

Ance Ansone

BIOMETĀNA ILGTSPĒJA CEĻĀ UZ INOVATĪVU ENERĢOSISTĒMU

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Dabaszinātņu un tehnoloģiju fakultāte
Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūts

Ance Ansonē

Doktora studiju programmas “Vides inženierija” doktorante

BIOMETĀNA ILGTSPĒJA CEĻĀ UZ INOVATĪVU ENERĢOSISTĒMU

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskās vadītājas
profesore *Dr. habil. sc. ing.*
DAGNIJA BLUMBERGA

asociētā profesore *Ph. D.*
LĪGA ROZENTĀLE

RTU Izdevniecība
Rīga 2026

Ansone, A. Biometāna ilgtspēja ceļā uz inovatīvu energosistēmu. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2026. – 51 lpp.

Publicēts saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-19” 2026. gada 28. maija lēmumu, protokols Nr. 243.

Vāka attēls no www.shutterstock.com.

<https://doi.org/10.7250/9789934373237>
ISBN 978-9934-37-323-7 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2026. gada 20. augustā plkst. 14 Rīgas Tehniskās universitātes Dabaszinātņu un tehnoloģiju fakultātē, Āzenes ielā 12/1, 607. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Dr. sc. ing. Gatis Bažbauers,
Rīgas Tehniskā universitāte

D. sc. (Tech.) Timo Laukkanen,
Ålto Universitāte, Somija

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 (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Ance Ansone (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, metodika, rezultāti, secinājumi, literatūras saraksts, 51 attēls, 27 tabulas, 28 vienādojumi, kopā 159 lappuses. Literatūras sarakstā ir 222 nosaukumi.

SATURS

SAĪSINĀJUMI.....	5
IEVADS	7
1. LITERATŪRAS ANALĪZE	12
1.1. Eiropas Savienības un Latvijas stratēģiskie mērķi biometāna ražošanā	12
1.2. Energoresursu patēriņa prognozes	12
1.3. Biometāna izplatība Eiropas Savienībā un Latvijā	13
1.4. Biometāna raksturojums, ražošanas izejvielas un tā priekšrocības.....	15
1.5. Palielināta biometāna īpatsvara radītie riski gāzes infrastruktūrai.....	15
1.6. Biometāna attīstības un tirgus integrācijas izaicinājumi un iespējas	16
1.7. Fokuss biometāna ražošanu savienojumam ar gāzes sistēmu un tirgus integrācijas scenārijiem	16
2. METODIKA.....	18
2.1. Kvantitatīvā kontentanalīze.....	19
2.2. Bibliometriskā analīze.....	19
2.3. Izpētošā gadījumu analīze	20
2.4. Daudzkritēriju lēmumu analīze, piemērojot <i>TOPSIS</i> metodi.....	20
2.5. Regresijas analīze.....	23
2.6. Izmaksu un ieguvumu analīze (<i>CBA</i>).....	24
2.7. Optimizācijas modelis	25
3. REZULTĀTI.....	26
3.1. Kvantitatīvās kontentanalīzes rezultāti.....	26
3.2. Bibliometriskās analīzes rezultāti.....	26
3.3. Izpētošā gadījumu analīze	27
3.4. Daudzkritēriju lēmumu analīzes rezultāti, izmantojot <i>TOPSIS</i>	28
3.5. Regresijas analīzes rezultāti - biometāna ražošanas apjoma (ražīguma) efektivitātes analīze	40
3.6. Biometāna izmaksu un ieguvumu analīzes rezultāti	42
3.7. Optimizācijas modeļa rezultāti.....	44
4. SECINĀJUMI.....	47
5. LITERATŪRAS SARAKSTS.....	49

SAĪSINĀJUMI

<i>5GDHS</i>	5. paaudzes centralizētās siltumapgādes sistēmas (angļu val. <i>fifth generation district heating systems</i>)
<i>AD</i>	anaerobā fermentācija (angļu val. <i>anaerobic digestion</i>)
<i>BIP</i>	biometāna ievades punkts
<i>CH₄</i>	metāns
<i>CNG</i>	saspiesta dabasgāze, <i>bioCNG</i> – saspiests biometāns, <i>bioLNG</i> – sašķidrināts biometāns
<i>CO₂</i>	oglekļa dioksīds
<i>DEN</i>	centralizēta enerģijas sistēma (angļu val. <i>District Energy Network</i>)
<i>EK</i>	Eiropas Komisija
<i>ENTSOG</i>	gāzes pārvades sistēmu operatoru Eiropas tīkls
<i>ES</i>	Eiropas Savienība
<i>ETS 2</i>	ES emisijas kvotu tirdzniecības sistēma, kas aptver arī degvielas un kurināmā patēriņu ēkās, autotransportā un rūpniecības nozarēs. ETS 2 mērķis ir samazināt SEG emisijas ETS iekļautajās nozarēs par 62 % līdz 2030. gadam. ETS 2 kvotu tirdzniecība tiks ieviesta 2027. gadā
<i>H₂S</i>	sērūdeņradis
<i>HP</i>	siltumsūkņi (angļu val. <i>heat pumps</i>)
<i>LCA</i>	dzīves cikla analīze (angļu val. <i>life cycle analysis</i>)
<i>LNG</i>	sašķidrināta dabasgāze, <i>bioLNG</i> – sašķidrināts biometāns
<i>MCA</i>	daudzkritēriju analīze (angļu val. <i>multi-criteria analysis</i>)
<i>MCDA</i>	daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas metode (angļu val. <i>Multiple Criteria Decision Analysis</i>)
<i>MILP</i>	jaukta vesela skaitļa lineārā programmēšana (angļu val. <i>Mixed-Integer Linear Programming</i>)
<i>NEKP</i>	Nacionālais enerģētikas un klimata plāns 2030. gadam
<i>N₂</i>	slāpeklis
<i>O₂</i>	skābeklis
<i>PSO</i>	pārvades sistēmas operators
<i>ppm</i>	daļas uz miljonu (angļu val. <i>parts per million</i>)
<i>PGK</i>	pazemes gāzes krātuve
<i>RED II</i>	Eiropas Parlamenta un Padomes Direktīva (ES) 2018/2001 (2018. gada 11. decembris) par atjaunojamo energoresursu izmantošanas veicināšanu.
<i>RED III</i>	Eiropas Parlamenta un Padomes Direktīva (ES) 2023/2413 ((2023. gada 18. oktobris), ar ko grozīta Direktīva (ES) 2018/2001, Regula (ES) 2018/1999 un Direktīva 98/70/EK attiecībā uz atjaunojamo energoresursu veicināšanu un atcelta Padomes Direktīva (ES) 2015/652
<i>REPowerEU</i>	Eiropas Komisijas 2022. gada 18. maijā COM(2022) 230 final KOMISIJAS PAZIŅOJUMS EIROPAS PARLAMENTAM, EIROPADOMEI, PADOMEI,

EIROPAS EKONOMIKAS UN SOCIĀLO LIETU KOMITEJAI UN
REĢIONU KOMITEJAI, plāns *REPowerEU*

SEG / GHG	siltumnīcefekta gāzes (angļu val. <i>greenhouse gases</i>)
SPRK	Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisija
SVID	novērtēšanas metode – stipro un vājo pušu, iespēju un draudu novērtējums
TOPSIS	daukdzkrītēriju lēmumu pieņemšanas metode (angļu val. <i>Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution</i>)

IEVADS

Biometāns pēdējos gados ir kļuvis par vienu no nozīmīgākajiem atjaunīgajiem gāzveida energoresursiem ES klimatneitralitātes un energoapgādes drošības mērķu sasniegšanai.

