praktiskā nozīme

Jaunu atjaunojamo energoresursu izmantošana ir būtiska, lai sasniegtu ES un Latvijas definētos mērķus klimata un enerģētikas nozarēs 2030. gadam, kā arī lai veicinātu valsts enerģētisko neatkarību. Atjaunojamie energoresursi var palīdzēt nosegt pieaugošo enerģijas patēriņu vai aizstāt fosilos energoresursu.

Darbā izstrādāto modeli un iegūtos rezultātus var izmantot pašvaldību, nacionālās un reģionālās politikas plānošanā, jo tas sniedz padziļinātu ieskatu aļģu kā atjaunojamo energoresursu izvērtēšanā gan no enerģētikas, gan vides, gan ekonomiskajiem aspektiem. Izstrādātā metodoloģija apkopo vairākus aspektus, tāpēc tā var ietaupīt laiku un resursus, veicot plaša mēroga scenāriju analīzi. Izstrādātā metodoloģija ir elastīga un ļauj lēmumu pieņēmējiem un projektu izstrādātājiem likt uzsvaru uz tiem kritērijiem vai aspektiem, kas tiem svarīgāki. Šīs metodoloģijas izmantošana sniedz arī detalizētu ieskatu pašos izstrādātajos scenārijos, ļaujot noteikt to vājos punktus vai vietas, kurās nepieciešami uzlabojumi (gan pašvaldību, gan nacionālajā līmenī).

Novērtējuma metodoloģijas izmantošanas rezultāti sniedz papildu informāciju ne tikai pašiem projektu izstrādātājiem, bet arī citām pašvaldībām, valstīm un reģioniem.

Darbā izveidoto metodoloģiju ir iespējams papildināt, aprobēt un izmantot arī citu alternatīvu substrātu novērtēšanai biogāzes ražošanai.

Darba aprobācija

Promocijas darba rezultāti atspoguļoti zinātniskajās publikācijās

1. Pastare, L., Romagnoli, F. Life Cycle Cost Analysis of Biogas Production from Cerathophyllum demersum, Fucus vesiculosus and Ulva intestinalis in Latvian Conditions. “Environmental and Climate technologies”, 2019, Vol 23, No 2, 257.–270. lpp. Pieejams: doi: 10.2478/rtuect-2019-0067.
2. Pastare, L., Romagnoli, F., Blumberga, D. Comparison of biomethane potential lab tests for Latvian locally available algae. “Energy Procedia”, 2018, Vol 147, 277.–281. lpp. Pieejams: doi: 10.1016/j.egypro.2018.07.092.
3. Romagnoli, F., Pastare, L., Sabūnas, A., Bāliņa, K. Effects of pre-treatment on Biochemical Methane Potential (BMP) testing using Baltic Sea Fucus vesiculosus feedstock. “Biomass and Bioenergy”, 2017, Vol 105, 23.–31. lpp. Pieejams: doi: 10.1016/j.biombioe.2017.06.013.
4. Pastare, L., Aleksandrovs, I., Lauka, D., Romagnoli, F. Mechanical pre-treatment on biological methane potential from marine macro algae: results from batch tests of Fucus vecisulosus. “Energy Procedia”, 2016, Vol 95, 351.–357.lpp. Pieejams: doi: 10.1016/j.egypro.2016.09.021.
5. Pastare, L., Romagnoli, F., Ruģele,K., Dzene, I., Blumberga, D. Biochemical methane potential from anaerobic digestion of the macrphyte Cerathophyllum demersum: a batch test study for Latvian conditions. “Energy Procedia”, 2015, Vol 72, 310.–316. lpp. Pieejams: doi: 10.1016/j.egypro.2015.06.045.
6. Pastare, L., Romagnoli, F., Lauka, D., Dzene, I., Kuznecova, T. Sustainable Use of Macro-Alagae for biogas Production in Latvian Conditions: a Prelimenary Study through an Integrated MCA and LCA Approach. “Environmental and Climate Technologies”, 2014, Vol 13, 44.–56. lpp. Pieejams: doi: 10.2478/rtuect-2014-0006.
7. Pastare L., Romagnoli F., Baltrenaite E. The methodology of evaluating different macroalgae biogas production scenarios with multi-criteria analysis. “Proceedings of the 17th Conference for Junior Researchers “Science – Future of Lithuania””, 2014, Nr.5, pp. 1–8. eISBN: 978-609-457-538-9.

Citas zinātniskās publikācijas

1. Sabunas. A., Romagnoli, F., Pastare, L., Balina, K. Laboratory Algae Cultivation and BMP Tests with Ulva intestinalis from the Gulf of Riga. “Energy Procedia”, 2017. Vol 113, 277.–284. lpp. Pieejams: doi: 10.1016/j.egypro.2017.04.066.
2. Balina, K., Romagnoli, F., Pastare, L., Blumberga, D. Use of macroalgae for bioenergy production in Latvia: review on potential availability of marine coastline species. “Energy Procedia”, 2017, Vol 113, 403.–410. lpp. Pieejams: doi: 10.1016/j.egypro.2017.04.022.

3. Lauka, D., Pastare, L., Blumberga, D., Romagnoli, F. Preliminary analysis of anaerbic digestion process using Cerathophyllum demersum and low carbon content additives: a bacth test study. “Energy Procedia”, 2015, Vol 72, 142.–147.lpp. Pieejams: doi: 10.1016/j.egypro.2015.06.020.
4. Pastare, L., Ozoliņa, L., Blumberga, D. Production of Foliage Extracts. In: International Scientific Conference “Environmental and Climate Tehnologies”: Abstract Book, Latvia, Rīga, 14-16 October, 2013. Riga: RTU Press, 2013, pp. 30–31. ISBN 978-9934-8302-9-7.
5. Pastare, L., Žandeckis, A. Mitruma noteikšana dūmgāzēs (Moisture content evaluation in fluegases). 53rd RTU Student scientific and technical conference proceedings, 2012, pp. 83.–84.

Ziņojumi starptautiskajās konferencēs

1. Pastare, L., Romagnoli, F. Life Cycle Cost Analysis of Biogas Production from Cerathophyllum demersum, Fucus vesiculosus and Ulva intestinalis in Latvian Conditions. International Scientific Conference “Environmental and Climate Tehcnologies”, CONECT 2019, 15–17 May 2019, Riga, Latvia.
2. Pastare, L., Romagnoli, F., Blumberga, D. Comparison of biomethane potential lab tests for Latvian locally available algae. International Scientific Conference “Environmental and Climate Tehcnologies”, CONECT 2018, 16–18 May 2018, Riga, Latvia.
3. Sabunas. A., Romagnoli, F., Pastare, L., Balina, K. Laboratory Algae Cultivation and BMP Tests with Ulva intestinalis from the Gulf of Riga. International Scientific Conference “Environmental and Climate Tehcnologies”, CONECT 2016, 12–14 October 2016, Riga, Latvia.
4. Pastare, L., Aleksandrovs, I., Lauka, D., Romagnoli, F. Mechanical pre-treatment on biological methane potential from marine macro algae: results from batch tests of Fucus vecisulosus. International Scientific Conference “Environmental and Climate Tehcnologies”, CONECT 2015, 14–16 October 2015, Riga, Latvia.
5. Balina, K., Romagnoli, F., Pastare, L., Blumberga, D. Use of macroalgae for bioenergy production in Latvia: review on potential availability of marine coastline species. International Scientific Conference “Environmental and Climate Tehcnologies”, CONECT 2016, 12–14 October 2016, Riga, Latvia.
6. Pastare, L., Romagnoli, F., Ruģele,K., Dzene, I., Blumberga, D. Biochemical methane potential from anaerobic digestion of the macrphyte Cerathophyllum demersum: a batch test study for Latvian conditions. International Scientific Conference “Environmental and Climate Tehcnologies”, CONECT 2014, 14–16 October 2014, Riga, Latvia.

7. Pastare, L., Romagnoli, F., Lauka, D., Dzene, I., Kuznecova, T. Sustainable Use of Macro-Alagae for biogas Production in Latvian Conditions: a Prelimenary Study through an Integrated MCA and LCA Approach. International Scientific Conference "Environmental and Climate Tehcnologies", CONECT 2014, 14–16 October 2014, Riga, Latvia.
8. Lauka, D., Pastare, L., Blumberga, D., Romagnoli, F. Preliminary analysis of anaerbic digestion process using Cerathophyllum demersum and low carbon content additives: a bacth test study. International Scientific Conference "Environmental and Climate Tehcnologies", CONECT 2014, 14–16 October 2014, Riga, Latvia.
9. Pastare L., Romagnoli F., Baltrenaite E. The methodology of evaluating different macroalgae biogas production scenarios with multi-criteria analysis. Proceedings of the 17th Conference for Junior Researchers "Science – Future of Lithuania": 17th Conference for Junior Researchers "Science – Future of Lithuania" = Aplinkos apsaugos inžinerija. 17-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos "Mokslas – Lietuvos ateitis" straipsnių rinkinys, 10 April, 2014. Vilnius, Lithuania.
10. Pastare, L., Ozoliņa, L., Blumberga, D. Production of Foliage Extracts. In: International Scientific Conference "Environmental and Climate Tehnologies", 14–16 October, 2013. Riga, Latvia.
11. Pastare, L., Žandeckis, A. Mitruma noteikšana dūmgāzēs (Moisture content evaluation in fluegases). In 53rd RTU Student scientific and technical conference, 10–12 May 2012, Riga, Latvia.

Monogrāfijas

1. Bažbauers, G., Blumberga, D., Njakou-Djomo, S., Dzene, I., Gušča, J., Kazulis, V., Kļaviņa, K., Kuzņecova, T., Ķeirāne, E., Lauka, D., Muižniece, I., Pastare, L., Piļicka, I., Pubule, J., Rēpele, M., Romagnoli, F. Ecodesign Solutions for Climate Technologies. Rīga: RTU Izdevniecība, 2019. 156 p. ISBN 978-9934-22-104-0.

Promocijas darba struktūra un apraksts

Promocijas darba pamatā ir septiņas tematiski vienotas zinātniskās publikācijas, kas publicētas dažādos zinātniskos žurnālos, pieejamas zinātniskās informācijas krātuvēs un starptautiskās datubāzēs. Šo publikāciju mērķis ir pārnest un aprobēt aļģu izmantošanas novērtējuma metodoloģiju biogāzes ražošanai. Novērtējuma metodoloģijā ietver enerģētiskos, vides un ekonomiskos aspektus.

Promocijas darbā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi, literatūras avotu saraksts, septiņi pielikumi, 17 attēlu, 16 tabulu, kopā – 136 lapaspuses. Literatūras sarakstā ir 60 avotu, taču, ņemot vērā, ka promocijas darbs ir zinātnisko rakstu kopa, kopējais avotu skaits ir 191.

1. NOVĒRTĒJUMA METODOLOĢIJAS IZSTRĀDE

Aļģu izmantošanas projektus ir iespējams novērtēt no ekonomisko rādītāju perspektīvas vai izvērtēt to ietekmi uz vidi, taču pietrūkst tādas novērtēšanas metodoloģijas, kas ņemtu vērā gan enerģētiskos, gan vides, gan ekonomiskos aspektus.

Aļģes kā izejviela biogāzes ražošanai ir salīdzinoši jauns substrāts, tāpēc ir pieejama limitēta informācija par dažādu sugu aļģu enerģētiskajiem rādītājiem. Pat tad, ja ir zināmi konkrētās sugas raksturlielumi vienā reģionā, citā reģionā tie var būt atšķirīgi klimatisko laikapstākļu, ūdens sāļuma līmeņa, pieejamo barības vielu vai citu iemeslu dēļ. Tāpēc ir nepieciešams testēt lokāli pieejamo biomasu, lai noteiktu tās raksturlielumus (kopīgās sausnes saturs, gaistošās sausnes saturs, mitrums u. c.) un enerģētisko vērtību. Enerģētiskā vērtība var būt izteikta kā biogāzes ražība, taču metāna saturs biogāzē var atšķirties, tāpēc tīrais metāna saturs sniedz precīzāku informāciju par substrātu enerģētisko vērtību. Bioķīmiskais metāna potenciāls (BMP) ir metāna daudzums, kas tiek saražots no viena kilograma substrāta gaistošās sausnes. Vairāk informācijas – 1.1. apakšnodaļā.

Daudziem jauniem atjaunojamo energoresursu projektiem patērētās un saražotās enerģijas attiecība (EA) ir vājais punkts, un tam būtu jāpievērš uzmanība, lai nodrošinātu, ka netiek patērēts vairāk enerģijas nekā tiek saražots. Vairāk informācijas – 1.1. apakšnodaļā.