Enerģētikas pāreja no fosilo energoresursu izmantošanas uz atjaunīgo energoresursu integrāciju esošajā energosistēmā, kā arī jaunu sistēmu attīstība sniedz gan sistēmas ilgtspēju, gan vienlaikus saskaras ar izaicinājumiem. Atjaunīgo gāzu attīstība un integrācija esošajā enerģētikas struktūrā ir daudzpusīgs process, ko ietekmē tehnoloģiskie, socioekonomiskie un vides aspekti. Šajā kontekstā biometāns tiek uzskatīts par vienu no perspektīvākajiem atjaunīgajiem gāzveida energoresursiem, jo tas spēj izmantot esošo dabasgāzes infrastruktūru, vienlaikus veicinot siltumnīcefekta gāzu emisiju samazināšanu, aprites ekonomikas attīstību un stiprināt enerģētisko neatkarību. Biometāna attīstību ierobežo gan regulatīvi, ekonomiski un tehniski izaicinājumi, kas bieži vien ir savstarpēji saistīti, un to izvērtēšanai ir nepieciešama daudzpusīga pieeja.

Promocijas darba izstrādes gaitā tika formulēti vairāki pētījuma jautājumi, uz kuriem meklētas atbildes un skaidrojumi, izmantojot daudzpusīgu metodoloģisko pieeju.

Pētījuma jautājumi

Promocijas darbā izskatītā vispārējā pētījuma problēma ir, kā biometānu var ilgtspējīgi, efektīvi un sistēmiski integrēt Latvijas enerģētikas sistēmā un gāzes infrastruktūrā, lai atbalstītu dekarbonizācijas, enerģētiskās drošības un aprites ekonomikas mērķus.

Līdz ar to ir definēti vairāki galvenie pētījuma jautājumi.

- Kādu metožu izvēle ir piemērota biometāna sistēmiskai izpētei?
- Kādas tēmas un problēmas ir aktuālas zinātniskajā izpētē; vai izaicinājumi saskan ar Latvijas gadījumu; kas vēl nav plaši pētīts?
- Kā biometāns praksē tiek integrēts energosistēmās un kā to izmanto pilsētās?
- Kā biometānu integrēt enerģijas tīrģū un cik optimāls gāzveida kurināmais tas ir?
- Kas ietekmē biometāna ražošanu un kā uzlabot ražošanas efektivitāti?
- Cik ekonomiski pamatota ir biometāna ražošana un izmantošana?
- Kāda ir biometāna sistēmiskā loma, kādi ir ieguvumi?

Promocijas darba mērķis un uzdevumi

Promocijas darba mērķis ir analizēt faktoros, kas ietekmē biometāna kā piemērota energoresursa izvēli, tā optimālāko integrāciju un nonākšanu sistēmā, un identificēt biometānu kā plaši piemērojamu izejvielu un energoavotu dažādos sektoros. Darba gaitā izveidota zinātniski pamatota un praktiski piemērojama lēmumu pieņemšanas novērtējumu sistēma biometāna ilgtspējīgai attīstībai un integrācijai Latvijas enerģētikas sistēmā. Šī analīze apvieno tehnisko, vides, ekonomisko un normatīvo aktu analīzi, kā arī matemātiskos aprēķinus, lai nodrošinātu datus balstītu lēmumu pieņemšanu gāzes nozares dekarbonizācijai, biometāna integrācijai gāzes infrastruktūrā un aprites ekonomikas veicināšanai. Mērķa sasniegšanai tika definēti šādi uzdevumi:

- veikt biometāna enerģijas potenciāla izvērtējumu, tostarp analizējot biogāzes izejvielas, kā arī kvantificējot teorētisko un tehniski pieejamo biometāna potenciālu Latvijā;
- izstrādāt un analizēt biometāna integrācijas infrastruktūras risinājumus, izveidojot un salīdzinot trīs biometāna tirgus integrācijas scenārijus: 1) tiešs pieslēgums dabasgāzes sistēmai; 2) biometāna ievades punkti jeb virtuālais cauruļvads, kur uz ievadi gāzes sistēmā biometānu transportē saspiegtā veidā ar kravu konteinerpārvadājumu pa ceļiem; 3) piegāde ārpus gāzes sistēmas tieši patērētājam;
- veikt daudzkritēriju ilgtspējas novērtējumu, izmantojot *TOPSIS* metodi alternatīvu salīdzināšanai, balstoties vides, ekonomiskajos un tehniskajos rādītājos;
- analizēt biometāna ražošanas darbības rezultātus un izejvielu optimizācijas iespējas, veicot regresijas un statistiskās analīzes, izmantojot pilna mēroga biometāna ražotnes datus;
- izvērtēt saistību starp izmantoto izejvielu maisījumu, metāna koncentrāciju, ražošanas izmaksām un siltumnīcefekta gāzu emisijām;
- analizēt Latvijas un Eiropas Savienības normatīvo aktu un politikas ietvaru biometāna integrācijas jomā.

Hipotēze

Modelējot biometāna integrāciju energosistēmā, izmantojot optimizētus infrastruktūras risinājumus un kombinētu analītisko pieeju (kvantitatīvos datus un ekspertu novērtējumu), ir iespējams identificēt tādas biometāna integrācijas scenārijus, kas nodrošina augstāku kopējo ilgtspējas un ekonomisko efektivitāti, salīdzinot ar alternatīvām.

Promocijas darba zinātniskā novitāte

Pētījuma zinātniskā novitāte ir vairāku esošu metožu izmantošana un integrēšana vienotā analītiskā ietvarā, lai risinātu iepriekš nepietiekami pētītu problēmu par optimālu biometāna attīstību no dažādiem aspektiem. Analīze ietver gan tehnoloģisko, ekonomisko, sociālo un vides aspektu novērtēšanu vienotā sistēmiskā ietvarā. Papildu novitāte ir biometāna attīstības daudzveidīgs novērtējums tieši Latvijas nacionālajā kontekstā. Darbā ir izstrādāts integrēts analītiskais ietvars (daudzpusīga metožu piemērošana), kas apvieno tehnoloģiskos, ekonomiskos, vides un regulatīvos aspektus vienotā multimetodiskā, sistēmiski strukturētā pieejā.

Latvijā veikts dažādu biometāna integrācijas scenāriju infrastruktūras salīdzinājums, izmantojot daudzkritēriju lēmumu analīzi ar *TOPSIS*. Tāpat, izmantojot *TOPSIS*, ir izstrādāts konceptuāls lēmumu pieņemšanas atbalsta modelis, kas var kalpot biometāna attīstībai jaunos tirgos, integrējot daudzkritēriju lēmumu analīzes principus. Veikta biometāna ražošanas efektivitātes analīze, izmantojot reālas Latvijas biometāna ražotnes operatīvos datus, pētot izejvielu ietekmi uz saražoto resursu. Izstrādāts optimizācijas modelis biometāna ražošanas izvērtēšanai, lai to integrētu energosistēmā. Visbeidzot, biometāns kopumā ir analizēts gan kā dabasgāzes aizstājējs, gan arī kā daudzpusīga esošās enerģijas sistēmas daļa un to papildinošs

elements, kas veicina transporta sektora dekarbonizāciju, centralizētās siltumapgādes attīstību un energosistēmas elastības, it īpaši dekarbonizācijas un nākotnes atjaunīgās enerģijas nepieciešamības kontekstā.

Praktiskā nozīme

Promocijas darba praktiskā nozīme ir cieši saistīta ar nacionālās enerģētikas, klimata un reģionālās attīstības politikas īstenošanu. Darbā izstrādātie risinājumi kalpo kā lēmumu pieņemšanas atbalsta instruments potenciālajiem biometāna patērētājiem, ražotājiem un infrastruktūras operatoriem, vērtējot un izvēloties gan biometāna pieslēgumu stratēģijas, gan ražošanas procesus, kā arī politikas veidotājiem, kuri var objektīvi pamatot noteikt, kādā virzienā ir veidojams mērķēts valsts atbalsts.

Balstoties reālas biometāna ražošanas iekārtas darbības datu analīzē, darbā izstrādāti praktiski izmantojami secinājumi biometāna ražotņu darbības un izejvielu izmantošanas optimizācijai, nodrošinot efektīvāku resursu izmantošanu un ražošanas izmaksu samazinājumu. Pētījuma rezultāti sniedz ieguldījumu arī pilsētu un reģionu siltumapgādes sistēmu dekarbonizācijas plānošanā, hibrīdo bioenerģijas sistēmu attīstībā, ievērojot starptautiskas atziņas.

Promocijas darba atziņas ir praktiski izmantojamas reģionālās attīstības, aprites ekonomikas un atkritumu apsaimniekošanas stratēģiju īstenošanā, veicinot vietējo bioresursu izmantošanu, stiprinot reģionālo ekonomiku un mazinot negatīvo ietekmi uz vidi. Pētījumā iegūtie rezultāti nodrošina praktiski lietojamu pamatu nacionālās biometāna politikas pilnveidei, investīciju plānošanai gāzes sektorā, pašvaldību siltumapgādes dekarbonizācijas programmām, kā arī transporta sektora pārejai uz atjaunīgo energoresursu lietošanu.

Pētījuma rezultātu aprobācija

Promocijas darba pētījuma rezultāti ir atspoguļoti sešās starptautiskās zinātniskajās publikācijās.

1. A. Ansonē, L. Rozentale, U. Bariss and D. Blumberga, “Status and Potential Role of Biomethane in the Way Towards Gas Sector Decarbonization: Case study of Latvia”, 2024 IEEE 65th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga, Latvia, 2024, pp. 1–7, <https://doi.org/10.1109/RTUCON62997.2024.10830916>.
2. Ansonē, A., Rozentale, L., Rochas, C., & Blumberga, D. (2026). Decision-Support Analysis of Biomethane Infrastructure Options Using the TOPSIS Method. *Sustainability*, 18 (2), 1086. <https://doi.org/10.3390/su18021086>.
3. Treimane, M., Ansonē, A. & Rozentāle, L. (2026). Sustainable Biomethane Integration into Latvia’s Natural Gas Network. *Environmental and Climate Technologies*, 30 (1), 89–101. <https://doi.org/10.2478/rtuct-2026-0007>.

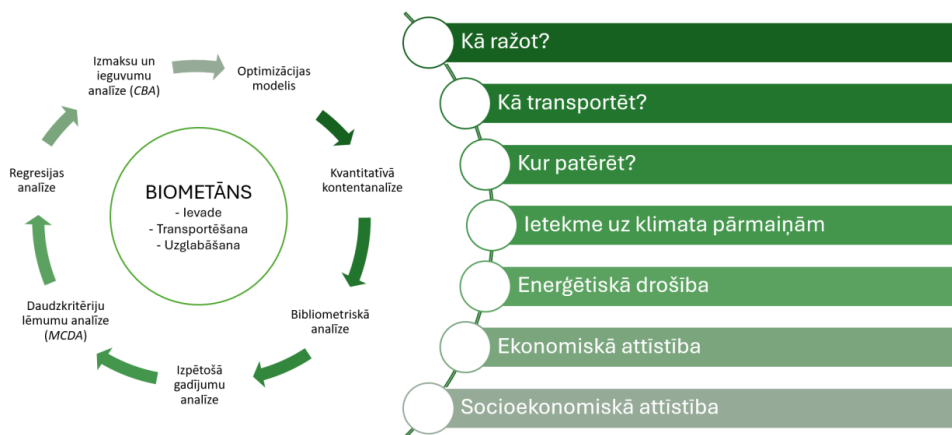
4. Ansonē, A., Rozentale, L. & Blumberga, D. (2025). Toward an Integrated Approach – A Conceptual Framework for Complex Biomethane Development. *Environmental and Climate Technologies*, 29 (1), 725–741. <https://doi.org/10.2478/rtuct-2025-0048>.
5. A. Ansonē, L. Rozentale, M. Pelss, C. Rochas, D. Blumberga, “Gaseous bioresources towards climate neutrality: Case study of Latvia”, *Renew Energy*, submitted for publication “Renewable Energy”, 2026 – Article submitted for review. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=6066095.
6. Ansonē, A., Brence, K., Rozentale, L., Rochas, C., & Blumberga, D. (2026). Integration of Biogas Utilization in District Heating Systems. *Energies*, 19 (1), 216. <https://doi.org/10.3390/en19010216>.

Promocijas darba pētījuma rezultāti ir prezentēti piecās starptautiskās zinātniskajās konferencēs.

1. Ansonē, L. Rozentale, U. Bariss, D. Blumberga, “Status and Potential Role of Biomethane in the Way Towards Gas Sector Decarbonization: Case study of Latvia”, 2024 IEEE 65th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga, Latvia, 12.10.2024.
2. A. Ansonē, L. Rozentale, and D. Blumberga, Evaluating Biomethane Market Entry Strategies MCDA-Based Insights on Connection Scenarios Using TOPSIS, the 20th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, held October 5–10, 2025 in Dubrovnik, Croatia.
3. M. Treimane, A. Ansonē, and L. Rozentāle, “Sustainable biomethane integration into Latvia’s natural gas network,” Conference of Environmental and Climate Technologies, Riga, Latvia 15.05.2025.
4. A. Ansonē, L. Rozentāle, and D. Blumberga, “Toward an integrated approach – a conceptual framework for complex biomethane development,” Conference of Environmental and Climate Technologies, Riga, Latvia 14.05.2025.
5. A. Ansonē, L. Rozentale, M. Pelss, C. Rochas, and D. Blumberga, “Gaseous bioresources towards climate neutrality: Case study of Latvia”, 11th International Conference on Smart Energy Systems, Copenhagen, Denmark, 16.09.2025.

Promocijas darba struktūra un izmantotās metodes

Lai sasniegtu promocijas darba mērķi un uzdevumus, promocijas darba struktūra tika veidota, fokusējoties uz biometānu, un šī promocijas darba struktūra redzama 1. attēlā. Promocijas darbs: 1) apvieno vairākus biometāna fiziskus tirgū nonākšanas un aprites aspektus un ar tiem saistīto faktoru izpēti; 2) ietver daudzpusīgu analīzi, piemērojot dažādas pētījuma metodes; 3) piedāvā daudzveidīgus praktiskās lietojamības modeļus no ražošanas līdz galapatēriņam.



1. att. Promocijas darba struktūra.

Promocijas darbs ir izstrādāts, balstoties multimetodiskā pētniecības pieejā, kas aptver literatūras analīzi, datu apstrādi un normatīvā regulējuma izpēti.

1. LITERATŪRAS ANALĪZE

Biogāze ir no atjaunīgajiem resursiem ražota gāze, kas sastāv galvenokārt no metāna (CH_4) un oglekļa dioksīda (CO_2), savukārt citas mazākumā esošas komponentes ir sērūdeņradis (H_2S), slāpeklis (N_2) un skābeklis (O_2). Biometāns tiek iegūts anaerobā organisko vielu, piemēram, lauksaimniecības atlieku, pārtikas atkritumu un notekūdeņu dūņu, noārdīšanas-fermentācijas procesā [1]–[5].