Atjaunojamo energoresursu projektiem bieži vien tiek veikta analīze, lai noteiktu ietekmi uz vidi. Šī novērtējuma modelēšanai tiek izmantota dzīves cikla analīze (DzCA). Dzīves cikla modelēšana tiek veikta programmā *SimaPro 8*, izmantojot ietekmes novērtēšanas metodoloģiju *IMPACT2002+*. Šī metode ietekmi uz vidi iedala četrās ietekmes kategorijās: ekosistēmas kvalitāte; klimata pārmaiņas; cilvēka veselība; resursu izlietojums. Vairāk informācijas – 1.2. apakšnodaļā.

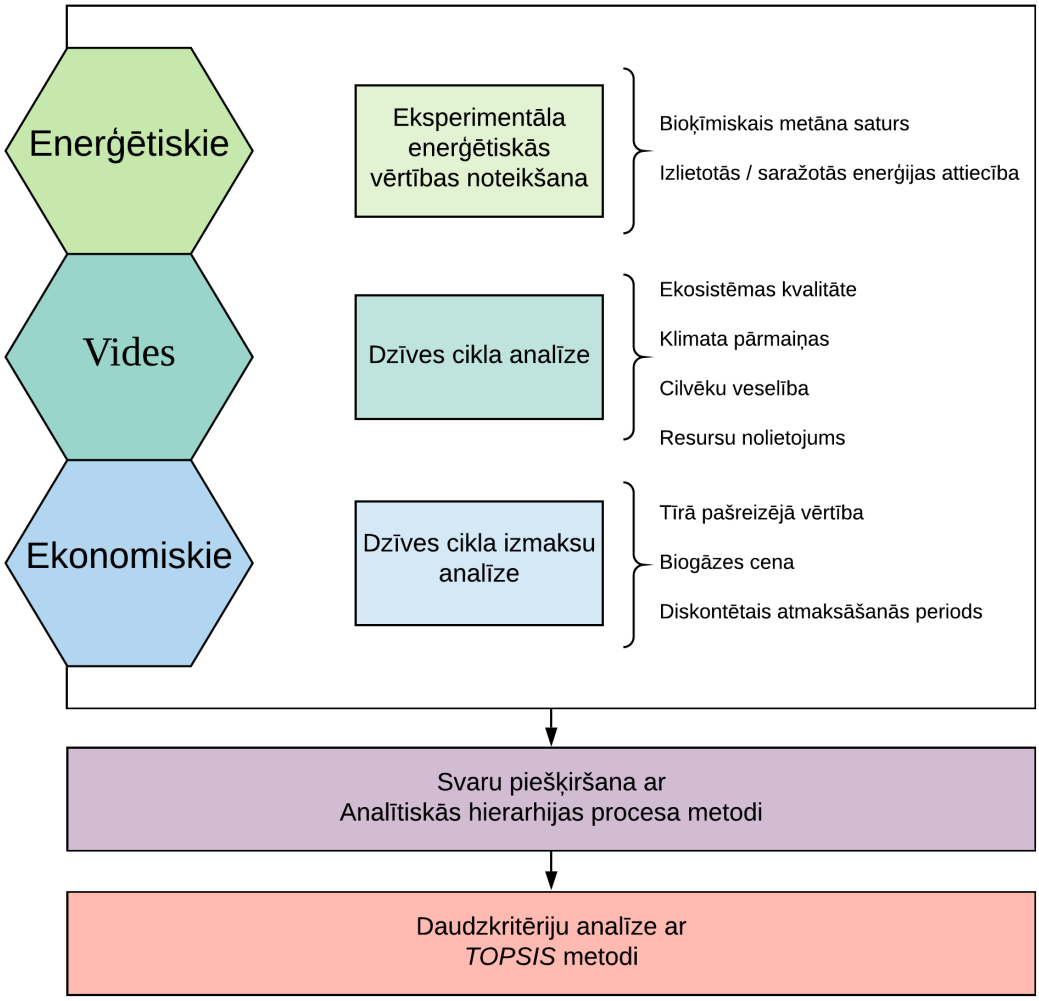
Ir pieejamas dažādas metodes, kā novērtēt projektu izdevīgumu. Dzīves cikla izmaksu analīze (DzCIA) ņem vērā sākotnējos ieguldījumus, visas darbības un uzturēšanas izmaksas, darbinieku izmaksas, apdrošināšanas izmaksas un citas saistošās izmaksas. Visa projekta naudas plūsma tiek modelēta, un tā rezultātā var aprēķināt neto pašreizējo vērtību (NPV) un diskontētās atmaksāšanās periodu (DAP). Biogāzes cena (BC) ir kritērijs, kas parāda biogāzes saražošanas izmaksas visā dzīves cikla laikā uz vienu biogāzes vienību. Šie trīs kritēriji kopumā sniedz gana plašu ieskatu par projektu, lai varētu novērtēt tā izdevīgumu un tos salīdzināt gan savstarpēji, gan ar esošiem projektiem. Vairāk informācijas – 1.3. apakšnodaļā.

Sociālie un likumiskie aspekti šajā novērtējuma metodoloģijā netiek iekļauti. Likumiskie aspekti netiek iekļauti, jo nav metodoloģijas, kas spētu kvantificēt likumiskos ierobežojumus un aizliegumus. Likumiskie aspekti būtu jāanalizē atsevišķi, un tiem būtu jāiekļauj gan biogāzes stacijas darbināšanas saistošie aspekti, gan piekrastes zonā izskaloto aļģu un dabīgi augušo aļģu savākšanas saistošie aspekti. Sociālie aspekti šajā metodoloģijā nav iekļauti, jo aļģu biomasas savākšanas un biogāzes stacijas vietas šajā novērtējuma metodoloģijā netiek izvēlētas. Ja šīs novērtējuma metodoloģijas rezultāti ir apmierinoši un ir potenciāls veiksmīgai aļģu izmantošanai, lai ražotu biogāzi, sociālie un likumiskie aspekti būtu jāizskata nākamajā projekta izstrādes stadijā.

Daļa no izvēlētajiem kritērijiem projekta īstenotājiem var būt svarīgāka par citiem, tāpēc ir iespējams katram kritērijam piešķirt svaru. Svara piešķiršanai tiek izmantota analītiskā hierarhijas procesa (AHP) metodoloģija. Vairāk informācijas – 1.4. apakšnodaļā.

Novērtējuma metodoloģijas pamatā izvēlēta daudzkritēriju analīze, kas pēc būtības ir viegli ieviešama, pieļauj svaru izmantošanu kritērijiem, iekļauj vairākas dimensijas un ir caurskatāma. Daudzkritēriju analīze ļauj analizēt reālās pasaules problēmas caur integrētu, elastīgu un reālistisku metodoloģiju.

Balstoties uz piešķirtajiem svariem un kritēriju vērtībām, izvēlētie scenāriju savstarpēji tiek salīdzināti ar *TOPSIS* (angļu val. – *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) metodoloģiju. 1.1. attēlā redzama izstrādātās metodoloģijas vispārīgā shēma.



1.1. att. Izstrādātās metodoloģijas vispārīgā shēma.

Detalizētāks izmantoto metožu apraksts kritēriju vērtību aprēķināšanai sniegts turpmākajās nodaļās.

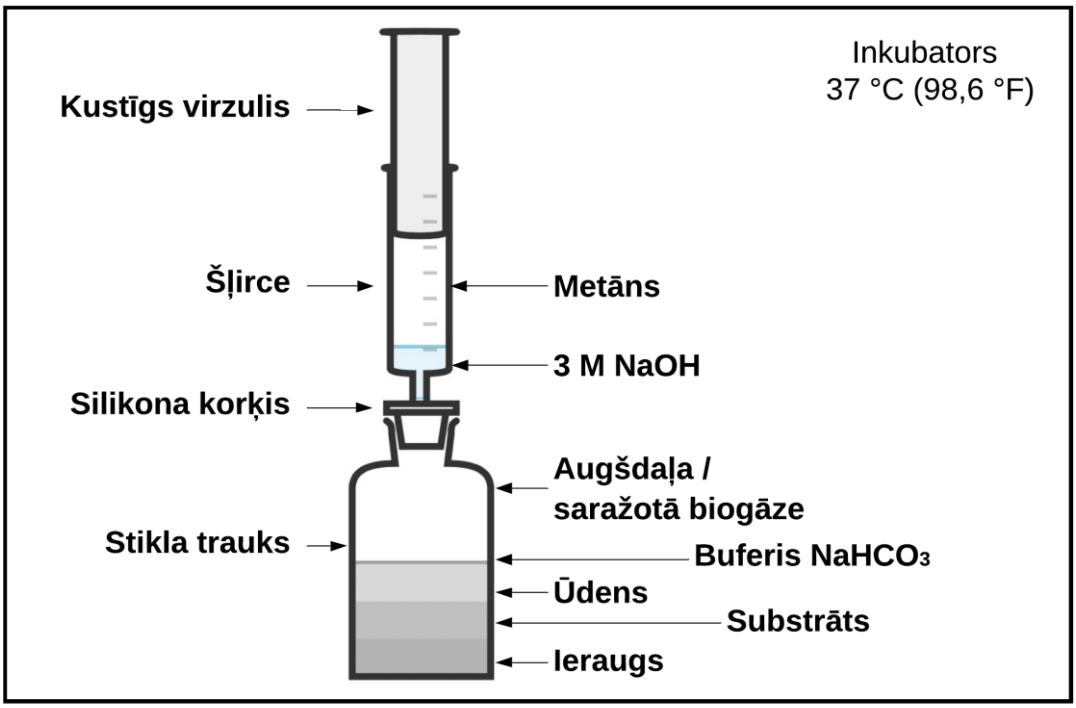
1.1. Enerģētiskie kritēriji

Lai noteiktu bioķīmisko metāna potenciālu (BMP), ar izvēlētajām aļģu sugām tika veikta eksperimentu sērija. Eksperimentos tika noteikta ne tikai substrātu BMP vērtība, bet arī to raksturlielumi, pētītas piemērotākās priekšapstrādes metodes, noteiktas piemērotākās substrātu un ierauga attiecības un novērtēta piedevu nepieciešamība.

Eksperimenti tika veikti vairākos posmos: eksperimenta plānošana; substrāta rādītāju noteikšana; biogāzes testi; rezultātu analīze. Eksperimentu plānošana tika veikta saskaņā ar eksperimenta dizaina metodoloģiju (Eriksson, Johansson, Wold, Wikstrom, & Wold, 2001). Rādītāji, ko nosaka pirms biogāzes testa, ir mitruma saturs, gaistošā sausne (GS) un kopīgā sausne (KS), ko nosaka, gan testētajam substrātam, gan ieraugam.

Kopīgā sausne un gaistošā sausne tiek noteikta ar ASV Vides aizsardzības aģentūras izstrādāto metodoloģiju Nr. 1684. (US Environmental Protection Agency, 2001)

Biogāzes testi tika veikti maza mēroga partijās, nodrošinot mezofīlus (37 °C vai 98,6 °F) fermentācijas apstākļus. Eksperimenti veidoti pēc Mollera metodes, mērījumi veikti ar šļirces metodi, un CO_2 adsorbcija tiek izmantota, lai noteiktu metāna saturu (Hansen et al., 2004; Møller, Sommer, & Ahring, 2004; Pham, Triolo, Cu, Pedersen, & Sommer, 2013). Katrs paraugs satur ūdeni, ieraugu (no notekūdeņu attīrīšanas stacijas), testējamo substrātu, buferi un tiek skalots ar oglekļa dioksīda vai slāpekļa gāzi. Saražotās gāzes mērījumi tika veikti izmantojot šļirci ar kustināmu virzuli, pildītu ar 3M NaOH šķīdumu (lai izšķīdinātu CO_2 no biogāzes). Biogāzes tests tika turpināts 30 dienas vai līdz paraugi neražo biogāzi četras dienas pēc kārtas. Mērījumu veikšanas shēma redzama 1.2. attēlā.



1.2. att. Maza mēroga biogāzes testa un BMP mērījumu veikšanas shēma.

BMP eksperimentāli iegūtās vērtības aprēķina ar 1.1. vienādojumu:

$$B_{\mathrm{SAMPLE}} = \frac{B_{\mathrm{TOAL}} - B_{\mathrm{INOCULUM}}}{1000 VS_{\mathrm{SAMPLE}}}, \tag{1.1.}$$

kur

B_{SAMPLE} – bioķīmiskais metāna potenciāls paraugam, L CH_4/kg_{GS};

B_{TOTAL} – izmērītais kopējais metāna daudzums paraugā, mL CH_4;

B_{INOCULUM} – izmērītais kopējais metāna daudzums tīrā ierauga paraugā, mL CH_4;

VS_{SAMPLE} – gaistošās sausnes saturs paraugā, kg.