Attīrot biogāzi no piemaisījumiem, tiek iegūts biometāns, kas ir ilgtspējīga un atjaunīga fosilā metāna alternatīva, kas var aizvietot fosilu metānu, vienlaikus joprojām saskaroties ar politiskiem, tehniskiem un ekonomiskiem izaicinājumiem tā attīstībā.

1.1. Eiropas Savienības un Latvijas stratēģiskie mērķi biometāna ražošanā

Saskaņā ar *REPowerEU* plānu, ko Eiropas Komisija publicēja 2022. gada maijā ar mērķi pakāpeniski pārtraukt fosilā kurināmā importu un veicināt Eiropas Savienībā (ES): 1) tīras enerģijas ražošanu; 2) enerģijas taupīšanu; 3) enerģijas piegāžu dažādošanu, viens no mērķiem ir palielināt ilgtspējīga biometāna ražošanu līdz 35 miljardiem kubikmetru jeb ~ 370 TWh 2030. gadā [6], [7]. Salīdzinājumam, 2020. gadā biometāna ražošana ES bija ~ 32 TWh [8], kas nozīmē, ka relatīvi īsā laika periodā biometāna ražošana ES ir jāpalielina 11,6 reizes. ES biometāna potenciāls 2030. gadā ir 44 miljardi kubikmetru jeb ~ 430 TWh [9]. Tādēļ ES biometāna potenciāls 2030. gadam ir par 16 % lielāks nekā ražošanas mērķis ~ 370 TWh, radot potenciālus ieguvumus esošajām gāzes pārvades un uzglabāšanas sistēmām, kā arī ekonomikas attīstībai un ilgtspējības mērķu sasniegšanai valsts līmenī.

Valstis izvirza arvien ambiciozākus neto nulles emisiju mērķus, tāpēc pāreja uz atjaunīgās enerģijas sistēmām kļūst gan par vides nepieciešamību, gan ekonomisku iespēju. Problēma Latvijā ir neizmantots biometāna ražošanas potenciāls. Vienlaikus, NEKP jau 2030. gadam iezīmē potenciālus pasākumus biometāna veicināšanai.

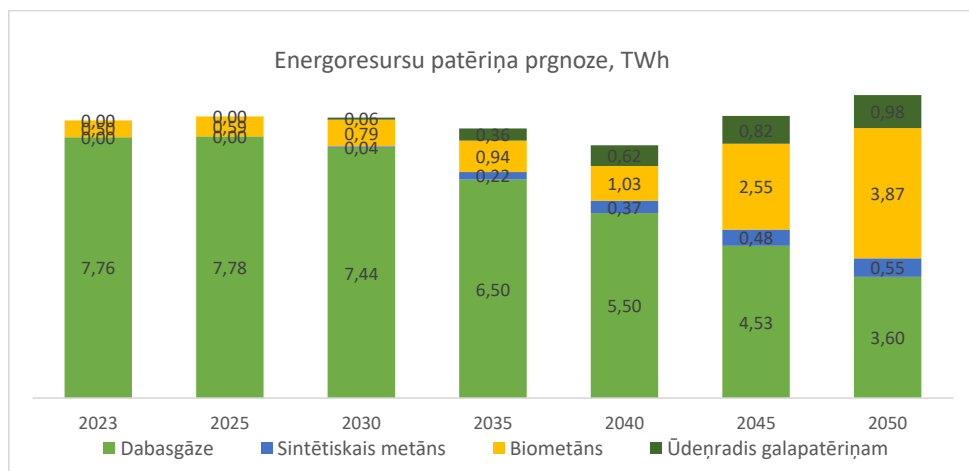
1.2. Energoresursu patēriņa prognozes

2024. gadā Latvijā sāka darboties pirmā nacionālajai dabasgāzes ieejas-izejas sistēmai pieslēgtā biometāna ražošanas iekārta, kas varēja saražot līdz 100 GWh gadā. *Eurostat* enerģijas bilance 2021. gadā liecina, ka Latvijā saražoti 0,07 miljardi m^3 biogāzes jeb 0,42 TWh (pārveidei pieņemtā siltumspēja 6 kWh/ m^3), nenoskaidrot veidu [10]. Taču tobrīd vēl nebija biometāna ražotņu, kas būtu pieslēgtas gāzapgādes sistēmai, lai biometāns nonāktu Latvijas enerģijas tirgū.

Saskaņā ar oficiālo valsts statistiku 2025. gadā dabasgāzes patēriņš gadā Latvijā bija 8,8 TWh [11]. Lai gan paredzams, ka gāzes patēriņš turpmākajos gados pakāpeniski samazināsies, vidējā termiņā tas saglabāsies stabils. Šo samazinājumu veicina tādi faktori kā siltākas ziemas, kas samazina dabasgāzes patēriņu, samazināts rūpnieciskais pieprasījums un pāreja no gāzveida kurināmā uz atjaunīgo energoresursu tehnoloģijām. Tomēr atsevišķām

nozārēm arī turpmāk būs nepieciešama gāze, kur biometāns varētu kalpot kā ideāla atjaunīga alternatīva.

Latvijas Enerģētikas stratēģija 2050. gadam ir ilgtermiņa plānošanas vadlīnijas, kas ietver dažādus Latvijas enerģētikas sektora attīstības scenārijus, kas potenciāli var īstenoties laikā līdz 2050. gadam, balstoties šobrīd definētajos valsts mērķos, un kas var ietekmēt enerģētikas sektora attīstību. Latvijas energobilancē būtiska loma ir dabasgāzei (fosilajam metānam), un ir svarīgi, lai arī ilgtermiņā saglabātos gāzveida energoresursu loma energoapgādes drošībai un atjaunīgās elektroenerģijas jaudu balansēšanai sistēmā. 1.1. attēlā apkopota gāzveida energoresursu patēriņa struktūras prognoze, ņemot vērā stratēģijas vispārējās energoresursu patēriņa prognozes.



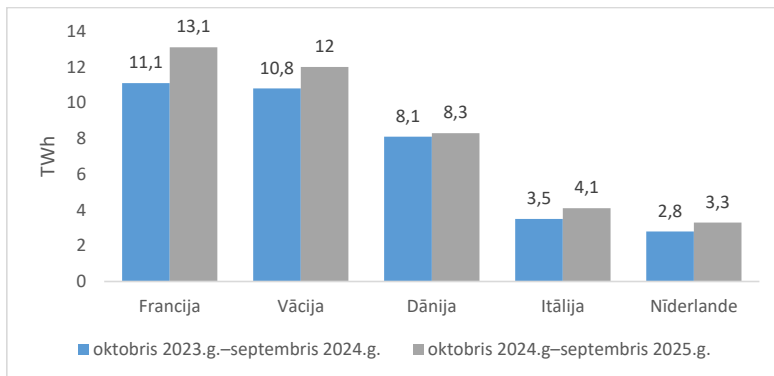
1.1. att. Gāzes patēriņa prognoze 2023.–2050. gadam Latvijā, TWh [autoreis veidots no [12]].

Arī biometāna patēriņa izaugsme prognozēta vairāk nekā 7 reizes – no 0,5 TWh 2023. gadā līdz pat 3,87 TWh 2050. gadā, pārsniedzot dabasgāzes patēriņu. Enerģētikas stratēģijā 2023. gada pieņēmums par dabasgāzes patēriņu bija 7,76 TWh, savukārt faktiskais dabasgāzes patēriņš bija 8,2 TWh. 2025. gadā dabasgāzes patēriņš Latvijā bija 8,83 TWh, un ir redzams, ka faktiskais dabasgāzes patēriņš pārsniedza 2025. gada veidoto prognozi, kas apliecina gāzes lomu energopatēriņa struktūrā [13].

1.3. Biometāna izplatība Eiropas Savienībā un Latvijā

Eiropā darbojas vairāk nekā 21 000 biogāzes staciju, kas kopā saražo aptuveni 234 TWh gadā un nodrošina apmēram 7 % no ES gāzes pieprasījuma [14]. Kopumā secināms, ka pakāpeniski palielinās atjaunīgās gāzes ražošana, ko var izmantot fosilā metāna aizstāšanai.

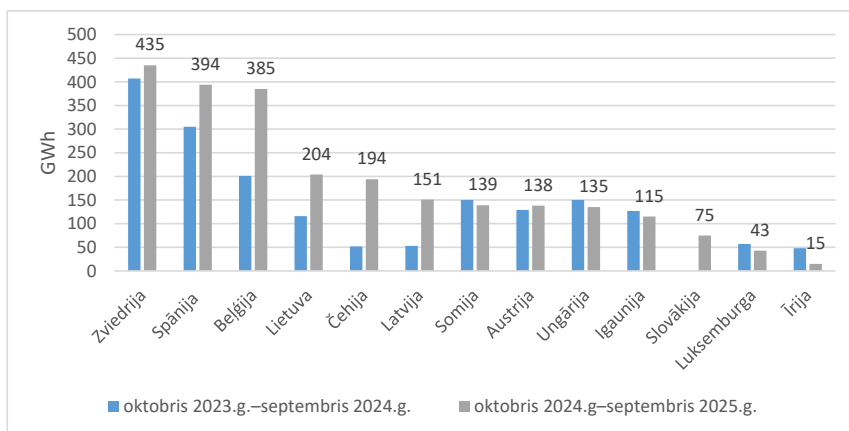
Arī Eiropas gāzes sistēmā novērojama biometāna apjomu pakāpeniska palielināšanās vairumā Eiropas valstu. Periodā no 2024. gada oktobra līdz 2025. gada septembrim lielākie biometāna apjomi ir ievadīti Francijas, Vācijas, Dānijas, Itālijas un Nīderlandes gāzes infrastruktūrā (gāzes pārvades un sadales sistēmās) (1.2. att.). Francijas un Vācijas augstie rādītāji labi saskan ar datiem par lielākajām uzstādītajām biometāna ražotņu jaudām.



1.2. att. Lielākie gāzes infrastruktūrā ievadītā biometāna apjomi, TWh [15].

Šo valstu ievērojamie ražošanas apjomi nav nejaušība, bet gan mērķtiecīgas, salīdzinoši ar Latviju ilgstošas un kompleksas atbalsta politikas mehānismu rezultāts. Atbalsta mehānismu mērķis ir mazināt investīciju risku ražotājiem garantēt vai veicināt patēriņu, tādējādi izveidojot šo gāzes tirgu.

Lai arī Baltijas valstu un Somijas gāzes infrastruktūrā ievadītie biometāna apjomi nav lieli, salīdzinot ar Francijas vai Vācijas apjomiem, tas tik un tā ir vērtējams kā nozīmīgs solis reģionālā atjaunīgo gāzu ražošanas attīstībā (1.3. att.). Zemā attīstība, cita starpā, ir saistīta ar salīdzinoši nelielu vēsturisko valsts atbalstu mehānismu un nesenu regulatīvā ietvara detalizētu attīstību biometāna lomas stiprināšanai.



1.3. att. Pārējo valstu gāzes infrastruktūrā ievadītā biometāna apjomi, GWh [15].

Kopējais Baltijas valstu un Somijas gāzes infrastruktūrā ievadītais biometāna apjoms pārskata periodā no 2024. gada oktobra līdz 2025. gada septembrim sasniedza 609 GWh jeb 0,6 TWh. Salīdzinot ar Somiju un citām Baltijas valstīm, Latvijas biometāna nozare atrodas līdzīgā attīstības posmā. Attīstības virziens ir līdzīgs, tajā noris pakāpeniska pāreja no

decentralizētas biogāzes ražošanas uz biometāna kvalitātes paaugstināšanu, ievadi dabasgāzes infrastruktūrā un izmantošanu transportā, enerģētikā un rūpniecībā, tostarp, gāzi eksportējot.

2025. gadā Latvijas gāzapgādes sistēmā tika ievadītas 0,17 TWh Latvijā ražota biometāna, kas ir 143 % pieaugums, salīdzinot ar pirmo biometāna ievades gadu (2024), kad sistēmā tika ievadītas 0,07 TWh.

Latvijas enerģētikas nozare atrodas sarežģītā laikā, kas saistītas ar pārkārtošanos uz atjaunīgās enerģijas izmantošanu – pārejā no fosilās enerģijas izmantošanu uz jaunu atjaunīgās enerģijas jaudu uzstādīšanu un patēriņu, ilgtermiņa plānošanu, kā arī starptautisko ģeopolitisko norišu kontekstā.

1.4. Biometāna raksturojums, ražošanas izejvielas un tā priekšrocības

Biogāzes ražošana, izmantojot anaerobās fermentācijas tehnoloģiju, ir plaši izmantota pieeja ilgtspējīgai organisko atkritumu izmantošanai un aprites ekonomikas veicināšanai. Biogāzi veido galvenokārt metāns (CH_4) 50–80 %, oglekļa dioksīds (CO_2) 20–50 %, amonjaks (NH_3) 0–300 ppm, sērūdeņradis (H_2S) 50–5000 ppm, slāpekļis (N_2) 1–4 % un skābeklis (< 1 %).

Korelācijas novērtēšanai starp konkrētu izejvielu un tās potenciālo ietekmi uz saražotā metāna daudzumu biogāzē ir vairāki potenciāli ietekmējoši faktori. Izejvielu raksturošanai ir jānovērtē to fizikāli ķīmiskās īpašības, tostarp mitruma saturs un organiskās vielas.

Gāzes ražību jeb saražotā metāna apjomu tajā parasti izsaka kā saražotās biogāzes vai tīra metāna (CH_4) tilpumu uz vienu gaistošo cietvielu (*VS*), kopējo cietvielu (*TS*) vai svaigvielu (*FM*) vienību.

Vispārīnot galvenās izejvielas, var definēt trīs *VS* ražīguma kategorijas:

- zema – < 300 m³ biogāzes/tonnu *VS* (lignoceluloze, liellopu un cūku mēsli);
- vidēja – 300–500 m³ biogāzes/tonnu *VS* (vistu mēsli, sadzīves atkritumi);
- augsta – > 500 m³ biogāzes/tonnu *VS* (kautuvju notekūdeņi, kartupeļu cietes notekūdeņi) [16].

Atkarībā no izejvielām var saražot apmēram 190 līdz 1100 m³ biogāzes uz tonnu *VS*, taču praksē, analizējot plašāku izejvielu klāstu, šī amplitūda var būt lielāka. Attiecīgi šo apsvērumu var ņemt vērā ražotāji, kuru galvenā interese ir pēc iespējas augstāka metāna koncentrācija saražotajā gāzē [17].