Eksperimentu rezultāti tika analizēti, izmantojot *ANOVA* statistisko testēšanu un citas statistiskās metodes (Smalheiser, 2017). Vairāk informācijas par eksperimentiem – Pastare, Aleksandrovs, Lauka un *Romagnoli* (2016); Pastare, *Romagnoli* un Blumberga (2018); Pastare, *Romagnoli*, Rugele, Dzene un Blumberga (2015); *Romagnoli*, Pastare, Sabūnas, Bāliņa un Blumberga (2017).

Balstoties uz BMP eksperimentos iegūtajām vērtībām, dzīves cikls izvēlētajiem scenārijiem var tikt modelēts. Maksimālais pieejamais substrāta daudzums ir ierobežots, tāpēc BMP vērtībām ir liela ietekme uz to, kādas jaudas un izmēra biogāzes stacija ir nepieciešama. Balstoties uz izveidotajiem modeļiem, patērētās-saražotās enerģijas attiecību (EA) var aprēķināt šādi:

$$ER = \frac{E_{\mathrm{STORAGE}} + E_{\mathrm{PRE\text{-}TREATMENT}} + E_{\mathrm{DIGESTION}} + E_{\mathrm{CLEANING}} + E_{\mathrm{CHP}}}{E_{\mathrm{PRODUCED}}}, \tag{1.2}$$

kur

E_{STORAGE} – kopējā patērētā siltumenerģija un elektroenerģija uzglabāšanai, MWh gadā;

$E_{\mathrm{PRE\text{-}TREATMENT}}$ – kopējā patērētā siltumenerģija un elektroenerģija priekšapstrādei, MWh gadā;

$E_{\mathrm{DIGESTION}}$ – kopējā patērētā elektroenerģija un siltumenerģija fermentācijai, MWh gadā;

E_{CLEANING} – kopējā patērētā elektroenerģija un siltumenerģija biogāzes attīrīšanai, MWh gadā;

E_{CHP} – kopējā patērētā siltumenerģija un elektroenerģija koģenerācijas stacijas darbināšanai, MWh gadā;

E_{PRODUCED} – kopējā saražotā elektroenerģija un siltumenerģija, MWh gadā.

Patērētā degviela transportēšanas vajadzībām nav iekļauta kritērija EA aprēķinā.

1.2. Vides kritēriji

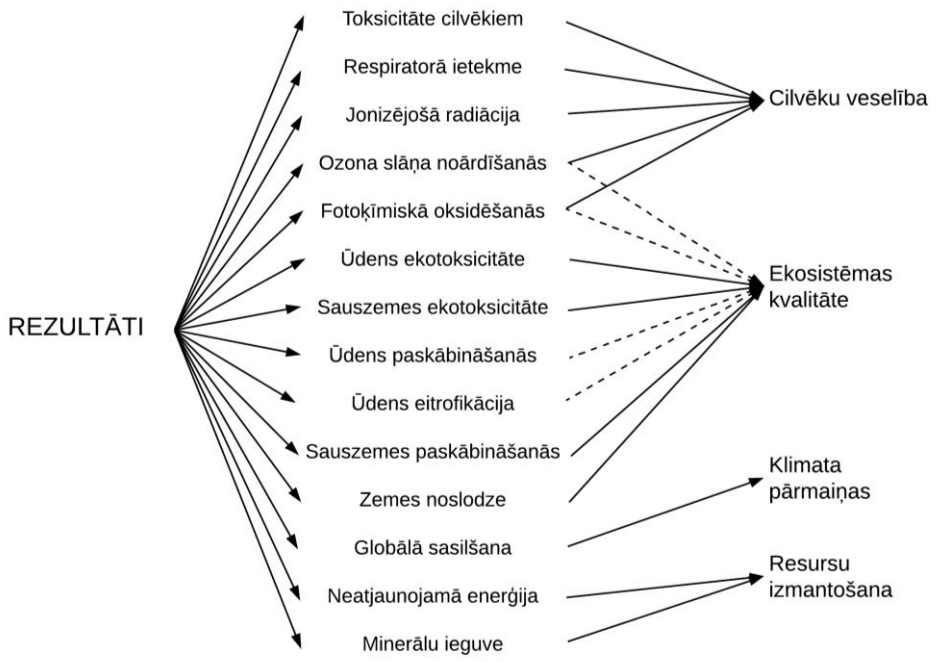
Dzīves cikla analīze ir vides pārvaldības rīks, kas ļauj izprast un kvantificēt sarežģītās vides ietekmju attiecības visos dzīves cikla posmos. Ietekmes uz vidi noteikšanai tiek izmantota programma *SimaPro 8*.

Programmā tiek izmantota aprēķinu metodika *IMPACT2002+*. Šī metodika izsaka rezultātus 14 apakškategorijās, kas tiek apkopotas četrās galvenajās kategorijās:

- ekosistēmas kvalitāte (EK) – izteikta potenciāli pazūdošo sugu frakcijās uz m^2 gadā (PPSF/m^2 gadā). EK rezultāts 0,2 PPSF/m^2 gadā norāda uz 20 % sugu zudumu vienam m^2 zemes virsmas viena gada laikā;

- klimata pārmaiņas (KP) – izteiktas kā kg CO_2 ekvivalents;
- cilvēka veselība (CV) – izteikta kā invaliditātes ietekmētie dzīves gadi (IIDzG), kas raksturo slimību nopietnību, ņemot vērā gan zaudētos dzīves gadus, gan gadus ar samazinātu dzīves kvalitāti, piemēram, CV rezultāts 3 IIDzG norāda, ka ir trīs zaudēti dzīves gadi visai populācijai (nevis vienam cilvēkam);
- resursu izlietojums (RI) – izteikts MJ, mēra nepieciešamo enerģiju resursu iegūšanai (Goedkoop, Oele, de Schryver, & Vieira, 2008; Goedkoop, Oele, Leijting, Ponsioen, & Meijer, 2013).

1.3. attēlā redzami aprēķina metodikas *IMPACT2002+* kritēriji.



1.3. att. Dzīves cikla analīzes aprēķina metodikas *IMPACT2002+* kritēriji (Goedkoop et al., 2008).

Scenāriju modeļu robežas, lielumu vērtības un pieņēmumi sīkāk aprakstīti 2. nodaļā, kā arī šajās publikācijās – Pastare un *Romagnoli* (2019); Pastare, *Romagnoli*, Lauka, Dzene un Kuznecova (2014).

Dzīves cikla analīzes funkcionālā vienība ir biogāzes stacijas darbināšana vienu gadu, saražojot 2190 MWh elektroenerģijas un 3942 MWh siltumenerģijas. Kopējais nepieciešamais biomasas daudzums katram scenārijam būs atšķirīgs, ņemot vērā substrātu raksturlielumus (GS, KS, BMP).

1.3. Ekonomiskie kritēriji

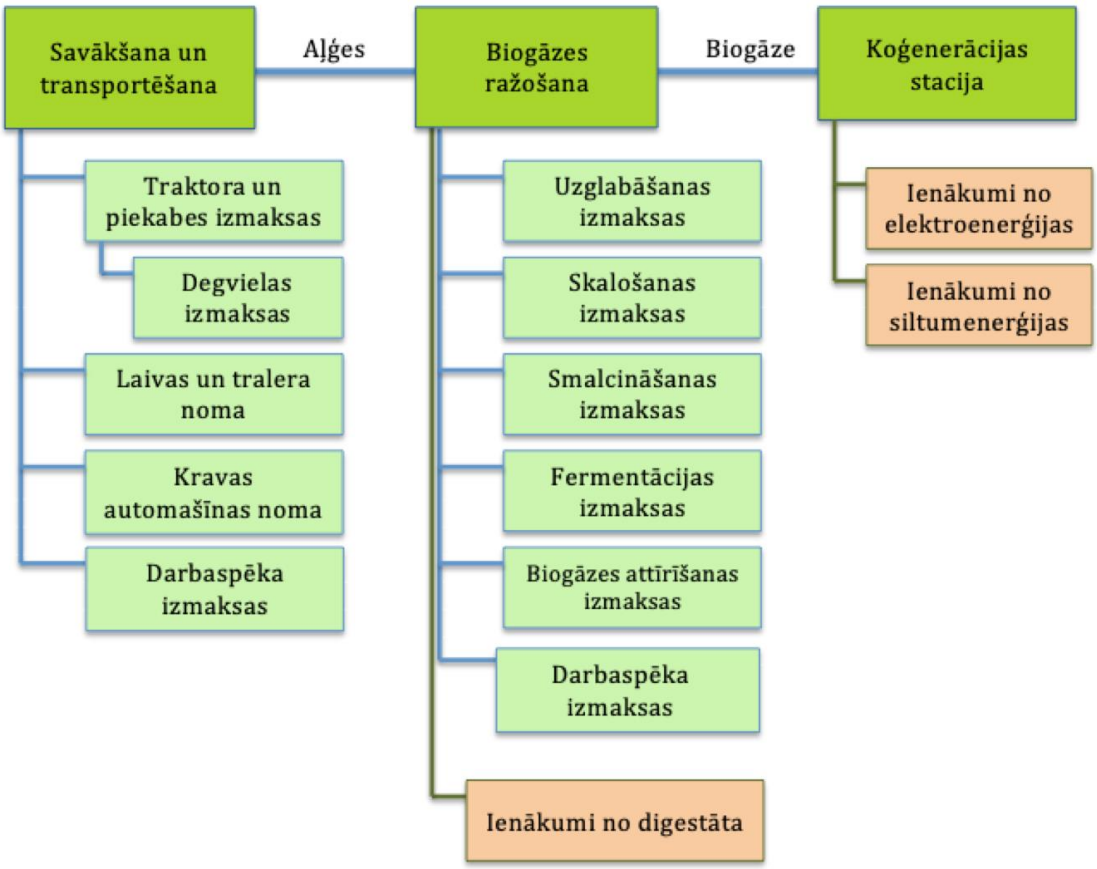
Dzīves cikla izmaksu analīze ir plaši izmantota metodoloģija, lai analizētu un novērtētu plaša spektra projektus. Metodoloģijas mērķis ir nodrošināt ekonomisko aprēķinu bāzi, lai iekļautu diskontētās naudas plūsmas projekta dzīves laikā.

Viens no dzīves cikla izmaksu analīzes pamatrādītājiem ir neto pašreizējā vērtība (NPV) jeb starpība starp ienākošajām un izejošajām naudas plūsmām, ieskaitot sākotnējos ieguldījumus.

Biogāzes cena ir kritērijs, ko var izmantot analizējamo scenāriju salīdzināšanai ar reālo tirgus situāciju. Šajā gadījumā biogāzes cena parāda 0 zaudējumu punktu, ņemot vērā biogāzes ražošanas izmaksas, biogāzes un citus ieņēmumus, vidēji visa dzīves cikla laikā. Biogāzes cena tiek rēķināta pārdošanai, tāpēc aprēķinos nav ņemts vērā koģenerācijas stacijas ieguldījumu un darbināšanas izmaksas.

Diskontētais atmaksāšanās periods (DAP) parāda nepieciešamo laiku gados, lai atgūtu sākotnējos ieguldījumus projektā, ņemot vērā diskontētās naudas plūsmas.

Galvenās izmaksas projekta dzīves laikā ir izstrāde un licencēšana, kapitālieguldījumi, darbināšanas un uzturēšanas izmaksas. Sīkāks darbināšanas un uzturēšanas izmaksu iedalījums redzams 1.4. attēlā.



1.4. att. Darbināšanas un uzturēšanas izmaksu iedalījums.

Ienākumi projektā rodas digestāta pārdošanas, kā arī elektroenerģijas un siltumenerģijas tirdzniecības rezultātā. Pirmos 10 gadus elektroenerģija tiek pārdota ar paaugstināta iepirkuma cenu. Scenāriju modeļu robežas, lielumu vērtības un pieņēmumi sīkāk aprakstīti 1.1. apakšnodaļā un publikācijā Pastare & Romagnoli, 2019.

1.4. Kritēriju svaru noteikšana

Kritēriju svaru piešķiršana ir svarīgs daudzkritēriju analīzes elements, jo projektā ieinteresētajām pusēm var būt atšķirīgs viedoklis par katra kritērija nozīmīgumu. Analītiskās hierarhijas process (AHP) ir metodoloģija, kas katra kritērija relatīvo svarīgumu (svaru) iegūst no kritēriju pāru salīdzinājumiem. Šī metodoloģija ļauj izteikt neatkarīgus kritēriju nozīmīguma vērtējumu un apkopot tos kvantitatīvā veidā.