Biometānu ir iespējams izmantot siltuma un elektroenerģijas ražošanā, centralizētajā siltumapgādē, rūpniecībā, transportā un energosistēmas balansēšanā. Tā savietojamība ar esošo gāzes infrastruktūru, enerģijas uzkrāšanas iespējas un loma aprites ekonomikā un bioekonomikā apliecina biometāna nozīmi enerģētikas sektora dekarbonizācijā.

1.5. Palielināta biometāna īpatsvara radītie riski gāzes infrastruktūrai

Latvijā viena no lielākajām enerģētikas infrastruktūras vērtībām ir Inčukalna pazemes gāzes krātuve (PGK) ar aptuveni 24 TWh aktīvās gāzes ietilpību. Biometāna ražošanas pieaugums un tā ievadīšana gāzes sistēmā gan Latvijā, gan citās valstīs rada arvien vairāk tehnisku risku un negatīvu seku, kas rūpīgi jāizvērtē, jo īpaši attiecībā uz PGK ilgtermiņa

darbības stabilitāti un nepārtrauktību. Arī Latvijā Inčukalna PGK saskaras ar jauniem, skābekļa radītiem riskiem, ko rada vēsturiski nebijis atjaunīgās gāzes īpatnība palielinājums sistēmā.

Kvalitātes prasības gan sistēmā ievadamajai dabasgāzei, gan biometānam, nosaka, ka pieļaujamā skābekļa jeb O₂ koncentrācija ir līdz 0,5 mol%. Savukārt, gāzi ievadot dabasgāzes pārvades sistēmas daļā, kas ir tieši saistīta ar Inčukalna PGK, atļautā skābekļa koncentrācija ir līdz 0,02 mol%. Tas tādēļ, ka pat neliels skābekļa daudzums var izraisīt dažādus ķīmiskus un mikrobioloģiskus procesus PGK iekārtām un struktūrai [18]. Šie procesi var izraisīt finansiāli ietilpīgus infrastruktūras bojājumus, samazinātu uzglabāšanas efektivitāti un attiecīgi radīt arī gāzapgādes drošības apdraudējumus.

Biometānā esošā skābekļa, oglekļa dioksīda vai sērūdeņraža koncentrācija rada riskus PGK izraisīt bioķīmiskas un ģeokīmiskas reakcijas, kas var radīt koroziju un negatīvi iespaidot urbumu darbību, kā arī ietekmēt dehidrācijas, desulfurizācijas un kompresijas procesus.

Stratēģisko aktīvu aizsargāšana, vienlaikus nodrošinot pāreju uz atjaunīgās enerģijas izmantošanu, liek rast līdzsvaru starp tehniskajām iespējām, atbilstību normatīvajiem aktiem un uz nākotni orientētiem ieguldījumiem. Uzglabāšanas operators sistēmas uzraudzību īsteno, veicot regulāras sistēmas pārbaudes, plānotus remontdarbus, modernizāciju, apkopes, kā arī gāzes kvalitātes kontroli un vispārējo sistēmas monitoringu atbilstoši izveidotajām procedūrām. Svarīga loma ir sadarbībai ar citiem sistēmu operatori un biometāna ražotājiem, kas ietver biometāna ievades testēšanu, regulāru gāzes kvalitātes uzraudzību un sadarbību tehnisko prasību noteikšanā. Izmaiņas krātuvju struktūrās var notikt arī ilgākā laikā, līdz ar to pastāv vēl daudz nezināmā par reakcijām un veidojumiem, kas attīstās krātuves dziļēs noteiktu apstākļu un gāzes struktūras maiņas gadījumā.

1.6. Biometāna attīstības un tirgus integrācijas izaicinājumi un iespējas

Latvijā ir aptuveni 50 biogāzes stacijas, kuru kopējā elektriskā jauda ir 60,5 MW un kuru attīstība biometāna ražošanas virzienā var veicināt gāzes sektora dekarbonizāciju, energoapgādes drošību un aprites ekonomiku [19]. Biometāna integrācijai tirgū ir pieejami vairāki risinājumi. Tiešs biometāna ražotnes pieslēgums savstarpēji savienotajai gāzes sistēmai, biometāna ievadīšana BIP vai piegāde ārpus gāzes sistēmas tiešajiem patērētājiem. Attīstību ierobežo augstas investīciju izmaksas, izejvielu pieejamība un loģistika, gāzes kvalitātes prasību izpilde, regulatīvā nenoteiktība un ilgtermiņa attīstības stratēģijas trūkums. Vienlaikus Enerģētikas likuma grozījumi par biometāna ievades punktu attīstību un NEKP paredzētie pasākumi rada priekšnoteikumus biometāna integrācijai transporta, siltumapgādes, elektroenerģijas ražošanas un gāzes sektorā [13].

1.7. Fokuss biometāna ražotņu savienojumam ar gāzes sistēmu un tirgus integrācijas scenārijiem

Ir trīs galvenie scenāriji vai veidi, kā biometāns var nonākt enerģijas tirgū: 1) tiešs pieslēgums, kur biometāna ražotne ir tieši savienota, izmantojot cauruļvadu pieslēgumu ar gāzes pārvades vai sadales sistēmu; 2) izmantojot BIP, kur biometāns tiek transportēts ievadei gāzes sistēmā ar transportlīdzekļiem; 3) ārpus sistēmas risinājumi, kur biometāns tiek

transportēts tieši no ražotnes līdz galapatērētājam, neizmantojot gāzes sistēmu. Katrs no šiem scenārijiem ir svarīgs, jo no dažādiem vides, ekonomiskiem un tehniskiem faktoriem ir atkarīgs tas, kurš no veidiem biometāna nonākšanai tirgū ir optimālākais. Tiešie pieslēgumi sistēmai var sniegt jaudu pieejamības priekšrocības biometāna ražotājiem, bet prasa ievērojamus sākotnējos ieguldījumus infrastruktūrā. Ievadišana BIP var samazināt izmaksas katram atsevišķam biometāna ražotājam, jo tiem nav jāveido savienojums ar sistēmu, un sniedz ieguvumus, ja stacija atrodas pietiekami tuvu BIP ar pieejamu ceļu infrastruktūru. BIP ir alternatīva ražotājiem, kuri nevar izbūvēt tiešu sistēmas pieslēgumu attāluma vai juridisku izaicinājumu dēļ, piemēram, nespēj vienoties ar zemes īpašniekiem par cauruļvada izbūvi vai cauruļvada vajadzībām līdz aizsargājamām teritorijām. Risinājumi, kas pilnībā izslēdz esošās gāzes infrastruktūras izmantošanu jeb ārpussistēmas risinājumi, nodrošina elastību un pieejamību, bet ir saistīti ar papildu loģistikas sarežģītumiem, kā arī pastāv juridiski izaicinājumi saistībā ar biometāna izsekošanu, to transportējot ārpus gāzes sistēmas, jo vairākās ES valstīs trūkst detalizētu atbildīgo pušu un procedūru ārpussistēmas biometāna izmantošanai. Kā secināja *Ferrari et al.*, lai samazinātu transporta izmaksas un siltumnīcefekta gāzu emisijas, ir svarīgi atrast optimālas rūpnīcu atrašanās vietas, kā arī būtiska to modernizācija no biogāzes uz biometānu ražošanu, jo piemērota ražotņu atrašanās vieta samazina gan siltumnīcefekta gāzu emisijas, gan ražotnes ekspluatācijas izmaksas [20]–[22].

Vairums esošo pētījumu galvenokārt koncentrējas uz tehnoloģisko modernizāciju vai kopējo ietekmi uz ilgtspēju, neapverot aspektus, kas saistīti ar infrastruktūras izvēli un kombinēšanu, lai noteiktu labāko vides, ekonomisko un tehnisko sniegumu. Pamatojoties uz identificēto pētniecības nepilnību, šis pētījums tiek virzīts ar šādiem pētniecības jautājumiem un zinātniskajiem ieguldījumiem.

Lai risinātu jautājumus, kas iepriekšējos pētījumos attiecībā uz biometāna integrācijas ceļu sistemātisku salīdzinājumu nav pietiekami aplūkoti, promocijas darba pētījums pievēršas diviem būtiskiem pētījuma jautājumiem: 1) kurš biometāna integrācijas veids tirgū nodrošina vislīdzsvarotāko sniegumu, vienlaikus izvērtējot vides, ekonomiskos un tehniskos kritērijus; 2) cik noturīgs ir iegūto scenāriju rangs pret izmaiņām, ja mainās lēmumu pieņēmēju prioritātes, un kādos apstākļos alternatīvie integrācijas ceļi var kļūt par vēlamākiem, ņemot vērā infrastruktūras plānošanu un enerģētikas politikas izstrādi.

Līdz ar to ir lietderīgi izvērtēt katru scenāriju par biometāna nonākšanu tirgū saistībā ar dažādiem vides, ekonomiskajiem un tehnoloģiskajiem parametriem, lai novērtētu, kurš no variantiem ir vispiemērotākais, ņemot vērā vairākus aspektus.

2. METODIKA

Viens no pētījuma mērķiem ir izveidot konceptuālu ietvaru, lai veicinātu biometāna attīstību un viedu enerģētikas pārkārtošanu, integrējot dažādus aspektus starpdisciplinārai pieejai. Sekojot autores izstrādātajam pētniecības plānam, ir iespējams veikt plašu energosistēmas nepilnību analīzi un nodrošināt nākotnes attīstības idejas un plānus, pamatojoties uz datiem un modelēšanu arī citu energoresursu novērtēšanai.

2.1. tabula

Pētījuma jautājumu sasaiste ar izmantoto metodiku

Pētījuma jautājums	Izmantotā metode	Rezultāti
Kādu metožu izvēle ir piemērota biometāna sistēmiskai izpētei?	Kvantitatīvā kontentanalīze	Izvēlētas piemērotākās izpētes metodes šim darbam.
Kādas tēmas un problēmas ir aktuālas zinātniskajā izpētē; vai izaicinājumi saskan ar Latvijas gadījumu; kas vēl nav plaši pētīts?	Bibliometriskā analīze	Identificēti galvenie izaicinājumi un brīvā izpētes niša. Identificēts, kādas tēmas ir plaši pārstāvētas un kurās jomās vēl ir iztrūkums.
Kā praktiski biometāns tiek integrēts energosistēmās, kā to izmanto pilsētās?	Izpētošā gadījumu analīze	Iegūtas atziņas par atjaunīgās gāzes integrācijas pilsētas siltumapgādē rezultātiem.
Biometāna integrācijas analīze, kā to integrēt enerģijas tirgū; piemērotība kā optimālam gāzveida kurināmajam?	Daudzkritēriju lēmumu analīze (<i>TOPSIS</i> metode)	Ar nozares ekspertu iesaisti un matemātiskiem aprēķiniem iegūti rezultāti optimālai biometāna integrācijai sistēmā, novērtēšana kā energoresursam un aprēķinātas tā optimālas lietojamības iespējas.
Kas ietekmē biometāna ražošanu un kā uzlabot ražošanas efektivitāti?	Regresijas analīze	Noteikta izmantoto izejvielu ietekme uz saražotā biometāna daudzumu.
Cik ekonomiski pamatoti ražot un izmantot biometānu?	Izmaksu ieguvumu analīze (<i>CBA</i>)	Izmaksu monetārs novērtējums.
Kāda ir biometāna sistēmiskā loma, kādi ir ieguvumi?	Optimizācijas modelis	Attīstības ietvars.

2.1. tabula koncentrēti paskaidrots, kura metode šī promocijas darba izstrādes gaitā tika izmantota, lai atbildētu uz attiecīgo pētījuma jautājumu.

Darba novitāte ir šo metožu integrēšana vienotā biometānam pielāgotā sistēmā, tādējādi pilnveidojot iepriekšējos atjaunīgās enerģijas plānošanas pētījumus, saskaņojot vides, tehniskos un sociālekonomiskos aspektus vienā strukturētā darba plūsmā.

2.1. Kvantitatīvā kontentanalīze

Viena no darbā izmantotajām metodēm ir kvantitatīvā kontentanalīze, kas zināma arī kā satura analīze. Kontentanalīze ir tekstuālu datu analīzes metode, kas ļauj sistemātiski analizēt literatūras avotus, identificēt galvenās tēmas, pieejas un metodoloģiskos virzienus, kā arī strukturēti kategorizēt informāciju. Šī metode tiek izmantota, lai interpretētu dažādos avotos pieejamo informāciju, identificējot galvenās pieejas, piemēram, biometāna sistēmu analīzei un novērtēšanai [23].

Šajā pētījumā kvantitatīvā kontentanalīze tiek piemērota literatūras un teorētiskai galveno zinātnisko metožu sistemātiskai analīzei. Literatūras analīze tika veikta, izmantojot *Scopus* un *Science Direct* zinātniskās datubāzes, kā arī citus ar enerģētikas sistēmu saistītus avotus. Analīzē izmantoti atslēgvārdi, kas mērķēti uz šo pētījumu, piemēram, *biomethane, production, renewable gas systems, biomethane integration, LCA, system dynamics, multi-criteria decision analysis*. Kontentanalīzes rezultātā tika identificētas vairākas biežāk izmantotās metodes, tostarp, sistēmdinamika, aprites cikla analīze un daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas analīze, kas padziļināti analizēta atsevišķi. Šīs metodes tika strukturētas un analizētas, lai izvērtētu to potenciālo lietojumu biometāna sistēmu attīstības, ilgtspējas un infrastruktūras analīzē. Kontentanalīzes rezultātā identificētās metodes ļauj strukturēti izvērtēt biometāna sistēmu analīzes pieejas un kalpo par teorētisko pamatu turpmākajām analītiskajām metodēm šajā pētījumā.

2.2. Bibliometriskā analīze

Bibliometriskā analīze tika izmantota, lai identificētu pētniecībā pastāvošos trūkumus, tēmas, kas vēl nav plaši pētītas, vai kādi zinātniskie pētījumi ir mazāk pārstāvēti ar biometānu saistīto jautājumu analīzē. Bibliometriskā analīze ir sistemātiska literatūras analīze, kas ļauj identificēt konkrētas nozares tendences, balstoties kvantitatīvos rādītājos. Tai ir trīs galvenie soļi – datu vākšana no atbilstošām datubāzēm, datu pārskatīšana un standartizācija, arī šo datu pakļaušana dažādām bibliometriskās analīzes metodēm. Šī pētniecības metode balstās lielās datu kopās, kas atlasītas, piemēram, balstoties konkrētā atslēgvārdu atrašanās, citējamības apmērā (skaitā), autoru uzvārdos, valstīs, tēmas biežumā zinātniskajās publikācijās u. c. iespējamajos apsvērumos, taču rezultātu interpretācija bieži vien ietver gan kvantitatīvas, gan kvalitatīvas pieejas [24], [25].

Pētījumā izmantota *VOS Viewer* programmatūra, kas izceļas ar vizualizācijas kvalitāti un datu apstrādes efektivitāti un ko plaši izmanto bibliometriskajā analīzē un citējamības izvērtējumos, lai veidotu un vizualizētu tā sauktos bibliometriskos tīklus [26].