Lai piešķirtu svarus, tiek veikta kritēriju pāru salīdzināšana tabulas veidā (ortogonāls masīvs). Katrs pāris tiek vērtēts pēc svarīguma skalas no 1 līdz 9 – 1 tiek piešķirts, ja kritērijiem ir vienāda nozīme, 9, ja attiecīgais kritērijs ir absolūti svarīgāks par otru. Pēc visu vērtējumu izteikšanas svari tiek normalizēti, un ņemta vērā to vidējā vērtība, lai iegūtu katra kritērija gala svaru (Munier, 2004; Saaty, 1990).

1.5. Daudzkritēriju analīze

Daudzkritēriju analīzes veikšanai izvēlēta *TOPSIS* (angļu val. – *Technique of Order Preference Similarity to the Ideal Solution*) metodoloģija. Tā nosaka relatīvo tuvumu līdz pozitīvajam-ideālajam risinājumam un attālumu līdz negatīvajam-ideālajam risinājumam. Balstoties uz šiem attālumiem, tiek izvēlēta piemērotākā alternatīva ar lielāko līdzību pozitīvajam-ideālajam risinājumam.

TOPSIS metodoloģija balstās uz pieciem aprēķina soļiem. Pirmais solis ir apkopot datus par izvēlētajiem scenārijiem un visiem kritērijiem. Tālāk šie dati tiek normalizēti otrajā solī. Nākamie soļi ir piešķirt svarus normalizētajām vērtībām un aprēķināt attālumus līdz pozitīvajam-ideālajam un negatīvajam-ideālajam risinājumam. Rezultātā tiek aprēķināts tuvums, ko ietekmē šie abi attālumi (Ishizaka & Nemery, 2013; Kahraman, Yasin Ateş, Çevik, Gülbay, & Ayça Erdoğan, 2007; Lu, Zhang, Ruan, & Wu, 2007).

Relatīvais tuvums vienmēr būs robežās no 0 līdz 1, kur 1 ir vēlamais rezultāts. Jo tuvāk alternatīva ir vērtībai 1, jo tuvāk tā ir ideālajam risinājumam un tālāk no antiideālā risinājuma (Ishizaka & Nemery, 2013).

2. SITUĀCIJAS ANALĪZE

Daudzas no Baltijas jūras valstīm piekrastēs zonās saskaras ar eitrofikācijas problēmām. Sezonāli piekrastēs tiek izskalotas jūras zāles, un valstīm jāmeklē risinājumi, kā tās novākt, lai izvairītos no negatīvas ietekmes uz piekrastes ekosistēmu (Brūniņa, 2018). Pēc izskaloto aļģu novākšanas un transportēšanas prom no piekrastes zonas ir vairākas alternatīvas, kā atbrīvoties no šīs biomasas. Latvijā atsevišķās pašvaldībās aļģes tiek kompostētas, bet lielākoties tās tiek noglabātas atkritumu poligonos. Vietās, kur izskalots neliels daudzums aļģu, tās tiek apglabātas piekrastes zonās vai atstātas neaiztiktas.

Pieaugoša problēma vietās ar attīstītu lauksaimniecību ir arī eitrofikācija saldūdens ūdenstilpnēs. Paaugstinātais biomasas (aļģu un makrofītu) daudzums neizskalojas krastā, un var rasties nepieciešamība to novākt manuāli, lai saglabātu esošo ekosistēmu ūdenstilpnēs un izvairītos no ūdenstilpņu aizaugšanas.

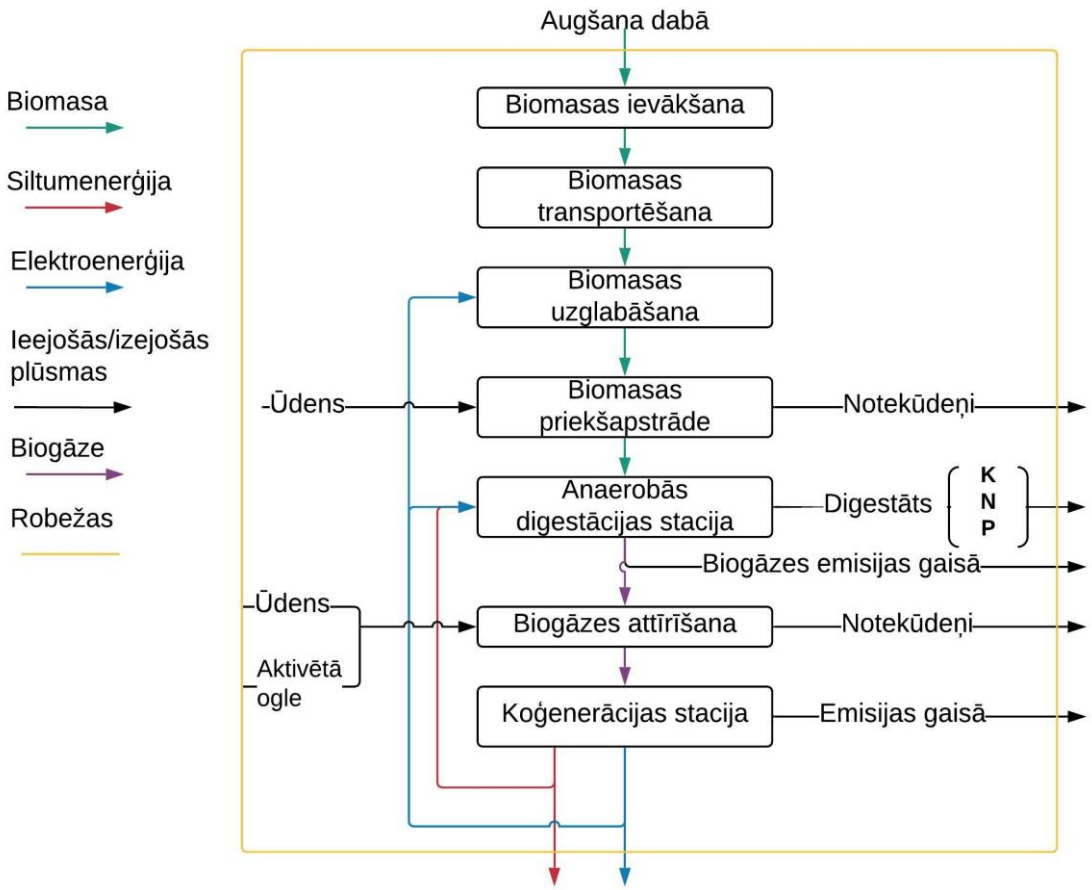
Eitrofikācija ir problēma daudzos reģionos, un tai nav ātra risinājuma, tāpēc ir jāmeklē iespējas ne tikai, kā atbrīvoties no šīs biomasas, bet arī – kā šo biomasu izmantot. Balstoties uz literatūras apskatu, biogāzes ražošana no pārmērīgā biomasas daudzuma varētu būt potenciāli izdevīgs risinājums. Lai novērtētu biogāzes ražošanu no aļģēm, ir izstrādāta metodoloģija un definēti scenāriji situācijas analīzei Latvijā.

Scenāriji ir izstrādāti, balstoties uz izskaloto sālsūdens aļģu un pieejamo saldūdens aļģu izpēti Latvijā. Scenāriju izstrādē ir ņemtas vērā pieejamas un reģionāli izmantotas tehnoloģijas. Balstoties uz literatūras analīzi, kopumā izstrādāti četri scenāriji, kuru pamatā ir pieejamās aļģu sugas un vietējie substrāti – sālsūdens brūnaļģe *Fucus Vesiculosus*, sālsūdens zaļaļģe *Ulva intestinalis*, saldūdens makrofīts *Cerathophyllum demersum* un liellopu kūtsmēsli (kā bāzes scenārijs).

Novērtējuma metodikas ietvara robežas sākas ar aļģu savākšanu un beidzas ar saražoto/pārdoto siltumenerģiju un elektroenerģiju. Būvniecības un nojaukšanas etapi novērtējumā nav iekļauti.

Scenārijos, kas balstās uz aļģu izmantošanu, tās aug dabīgi, atklātās ūdenstilpnēs un tiek ievāktas no ūdenstilpnēm vai piekrastes zonas Baltijas jūras vai Rīgas jūras līča piekrastē. Aļģu novākšana tiek veikta pēc aļģu ziedēšanas perioda (parasti no jūlija līdz novembrim). Jūras aļģes tiek novāktas ar specializētiem nelieliem traktoriem ar ķemmes tipa savācēju, kas aļģes spēj savākt gan no sauszemes, gan no sekliem ūdeņiem (maksimums 1,2 m no krasta). Laiva un traleris tiek izmantoti, lai savāktu saldūdens aļģes no ūdenstilpnēm. Bāzes scenārijā kūtsmēslu savākšana netiek ņemta vērā, jo šī darbība tiek veikta neatkarīgi no tā, vai kūtsmēsli pēc tam tiek izmantoti biogāzes ražošanai vai nē. Scenārijos, kas balstās uz aļģu izmantošanu, vidējais attālums no aļģu savākšanas vietas līdz biogāzes stacijai ir pieņemts kā 100 km. Ar dīzeli darbināma kravas automašīna ar kravnesību 10–20 tonnas veic savāktās biomasas piegādi no savākšanas vietām uz biogāzes staciju ar noslodzes koeficientu visai transportēšanai 50 %. Bāzes scenārija gadījumā attālums no kūtsmēslu iegūšanas vietas līdz biogāzes stacijai ir pieņemts kā mazāks par 1 km. Lai nogādātu kūtsmēslus uz biogāzes staciju, tiek izmantota cauruļvadu sistēma.

Pēc transportēšanas uz biogāzes staciju aļģu biomasa tiek uzglabāta telpās, kur ir nodrošināta 4 °C (39 °F) temperatūra. Izejvielas, kūtsmēsli un digestāts tiek uzglabāts katrs savā telpā, dzesēta tiek tikai aļģu biomasas novietne. Priekšapstrāde iekļauj sālsūdens aļģu mazgāšanu no smiltīm un sāls. Mazgāšana tiek veikta ūdens tvertnēs ar sietiem. Smalcināšana tiek veikta visām aļģu sugām. Kūtsmēsliem netiek piemērota priekšapstrāde. Aļģes tiek fermentētas ar kūtsmēsliem attiecībā 1 : 5 (balstoties uz gaistošo sausni), lai uzlabotu fermentācijas tempu. Fermentācija notiek mezofīlijā temperatūras režīmā 37 °C (98,6 °F). Elektroenerģijas un siltumenerģijas vajadzības fermentācijas procesa nodrošināšanai tiek iekļautas parazītiskajā enerģijas patēriņā (7 % no saražotās elektroenerģijas un 30 % no saražotās siltumenerģijas). Tiek pieņemts, ka fermentācijas laikā rodas biogāzes emisijas 1 % apmērā no kopīgā saražotā biogāzes apjoma. Pēc fermentācijas procesa pāri paliekošais digestāts var tikt izmantots kā šķidrais mēslojums. Digestāts satur 1,8 % slāpekļa (N_2 formā), 1,0 % fosfāta (P_2O_5 formā) un 0,9 % kālija (K_2O formā). Pēc biogāzes saražošanas tā tiek attīrīta ar slapjās adsorbcijas metodi (ar aktivēto ogli), lai samazinātu sēra savienojumu, mitruma un citu piemaisījumu daudzumu biogāzē. Pēc attīrīšanas biogāze tiek sadedzināta koģenerācijas stacijā ar siltumenerģijas un elektroenerģijas attiecību 1,8 : 1 (64 % saražotās enerģijas ir siltumenerģija, 36 % – elektroenerģija).



2.1. att. Vispārīgā aļģu izmantošanas shēma biogāzes ražošanai.

Izvēlētā biomasa aug dabiskos apstākļos un tiek ievākta no dabas, tāpēc biomasas apjoms, kas katru gadu pieejams savākšanai, ir limitēts. Sālsūdens aļģes tiek izskalotas krastā, tāpēc to pieejamais daudzums tiek aprēķināts, balstoties uz vidējo aļģu saneses daudzumu piekrastes zonā (25 kg/m) un ņemot vērā piekrastes zonas garumu (Holden et al., 2018). Tiek pieņemts, ka saldūdens biomasa ir pieejama tādā pašā apjomā un biomasas sastāvs visu gadu ir homogēns. Vairāk detaļu par aprēķiniem un pieņēmumiem skatīt publikācijās – Pastare un *Romagnoli* (2019); Pastare, *Romagnoli* un Baltrenaite (2014); Pastare, *Romagnoli*, Lauka u. c. (2014).

3. REZULTĀTI UN ANALĪZE

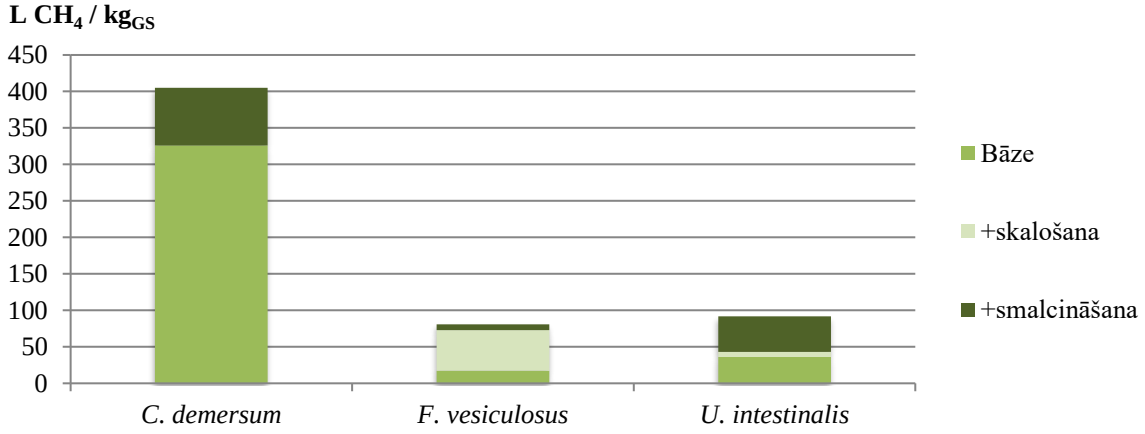
3.1. Enerģētiskie kritēriji

Tika veikti vairāki eksperimentu atkārtojumi, lai noteiktu labāko faktoru kombināciju katrai no aļģu sugām. Testētie faktori ietver substrāta un ierauga attiecību (1 : 3, 1 : 5 un 1 : 10), priekšapstrādes metodes (skalošana, smalcināšana, mikroviļņu lietojums un to kombinācijas). Šo eksperimentu rezultāti ir atspoguļoti 2.–5. publikācijā.

Eksperimenti ar *C. demersum* parādīja – jo lielāka ierauga attiecība paraugā, jo lielāks daudzums biogāzes tiek saražots. Kad nozīmības līmenis $\alpha = 0{,}05$, BMP vērtības pieaugums par +20 L CH_4 / kg_{GS}, palielinot aļģu-ierauga attiecību no 1 : 3 uz 1 : 5, ir statistiski nozīmīgs ($p = 0{,}045$), bet BMP vērtības pieaugums, mainot attiecību no 1 : 5 uz 1 : 10, nav statistiski nozīmīgs ($p = 0{,}056$). Eksperimenti ar *F. vesiculosus* parādīja līdzīgus rezultātus – BMP vērtības pieaugums +45 L CH_4 / kg_{GS}, palielinot attiecību no 1 : 3 uz 1 : 5, ir statistiski nozīmīgs ($p = 0{,}049$). Paraugos ar aļģu-ierauga attiecību 1 : 3 un 1 : 5 50 % kopējā saražotā biometāna daudzuma tika saražoti pirmajās 5–7 dienās, paraugos ar attiecību 1 : 10 50 % ražības tika sasniegti 7–12 dienās. Vispiemērotākā aļģu-ierauga attiecība ir 1 : 5, balstoties uz saražotās biogāzes daudzumu un fermentācijas ilgumu.

F. vesiculosus paraugu priekšapstrāde 1,5 minūšu ilgumā ar mikroviļņiem palielināja biometāna ražīgumu par 7,8–43,7 % ($p = 0{,}702$, ja $\alpha = 0{,}05$), un trīs minūšu ilga apstrāde ar mikroviļņiem palielināja biometāna ražīgumu par 37,2–45,2 % ($p = 0{,}011$, ja $\alpha = 0{,}05$).

Skalošanas un smalcināšanas ietekme uz katru no izvēlētajām aļģu sugām ir atšķirīga. Šo faktoru ietekme uz BMP vērtību redzama 3.1. attēlā.



3.1. att. BMP vērtības un to izmaiņas atkarībā no lietotās priekšapstrādes metodes.

Divlīmeņu faktoriāla analīze (skalošana un smalcināšana kā faktori) tika veikta visām aļģu sugām, lai noskaidrotu, kā katrs no šiem faktoriem ietekmē rezultātu un vai starp faktoriem ir mijiedarbība. Saldūdens *C. demersum* gadījumā no skalošanas nav ietekmes uz gala rezultātu, smalcināšana palielina biogāzes ražību +79 L CH_4 / kg_{GS} ($T_{test} = 0{,}292$, $p = 0{,}378$, ja $\alpha = 0{,}05$). Sālsūdens brūnaļģes *F. vesiculosus* gadījumā skalošanai ir pozitīva ietekme uz biogāzes ražību +56 L CH_4 / kg_{GS} ($T_{test} = 0170$, $p = 0{,}434$, ja $\alpha = 0{,}05$), arī smalcināšanai ir pozitīva ietekme

+8 L CH_4 / kg_{GS} (T_{test} = 0,196, p = 0,424, ja α = 0,05). Sālsūdens zaļaļģei *U. intestinalis* smalcināšana sniedz biometāna ražības pieaugumu +49 L CH_4 / kg_{GS} (T_{test} = 0,0071, p = 0,472, ja α = 0,05), skalošanai ir pozitīva ietekme +7 L CH_4 / kg_{GS} (T_{test} = 0,1655, p = 0,435, ja α = 0,05). Starp faktoriem mijiedarbības nav. Lai gan ietekmes apjomi no šīm testētajām priekšapstrādes metodēm nav statistiski nozīmīgi, eksperimentos iegūtās vērtības pašas par sevi ir statistiski nozīmīgas un tiek izmantotas tālākajos aprēķinos. Visiem testētajiem aļģu veidiem priekšapstrāde uzlabo saražotās biogāzes daudzumu un saīsina fermentācijas laiku. Balstoties uz eksperimentiem, tālāk aprēķinos izmantotās vērtības ir apkopotas 3.1. tabulā. Kūtsmēslu vērtības balstās uz literatūras avotu analīzi. Balstoties uz šiem datiem, izvēlētais fermentācijas tvertnes izmērs ir ar 1500 m^3 kapacitāti, un izvēlētā koģenerācijas stacija ir ar 250 kW elektrisko jaudu. Šie lielumi aprēķināti, ņemot vērā fermentācijas laiku 20 dienas, kā arī nepieciešamo ikdienas substrātu un kūtsmēslu daudzumu.

3.1. tabula

Substrātu parametri biogāzes ražošanai

Parametri	Mērvienība	*C. demersum*	*F. vesiculosus*	*U. intestinalis*	Kūtsmēsli
Bioķīmiskais metāna potenciāls	L CH_4 / kg_{GS}	405,3	81,1	92,1	300
Gaistošā sausne	%	78,3	78,5	78,5	79,0
Mitrums	%	94,9	82,2	78,7	85,0
Kopējā sausne	%	5,1	17,8	21,3	15,0

Balstoties uz eksperimentu rezultātiem un literatūras analīzi, tiek pieņemts, ka biogāze satur 65 % metāna.

Saražotās un patērētās enerģijas kopsavilkums visiem scenārijiem redzams 3.2. tabulā.

3.2. tabula

Saražotās un patērētās enerģijas attiecības aprēķins scenārijiem

	C. demersum	*F. vesiculosus*	*U. intestinalis*	Kūtsmēsli
	MWh	MWh	MWh	MWh
Patērētais kopā	**1407,93**	**1435,31**	**1407,93**	**1335,90**
Elektroenerģija dzesēšanai	17,28	17,28	17,28	0
Elektroenerģija priekšapstrādei	54,75	82,13	54,75	0
Elektroenerģija fermentācijai, biogāzes attīrīšanai un koģenerācijas stacijai	153,30	153,30	153,30	153,30
Siltumenerģija fermentācijai	1182,60	1182,60	1182,60	1182,60
Saražotais kopā	**6132**	**6132**	**6132**	**6132**
Elektroenerģija	2190	2190	2190	2190
Siltumenerģija	3942	3942	3942	3942
Attiecība	**0,2296**	**0,2341**	**0,2296**	**0,2179**

Enerģija patērēta transportlīdzekļos un transportēšanai nav iekļauta kritērija EA aprēķinā.

3.2. Vides kritēriji

Ietekme uz vidi dzīves cikla laikā tika rēķināta, izmantojot programmu *SimaPro* un aprēķina metodiku *IMPACT2002+*. Rezultāti apkopoti četros ietekmes kritērijos (3.3. tab.).

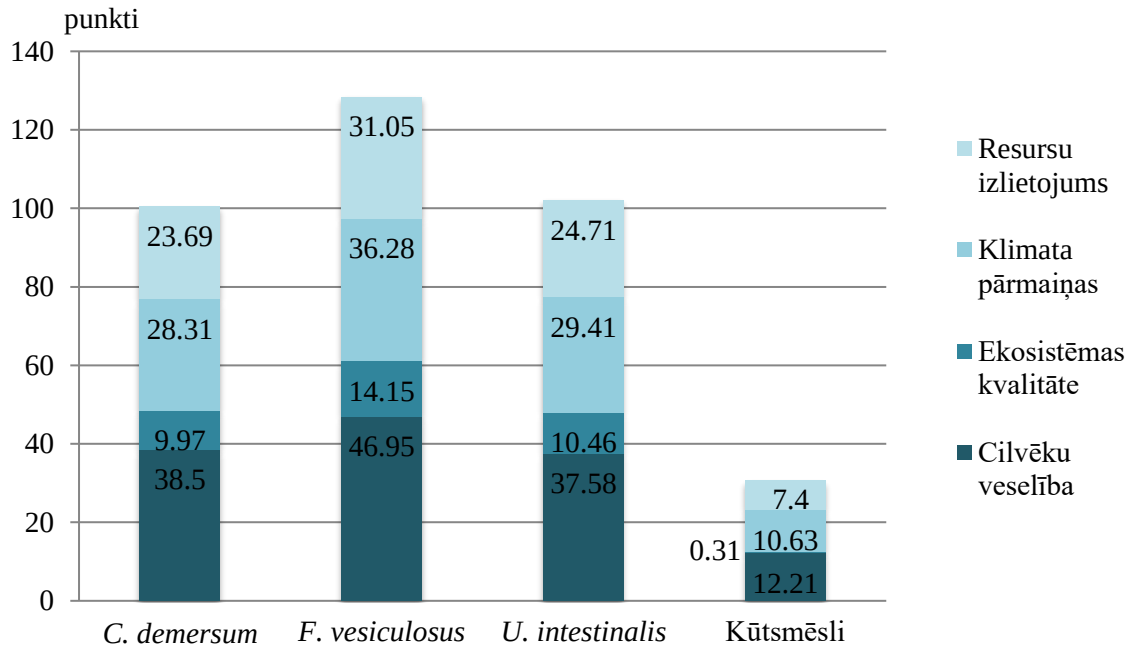
3.3. tabula

Scenāriju modelētā ietekme uz vidi

	C. demersum	*F. vesiculosus*	*U. intestinalis*	Kūtsmēsli	Mērvienība
Ekosistēmas kvalitāte	136 566	193 827	143 330	4 250	PPSF/m^2
Klimata pārmaiņas	280 313	359 182	291 188	105 239	kg CO_2 ekvivalents
Cilvēka veselība	0,273	0,333	0,267	0,087	IIDzG
Resursu izlietojums	3 599 703	4 719 593	3 755 142	1 124 616	MJ

Kopumā rezultāti scenārijiem, kas balstās uz aļģu izmantošanu, ir 15 % nobīdes robežās viens no otra katrā kategorijā, bāzes scenārijā, kas balstās uz kūtsmēslu izmantošanu, ietekme uz vidi ir daudz zemāka (jo kūtsmēsli tiek uzskatīti kā blakusprodukts lopkopībai). Ietekme uz cilvēka veselību un ekosistēmas kvalitāti lielākoties veidojas no transportēšanas emisijām. Transportēšanas emisijas veido aptuveni 80 % no klimata pārmaiņu un resursu izlietojuma kritērijiem scenārijos, kas balstās uz aļģu izmantošanu.

Lai būtu iespējams savstarpēji salīdzināt ietekmes uz vidi kritērijus, tie tiek pārveidoti punktu sistēmā, izmantojot normalizācijas soli programmā *SimaPro* (sīkāk skat. aprēķina metodoloģijas *IMPACT2002+* aprakstu (Goedkoop et al., 2008)).



3.2. att. Normalizētās ietekmes uz vidi kritēriju vērtības visiem scenārijiem.

Kā redzams 3.2. attēlā, salīdzinoši lielāka ietekme uz vidi ir cilvēku veselībai un resursu izlietojumam. Kopumā vismazākā ietekme uz vidi no biogāzes ražošanas ir, izmantojot kūtsmēslus kā izejvielu, tad saldūdens *C. demersum*, sālsūdens *U. intestinalis* un sālsūdens *F. vesiculosus*.

Ne visas biogāzes stacijas izmanto biomasas uzglabāšanas telpas ar dzesēšanu, jo tas rada papildu izdevumus. Taču tas var radīt apstākļus, ka biomasa uzglabājoties degradējās. Tika veikta jutības analīze, lai noskaidrotu, kā mainīsies ietekme uz vidi, ja degradācija notiks 0 %, 10 %, 20 % un 30 % apmērā no uzglabātās biomasas apjoma. Tā kā funkcionālā vienība ir biogāzes stacijas darbība vienu gadu (saražojot 2190 MWh elektroenerģijas un 3942 MWh siltumenerģijas), tiek pieņemts, ka būtu jāievāc par attiecīgi zaudētās biomasas daudzumus lielāks biomasas apjoms, lai segtu zaudēto biomasu. Regresijas analīze parādīja, ka ir cieša korelācija starp ievākto biomasas apjomu un ietekmi uz vidi – par 30 % lielāks ievāktās biomasas daudzums palielina ietekmi uz vidi vidēji par 26 %. Tas nozīmē, ka, neizmantojot uzglabāšanu ar dzesēšanu, ietekme uz vidi būtu proporcionāla reālajam biomasas degradācijas apjomam. Situācijas, kad klimatiskie apstākļi ir piemērotāki (vēsākas vasaras, aukstākas ziemas), ietekme varētu būt mazāka, taču vispārējā klimata tendence pēdējo 5–10 gadu laikā ir vidējām āra temperatūrām palielināties, tāpēc biomasas degradācija varētu negatīvi izmainīt ietekmi uz vidi pat līdz 30 un vairāk procentiem.

3.3. Ekonomiskie kritēriji

Dzīves cikla naudas plūsma tika modelēta, balstoties uz iepriekšminētajiem pieņēmumiem un aprēķiniem. Aprēķinātās NPV, BC un DAP vērtības redzamas 3.4. tabulā.

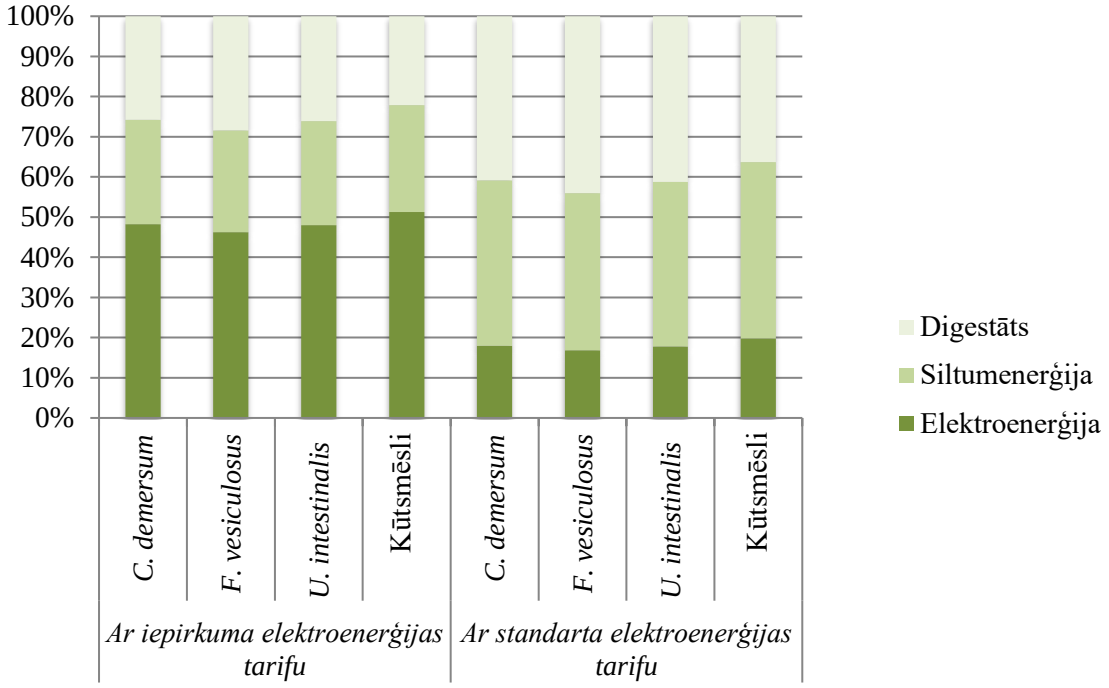
3.4. tabula

NPV, BC un DAP kritēriju vērtības visiem scenārijiem

	C. demersum	*F. vesiculosus*	*U. intestinalis*	Kūtsmēsli	Mērvienība
Neto pašreizējā vērtība	51 008	–505 683	–219 061	916 864	EUR
Biogāzes cena	355	389	373	304	EUR / tūkst. m^3
Diskontētais atmaksāšanās periods	11	20	11	2	Gadi

No analizētajiem scenārijiem, kas balstās uz aļģu izmantošanu, *C. demersum* uzskatāms par labāko izejvielu, jo vienīgajam NPV vērtība dzīves cikla laikā ir pozitīva un biogāzes pašizmaksas ir zemākas.

Lielāko daļu izmaksu dzīves cikla laikā veido kapitālieguldījumi un uzturēšanas izmaksas. Ienākumu struktūra ar un bez iepirkuma tarifa ietekmes redzama 3.3. attēlā.



3.3. att. Ienākumu struktūra ar un bez iepirkuma tarifa ietekmes visiem scenārijiem.

Iepirkumu tarifam ir liela ietekme uz kopējo ienākumu struktūru, pārdotās elektroenerģijas ienākumu īpatsvars mainās robežās no 17–18 % līdz 46–48 %. Ienākumi no pārdotās siltumenerģijas un pārdotā digestāta veido līdzīgu daļu.

Biogāzes cena scenārijiem ir robežās no 304 EUR / tūkst. m^3 biogāzes līdz 389 EUR / tūkst. m^3 biogāzes. Pārrēķinot šo rādītāju uz tūkst. m^3 metāna (neņemot vērā biogāzes uzlabošanas izmaksas), tas ir robežās no 467 EUR / tūkst. m^3 metāna līdz 599 EUR / tūkst. m^3 metāna. Vidējā dabasgāzes cena gala patērētājiem Latvijā 2017. gadā bija 287 EUR / tūkst. m^3 (Centrālā Statistikas Pārvalde, 2017). Bez subsīdijām vai citām atbalsta formām gandrīz divreiz lielākās biogāzes cenas nav pietiekami konkurētspējīgas.

3.4. Kritēriju svari

Šajā novērtējumā piešķirtie kritēriju svari balstās uz autores viedokli par kritēriju savstarpējo nozīmīgumu. Kritēriju svaru izmantošana nav obligāts solis, par tā izmantošanu lemj projektā iesaistītās puses un lēmumu pieņēmēji. Šajā novērtējuma metodoloģijā piedāvātā AHP metodoloģija ļauj svaru piešķiršanu veikt vairākām pusēm vienlaikus un apkopot rezultātus veidā, kas ņem vērā visu iesaistīto pušu intereses.

Autores piešķirtie svari, izmantojot analītiskās hierarhijas procesa metodoloģiju, apkopoti 3.5. tabulā.

3.5. tabula

Kritērijiem piešķirtie svari ar AHP metodoloģiju

Kritēriju grupas	Kritērijs	Kritērija svars	Kritēriju grupas svars
Enerģētiskie	BMP	21,59	28,69
	EA	7,10	
Vides	EK	5,13	28,39
	KP	9,83	
	CV	6,42	
	RI	7,01	
Ekonomiskie	NPV	25,33	42,92
	BC	12,75	
	DAP	4,84	

Kā var redzēt tabulā, vislielākie svari ir piešķirti neto pašreizējai vērtībai un bioķīmiskajam metāna potenciālam. Lai gan visiem vides kritērijiem piešķirtie svari ir relatīvi mazi, kopējais grupas svars ir līdzīgs ar citām kritēriju grupām.

3.5. Daudzkritēriju analīze

Balstoties uz informāciju, kas apkopota iepriekšējās nodaļās, daudzkritēriju analīze tika veikta ar *TOPSIS* metodoloģiju. Visu kritēriju vērtības četriem izvēlētajiem scenārijiem apkopotas 3.6. tabulā.

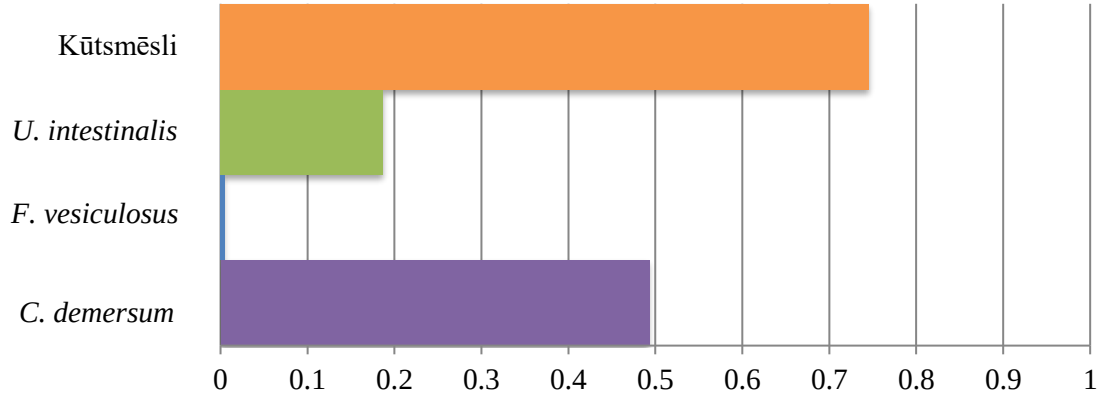
3.6. tabula

Kritēriju vērtības visiem scenārijiem

	C. demersum	*F. vesiculosus*	*U. intestinalis*	Kūtsmēsli	Mērvienība	Svari
BMP	0,4053	0,0811	0,0921	0,300	m^3 CH_4 / kg_{GS}	21,59
EA	0,229	0,234	0,229	0,218	punkti	7,10
EK	9,97	14,15	10,46	0,31	punkti	5,13
KP	28,31	36,28	29,41	10,63	punkti	9,83
CV	38,50	46,95	37,58	12,21	punkti	6,42
RI	23,69	31,05	24,71	7,40	punkti	7,01
NPV	51 008	**–505 683**	**–219 061**	916 846	EUR	25,33
BC	355	389	373	304	EUR / tūkst. m^3 biogāzes	12,75
DAP	11	20	11	2	Gadi	4,84

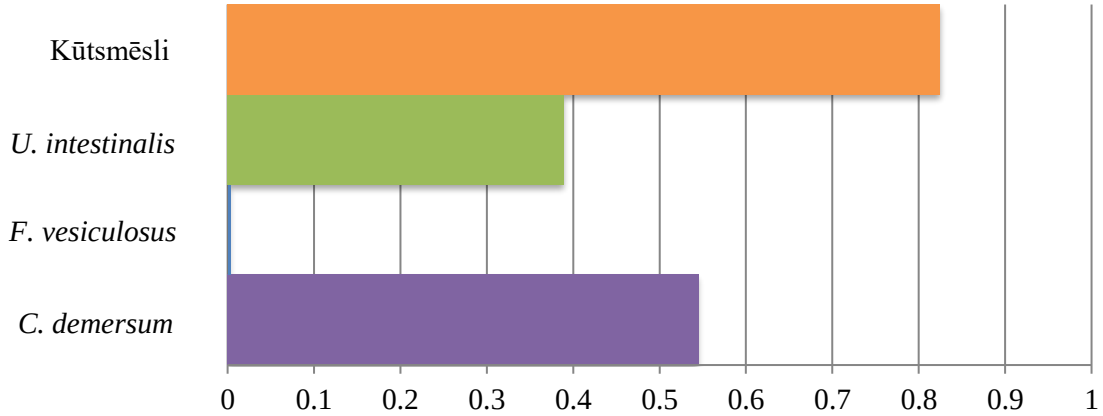
Kā var redzēt apkopotajos datos, dažas no vērtībām ir negatīvas, tāpēc pirms *TOPSIS* metodoloģijas izmantošanas dati tiek normalizēti skalā no 1 līdz 10 (kur 10 atbilst lielākajai piešķirtajai vērtībai katrā kritērijā).

Balstoties uz šiem datiem, scenāriju tuvums ideālajam rezultātam parādīts 3.4. attēlā.



3.4. att. Scenāriju tuvums ideālajam rezultātam ar autores piešķirtajiem kritēriju svariem.

Rezultāti parāda to, ka bāzes scenārijs ar kūtsmēslu izmantošanu ir vispiemērotākais no visiem scenārijiem. No scenārijiem, kas balstīti uz aļģu izmantošanu, vistuvākais ir *C. demersum* izmantošanas scenārijs. Šie rezultāti iekļauj autores piešķirtos svarus, tāpēc ir svarīgi aplūkot rezultātus arī ar vienādiem svariem visiem kritērijiem (3.5. att.).



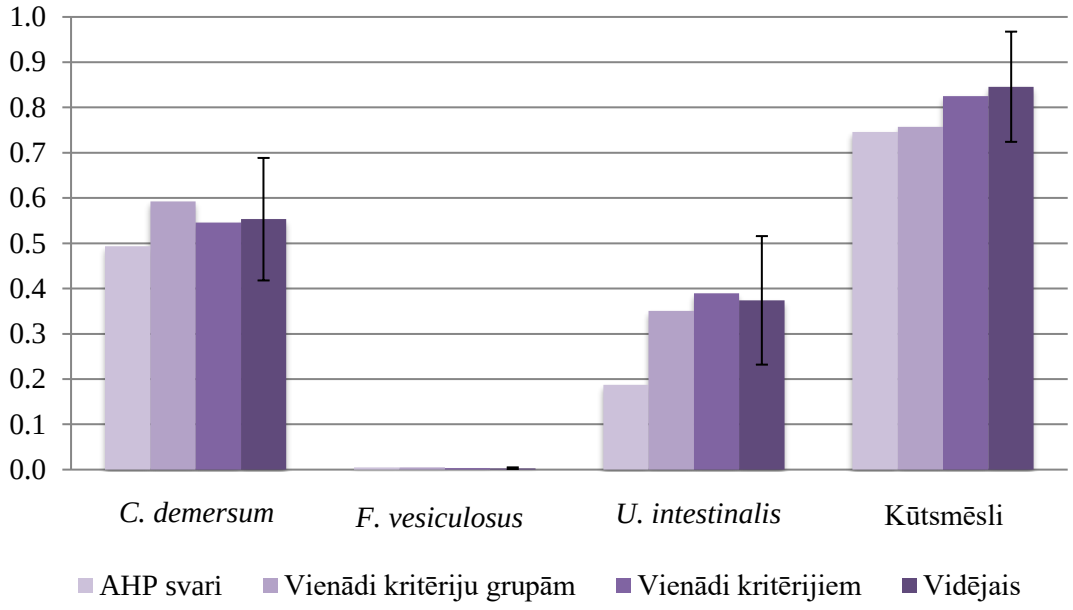
3.5. att. Scenāriju tuvums ideālajam rezultātam ar vienādiem kritēriju svariem.

Lai gan ar vienādiem piešķirtajiem svariem nemainās scenāriju secība pēc tuvuma ideālajam rezultātam, tomēr mainās to individuālie vērtējumi, piemēram, *U. intestinalis* izmantošanas scenārijā tā vērtējums mainās no 0,18 līdz 0,38. Kā redzams, piešķirtajiem svariem var būt gana liela ietekme uz attālumu līdz ideālajam risinājumam.

3.6. Jutības analīze

Jutības analīze tiek izmantota, lai noteiktu, kā izveidotās aļģu izmantošanas novērtējuma metodoloģijas rezultāti mainās, mainot ievaddatu vērtības. Ņemot vērā izmaiņas un to atbilstošos rezultātus, ir iespējams novērtēt izveidotās metodoloģijas sniegumu. Jutības analīze tiek veikta gan piešķirtajiem svariem, lai novērtētu to ietekmi uz gala rezultātu, gan kritēriju ievaddatiem, lai novērtētu to, cik robusta ir izveidotā metodoloģija.

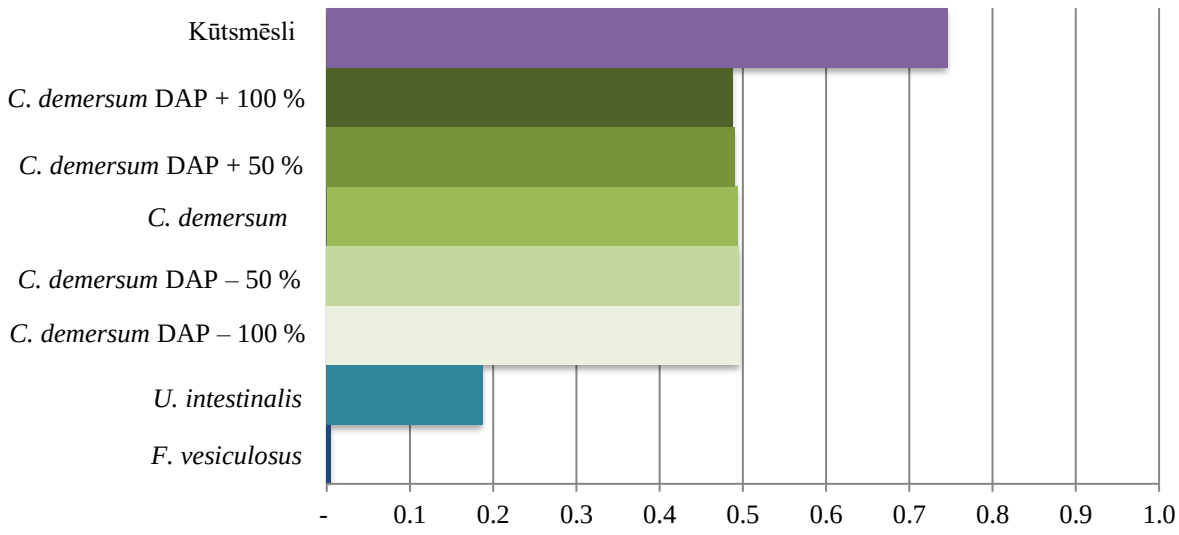
Jutības analīze, balstoties uz izmaiņām piešķirtajos kritēriju svaros, veikta, mainot piešķirtos svarus pēc diviem principiem: piešķirot katrai no kritēriju grupām svaru 50 % un pārējiem kritērijiem sadalot atlikušos 50 % vienmērīgi; piešķirot katram no kritērijiem 50 % no kopīgajiem svariem un pārējiem astoņiem kritērijiem sadalot atlikušos 50 % vienmērīgi. Šo svaru izmaiņu rezultātu apkopojums redzams 3.6. attēlā.



3.6. att. Jutības analīzes rezultāti apkopotā veidā ar standartnovirzi.

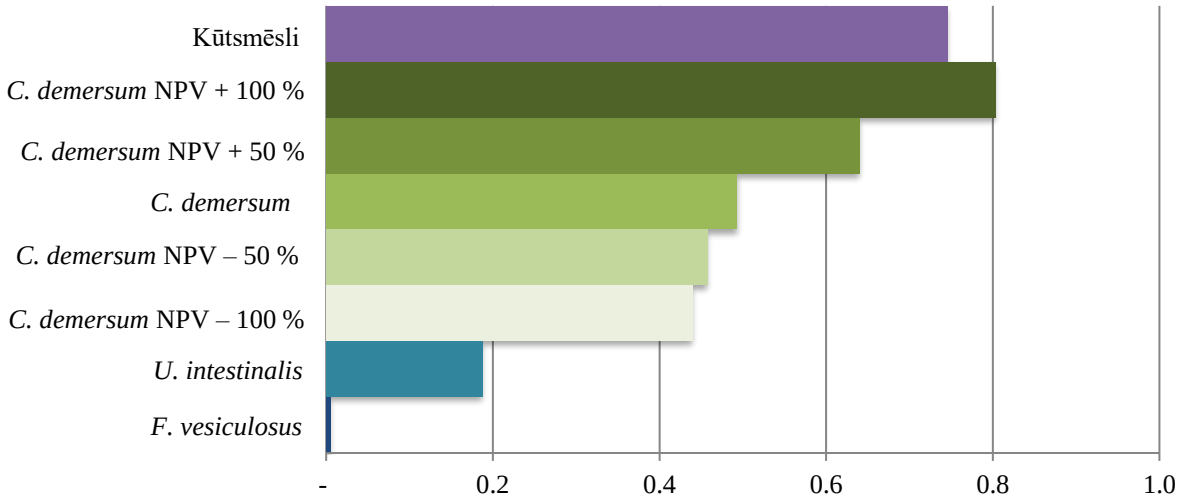
Atkarībā no scenārija standartnovirze ir starp 14 % un 58 % no vidējā attāluma līdz ideālajam risinājumam. Atsevišķu piešķirto svaru gadījumā mainījās ne tikai scenāriju attālumi līdz ideālajam risinājumam, bet arī to secība, piemēram, ja kritērijam BMP tiek piešķirts 50 % no kopīga svara mainās scenāriju secīgums – *C. demersum* – 0,86, *F. vesiculosus* – 0,001, *U. intestinalis* – 0,12, kūtsmēsli – 0,50.

Testējot izveidoto metodoloģiju, mainot ievaddatus, lai novērtētu rezultātu izmaiņas, tika izvēlēts testēt divu kritēriju vērtību ietekmi uz rezultātu – kritēriju ar vislielāko un vismazāko piešķirto svaru (izmantoti autores piešķirtie svari) jeb attiecīgi NPV un DAP. Kritēriju vērtību maiņa tiek veikta tikai vienā no scenārijiem, šajā gadījumā *C. demersum* scenārijā. Kritēriju vērtības tiek mainītas no minimālās līdz maksimālajai vērtībai (izmantojot normalizētos datus) ar vienu soli no esošās vērtības līdz attiecīgi minimālajai vērtībai (1) un attiecīgi maksimālajai vērtībai (10). Kritērija DAP ievaddatu izmaiņu ietekme uz scenāriju attālumu līdz ideālajam risinājumam redzama 3.7. attēlā.



3.7. att. Kritērija DAP izmaiņu ietekme uz scenāriju tuvumu ideālajam risinājumam.

Kā var redzēt attēlā, izmaiņas pašā *C. demersum* scenārijā ir niecīgas un neietekmē to, kāda ir scenāriju secība. 3.8. attēlā var aplūkot kritērija NPV ievaddatu vērtību izmaiņu ietekmi uz rezultātiem.



3.8. att. Kritērija NPV izmaiņu ietekme uz scenāriju tuvumu ideālajam risinājumam.

Kritērija NPV izmaiņas tikai vienā no scenārijiem atkarībā no šo izmaiņu apmēra var būtiski ietekmēt ne tikai šī scenārija individuālo attālumu līdz ideālajam risinājumam, bet arī scenāriju secību, padarot scenāriju ar *C. demersum* biomasu tuvāku ideālajam risinājumam nekā bāzes scenāriju ar kūtsmēsliem. Kā redzams, atšķirība starp viena kritērija vērtību izmaiņām ir ļoti atkarīga no tā, kāds svars šim kritērijam ir piešķirts. Tieši tāpēc vēlreiz jāuzsver, cik liela nozīme ir piešķirtajiem svariem, un, izmantojot šo metodoloģiju, autore iesaka vienmēr rezultātus salīdzināt arī vienādiem kritēriju svariem, lai novērtētu piešķirto svaru ietekmi.

Gan kritēriju vērtību izmaiņas, gan piešķirto svaru izmaiņas spēj ietekmēt rezultātu un izmainīt novērtējamo scenāriju secību pēc attāluma līdz ideālajam risinājumam, kas nodrošina, ka izstrādātā metodoloģija ir gana jutīga, lai būtu iespējams iegūt rezultātus, kas ir pieņemami visām projektā iesaistītajām pusēm. Tajā pašā laikā metodoloģija ir gana robusta, lai uzrādītu testēto scenāriju līderi, pat – pie mainīgām piešķirto svaru vērtībām.

SECINĀJUMI

1. Promocijas darbā ir izstrādāta aļģu izmantošanas novērtējuma metodoloģija biogāzes ražošanai, kas aizpilda visaptverošas metodoloģijas vietu biogāzes projektu novērtēšanai vairāk nekā no viena aspekta. Izstrādātā metodoloģija ietver trīs svarīgus aspektus – enerģētiskās vērtības eksperimentālu noteikšanu, ietekmes uz vidi modelēšanu un ekonomiskā izdevīguma aprēķinus. Katram no izvēlētajiem kritērijiem tiek izmantotas piemērotas, analītiskas vai praktiskas analīzes metodes, kas ņem vērā visu biogāzes ražošanas projektu ciklu. Izstrādātā metodoloģija un tās rezultāti var tikt izmantoti gan pašvaldību, gan valsts, gan reģionālā politikas plānošanas līmenī.
2. Izveidotās aļģu novērtējuma metodoloģijas ietvars ļauj novērtēt dažādus aļģu izmantošanas projektus (scenārijus), atkarībā no novērtējuma mērķa. Metodoloģija ir aprobēta trīs dažādos aļģu izmantošanas scenārijos Latvijā (izskalotās sālsūdens brūnaļģes *Fucus vesiculosus*, izskalotās sālsūdens zaļaļģes *Ulva intestinalis* un saldūdens makrofīts *Cerathophyllum demersum*) un bāzes scenāriju ar kūtsmēslu izmantošanu. Novērtējums parādīja, ka vispiemērotākā aļģu suga, lai ieviestu biogāzes ražošanu no aļģēm Latvijā, ir saldūdens *C. demersum*. Tā ir saldūdens suga, tāpēc tai nav nepieciešama priekšapstrāde – skalošana un tās biogāzes ražība ir augstāka nekā sālsūdens sugām. Tas samazina gan ietekmi uz vidi, gan projekta kopējās izmaksas. Nepieciešams mazāks *C. demersum* biomasas daudzums nekā citām pētītajām aļģu sugām, tāpēc ietekme uz vidi kopumā ir mazāka, taču ūdenstransporta izmantošanas dēļ ietekme uz cilvēka veselību ir lielāka. No salīdzinātajiem scenārijiem, kas balstās uz aļģu izmantošanu, neto pašreizējā projekta vērtība bija pozitīva tikai izmantojot *C. demersum*, taču jāņem vērā, ka liela ietekme uz projekta ekonomiskajiem rādītājiem ir elektroenerģijas iepirkuma cenai projekta pirmos 10 gadus. Biomasa tiek ievākta no dabas izkliedētā veidā, tāpēc transportēšanai ir ļoti liela ietekme uz projektu vides un ekonomiskajiem rādītājiem.
3. Eksperimentālo datu izmantošana ir kritisks punkts kopējā projektu novērtēšanā, jo liela daļa no aprēķiniem balstās uz nepieciešamo biomasas daudzuma biogāzes ražošanai. Aļģu sugu bioķīmiskais metāna potenciāls var atšķirties reģionāli (klimatisko, laika apstākļu, ūdens sastāva, pieejamo barības vielu un citu iemeslu dēļ) vai nav pieejams vispār, tāpēc ir svarīgi veikt eksperimentus kā daļu no novērtējuma metodoloģijas. Piemērotas priekšapstrādes metodes var uzlabot gan bioķīmisko metāna potenciālu, gan samazināt fermentācijas laiku. Nepieciešamais biomasas daudzums, lai nodrošinātu biogāzes ražošanu tieši proporcionāli ietekmē projekta izmaksas. Viens no projektu vājajiem punktiem ir lielās sākotnējās investīcijas. Dzīves cikla izmaksu jutības analīze parādīja, ka pat bez koģenerācijas stacijas izbūves un uzturēšanas izmaksām biogāzes cenas visiem scenārijiem bija virs tirgus cenas. Projektu spēcīgās puses ir tas, ka tiek izmantota biomasa, kas tiek uzskatīta par atkritumiem (izskaloto aļģu gadījumā) un kas tiek savākta no ūdenstilpnēm vai to krastiem, potenciāli samazinot to eitrofikācijas problēmu. Aļģu izmantošana biogāzes ražošanai palīdz sasniegt arī nacionālās un Eiropas Savienības mērķus nākamajiem

plānošanas projektiem un samazināt klimata pārmaiņu ietekmi. Jāņem vērā, ka novērtējuma metodoloģijā un Latvijas situācijas novērtējumā nav iekļauti projektu likumiskie un sociālie aspekti.

4. Veiktās jutības analīzes parādīja, ka izstrādātās metodoloģijas ietvars ir elastīgs un atsaucīgs – izmaiņas kritērija vai kritēriju grupu vērtībās atbilstoši parādās arī rezultātos, mainot scenāriju tuvumu ideālajam risinājumam. Piešķirtajiem svariem ir proporcionāla ietekme uz rezultātiem, mainoties kritēriju vērtībām. Jutības analīze parādīja, ka svari var būt būtiski ietekmēt rezultātus, jo īpaši kritērijiem, kuru vērtības ir tuvu zemākajai vai augstākajai piešķirtajai vērtībai. Mainot svarus, ir iespējama scenāriju attāluma līdz ideālajam rezultātam maiņa tādā apmērā, kas ietekmē to, kurš no scenārijiem ir tuvākais ideālajam rezultātam.
5. Izstrādātās novērtējuma metodoloģijas ietvars ir viegli piemērojams un var tikt pielāgots, lai iekļautu arī jaunus vai citus biogāzes ražošanas soļus, ja tas ir nepieciešams. Kopējā novērtējuma metodikas struktūra ir elastīga un pieļauj izmaiņas, ja to pieprasa novērtējuma mērķis. Metodoloģijas ietvaros izveidotais dzīves cikla analīzes modelis, apvienots ar dzīves cikla izmaksu analīzes modeli, nodrošina to, ka jebkuras izmaiņas pieņēmumos vai izejas datos tiks atspoguļotas visos kritērijos un aspektos. Svaru piešķiršanas metode AHP pieļauj, ka kritēriju nozīmīgumu un svarus var piešķirt vairākas personas vai iesaistītas puses, tāpēc metodoloģija ir piemērota tādiem projektiem, kuros ir vairāki lēmumu pieņēmēji vai iesaistītās puses.

KOPSAVILKUMĀ IZMANTOTĀ LITERATŪRA

Aurora Liquefied Natural Gas Ltd. (2013). *Natural Gas Demand and Supply Forecast to 2050*. Calgary, AB, Canada.

Brūniņa, L. (2018). *Jūras aļģu sanesumu izvērtēšanas un apsaimniekošanas plāna Latvijas piekrastei izstrāde*.

Centrālā Statistikas Pārvalde. (2017). Energoresursu vidējās cenas gala patērētājiem Latvijā. Retrieved December 4, 2018, from ENG190 website: https://data1.csb.gov.lv/pxweb/lv/vide/vide__energetika__ikgad/ENG190.px/table/tableViewLayout1/

Eriksson, L., Johansson, E., Wold, N. K.-, Wikstrom, C., & Wold, S. (2001). Design of Experiments, Principles and Applications. *Journal of Chemometrics*, *15*(5), 495–496. https://doi.org/10.1002/cem.686

European Commission. (2019). Climate Strategies and Targets. Retrieved from https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies_en

Goedkoop, M., Oele, M., de Schryver, A., & Vieira, M. (2008). SimaPro 7 Database Manual: Methods library. In *Distribution* (2.2). PRe Consultants.

Goedkoop, M., Oele, M., Leijting, J., Ponsioen, T., & Meijer, E. (2013). *Introduction to LCA with SimaPro*.

Hansen, T. L., Schmidt, J. E., Angelidaki, I., Marca, E., Jansen, J. la C., Mosbæk, H., & Christensen, T. H. (2004). Method for determination of methane potentials of solid organic waste. *Waste Management*, *24*(4), 393–400. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2003.09.009

Holden, J. J., Kingzett, B. C., MacNeill, S., Smith, W., Juanes, F., & Dudas, S. E. (2018). Beach-cast biomass and commercial harvesting of a non-indigenous seaweed, Mazzaella japonica, on the east coast of Vancouver Island, British Columbia. *Journal of Applied Phycology*, *30*(2), 1175–1184. https://doi.org/10.1007/s10811-017-1321-1

Ishizaka, A., & Nemery, P. (2013). *Multi-Criteria Decision Analysis: Methods and Software*. https://doi.org/10.1002/9781118644898

Kahraman, C., Yasin Ateş, N., Çevik, S., Gülbay, M., & Ayça Erdoğan, S. (2007). Hierarchical fuzzy TOPSIS model for selection among logistics information technologies. *Journal of Enterprise Information Management*, *20*(2), 143–168. https://doi.org/10.1108/17410390710725742

Kauliņš, D. (2019). *Nacionālais enerģētikas un klimata plāns 2021.-2030.gadam*. Retrieved from https://www.norden.lv/Uploads/2018/10/24/1540377527_.pdf

Latvijas Republikas Saeima. (2010). *Latvijas ilgtspējīgas attīstības stratēģija līdz 2030. gadam*.

Latvijas Republikas Zemkopības Ministrija. (2017). *Latvijas Bioekonomikas stratēģija 2030*.

Lu, J., Zhang, G., Ruan, D., & Wu, F. (2007). *Multi-Objective Group Decision Making*. https://doi.org/10.1142/p505

Møller, H. B., Sommer, S. G., & Ahring, B. K. (2004). Methane productivity of manure, straw and solid fractions of manure. *Biomass and Bioenergy*, *26*(5), 485–495. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.08.008

Munier, N. (2004). *Multicriteria Environmental Assessment*. https://doi.org/10.1007/1-4020-2090-2

Pastare, L., Aleksandrovs, I., Lauka, D., & Romagnoli, F. (2016). Mechanical Pre-treatment Effect on Biological Methane Potential From Marine Macro Algae: Results from Batch Tests of Fucus Vesiculosus. *Energy Procedia*, *95*, 351–357. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.021

Pastare, L., & Romagnoli, F. (2019). Life Cycle Cost Analysis of Biogas Production from Cerathophyllum demersum, Fucus vesiculosus and Ulva intestinalis in Latvian Conditions. *Environmental and Climate Technologies*, *23*(2), 258–271. https://doi.org/10.2478/rtuect-2019-0067

Pastare, L., Romagnoli, F., & Baltrenaite, E. (2014). The methodology of evaluating different macroalgae biogas production scenarios with multi-criteria analysis. *Proceedings of the 17th Conference for Junior Researchers "Science - Future of Lithuania," 5*, 1–8.

Pastare, L., Romagnoli, F., & Blumberga, D. (2018). Comparison of biomethane potential lab tests for Latvian locally available algae. *Energy Procedia*, *147*, 277–281. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.092

Pastare, L., Romagnoli, F., Lauka, D., Dzene, I., & Kuznecova, T. (2014). Sustainable Use Of Macro-Algae For Biogas Production In Latvian Conditions: A Preliminary Study Through An Integrated Mca And Lca Approach. *Environmental and Climate Technologies*, *13*(1), 44–56. https://doi.org/10.2478/rtuect-2014-0006

Pastare, L., Romagnoli, F., Rugele, K., Dzene, I., & Blumberga, D. (2015). Biochemical Methane Potential from Anaerobic Digestion of the Macrophyte Cerathophyllum Demersum: A Batch Test study for Latvian Conditions. *Energy Procedia*, *72*, 310–316. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.06.045

Pham, C. H., Triolo, J. M., Cu, T. T. T., Pedersen, L., & Sommer, S. G. (2013). Validation and Recommendation of Methods to Measure Biogas Production Potential of Animal Manure. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, *26*(6), 864–873. https://doi.org/10.5713/ajas.2012.12623

Romagnoli, F., Pastare, L., Sabūnas, A., Bāliņa, K., & Blumberga, D. (2017). Effects of pre-treatment on Biochemical Methane Potential (BMP) testing using Baltic Sea Fucus vesiculosus feedstock. *Biomass and Bioenergy*, *105*, 23–31. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.06.013

Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, *48*, 9–26.

Smalheiser, N. R. (2017). ANOVA. In *Data Literacy* (pp. 149–155). https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811306-6.00011-7

US Environmental Protection Agency. (2001). *Method 1684: Total, Fixed and Volatile Solids in Water, Solids, and Biosolids*.

Wiley, P. E., Campbell, J. E., & McKuin, B. (2011). Production of Biodiesel and Biogas from Algae: A Review of Process Train Options. *Water Environment Research*, *83*(4), 326–338. https://doi.org/10.2175/106143010X12780288628615