Bibliometriskā analīze tika veikta *Elsevier Scopus* un *Web of Science* datubāzēs, promocijas darba izstrādes gaitā izpēte tika veikta 2025. gadā septembrī. Minētās datubāzes

tika izvēlētas kā piemērotākās, ievērojot tajās pieejamo plaša tvēruma un apjoma kvalitatīvu rakstu klāstu.

Publikāciju atbilstības analīze balstījās šādos autores identificētos noteicošajos kritērijos: atslēgvārds; dokumenta veids; dokumenta izdošanas laika periods; dokumentā lietotā valoda. Publikāciju atlasē tika izmantoti atslēgvārdu salikumi piecās grupās, kas balstās promocijas darbā detalizēti vērtētajos izaicinājumos: 1) pieslēgumu izbūve biometāna ievadīšanai dabasgāzes sistēmā; 2) biometāna ievadīšana speciālos ievades punktos dabasgāzes pārvades sistēmā; 3) biometāna transportēšana uz degvielas uzpildes stacijām tālākai izmantošanai (transporta degviela); 4) jaunu augstas pievienotās vērtības produktu ražošana no biometāna; 5) biometāna kvalitātes radītie infrastruktūras izaicinājumi.

Vienlaikus bibliometriskās analīzes mērķis ir izvērtēt, vai izaicinājumi, kas identificēti Latvijas gadījumā, ir uzskatāmi par tik pat izplatītiem un attiecīgi zinātniski pētītiem izaicinājumiem citviet pasaulē.

2.3. Izpētošā gadījumu analīze

Izpētošā gadījumu analīze (*exploratory case study*) ir viens no kvalitatīvajiem pētījumu veidiem, un tās mērķis ir iegūt padziļinātu izpratni par kādu jautājumu [27]. Pētījumā izmantota naratīvā apskata metode, analizējot zinātnisko literatūru, Latvijas normatīvos aktus, NEKP 2030. gadam, kā arī nozares ekspertu viedokļus. Papildus veikta strukturēta salīdzinošā analīze par biogāzes un biometāna izmantošanu centralizētās siltumapgādes sistēmās, izvērtējot divus reprezentatīvus Eiropas gadījumu pētījumus – *Meppel* pilsētas centralizētās siltumapgādes sistēmu Nīderlandē un *Backbone* energosistēmas modelēšanas ietvaru Somijā. *Meppel* gadījums ilustrē vietēja mēroga hibrīdās enerģētikas sistēmas optimizāciju, kurā apvienota biogāzes koģenerācija, siltumsūkņi, siltuma uzkrāšana un centralizētā siltumapgāde. Savukārt *Backbone* modelis atspoguļo liela mēroga reģionālu optimizāciju savstarpēji saistītām elektroenerģijas, siltumapgādes un biomasas piegādes sistēmām.

Analīze tika veikta, vērtējot un salīdzinot modelēšanas pieejas, energoefektivitātes un emisiju rādītājus, darbības elastīgumu, atjaunīgo energoresursu integrāciju, kā arī politikas un investīciju ietekmi. Šajā izpētē izmantotās metodes balstās strukturētā literatūras pārskata veidošanā, kas paredzēts, lai sistemātiski apkopotu un novērtētu esošo zinātnisko literatūru par biogāzes un biometāna izmantošanu centralizētās siltumapgādes sistēmās. Balstoties iegūtajā analīzē un atziņās, ir iespējams izveidot pārskatu par šo atjaunīgo gāzu nozīmīgo potenciālu un praktisko lietojumu.

2.4. Daudzkritēriju lēmumu analīze, piemērojot TOPSIS metodi

Daudzkritēriju lēmumu pieņemšanas jeb *MCDM* metodes ir plaši izmantotas zinātniskajos pētījumos un kļuvušas par noderīgu instrumentu mūsdienu lēmumu analīzē, piedāvājot sistemātiskas pieejas alternatīvu novērtēšanai un klasifikācijai dažādos gadījumos. Šīs metodes ir efektīvas sarežģītu problēmu risināšanā, kur lēmumu pieņēmējiem vienlaikus jāapsver vairāki, bieži vien pretrunīgi kritēriji, lai panāktu optimālus risinājumus. Viena no šādām

metodēm ir *TOPSIS*, kas izvēlēta šajā pētījumā, kur aprēķini tika veikti, izmantojot *Microsoft Excel* programmu.

Pētījumā tika izveidotas novērtēšanas matricas, lai veiktu analīzi, taču uzticamu un visaptverošu datu pieejamība ir ierobežota, līdz ar to izvēlēta iespēja izmantot ekspertu novērtējumu. Ekspertiem ar ilgstošu pieredzi vides un enerģētikas inženierzinātņu zinātniskajā pētniecībā, gāzes infrastruktūras ekspertiem ar inženiertehnisko un tehnisko izglītību, kā arī politikas veidotāju ekspertiem, kas strādā enerģētikas un ekonomikas attīstības jomā, tika lūgts novērtēt izstrādāto kritēriju skaitlisko vērtību. Reitingi tika aprēķināti, lai noteiktu vidējo rādītāju, un vidējie vērtējumi tika ievadīti matricā.

TOPSIS aprēķina soļi ir aprakstīti 2.1.–2.6. vienādojumā [28]. Ievade ir lēmuma dati V un svaru kopa w , savukārt izeja ir tuvuma mērs r [29]. Pirmais solis ir normalizācija, kur katram novērtējumam $v_{m,k}$ ir jāveic šāda normalizācija:

$$u_{m,k} = \frac{v_{m,k}}{\sqrt{\sum_{k=1}^K v_{m,k}^2}}, \quad m = 1, \dots, M, \quad k = 1, \dots, K, \quad (2.1)$$

kur $v_{m,k}$ apzīmē alternatīvas A_k ($k = 1, 2, \dots, K$) novērtējumu attiecībā uz kritēriju C_m ($m = 1, 2, \dots, M$).

Otrais solis ir svērtā normalizācija, kur katram normalizētajam novērtējumam $u_{m,k}$ ir nepieciešams veikt svērtās normalizācijas aprēķinus, kur $p_{m,k}$ – veikspējas rādītāja normalizētā vērtība $v_{m,k}$:

$$p_{m,k} = w_m u_{m,k}, \quad m = 1, \dots, M, \quad k = 1, \dots, K. \quad (2.2)$$

Trešais solis ir pozitīvās (*PIA*) un negatīvās ideālās alternatīvas (*NIA*) noteikšana, izmantojot 2.3. vienādojumu:

$$PIA = p^+ = \{p_1^+, p_2^+, \dots, p_M^+\} \text{ un } NIA = p^- = \{p_1^-, p_2^-, \dots, p_M^-\}, \quad (2.3)$$

kur $p_m^+ = \max \{p_{m,k} | 1 \leq k \leq K\}$ un $p_m^- = \min \{p_{m,k} | 1 \leq k \leq K\}$, $m = 1, \dots, M$. Tajā ir katra kritērija labākās (ideālās) un sliktākās (negatīvās) vērtības.

Ceturtais solis ir Eiklīda attālumu aprēķināšana no katras alternatīvas A_k un gan pozitīva ideāla risinājuma, gan negatīva ideāla risinājuma:

$$D_k^+ = \sqrt{(p_k - p^+)^T + (p_k - p^+)}, \quad k = 1, \dots, K \quad (2.4)$$

un

$$D_k^- = \sqrt{(p_k - p^-)^T + (p_k - p^-)}, \quad k = 1, \dots, K, \quad (2.5)$$

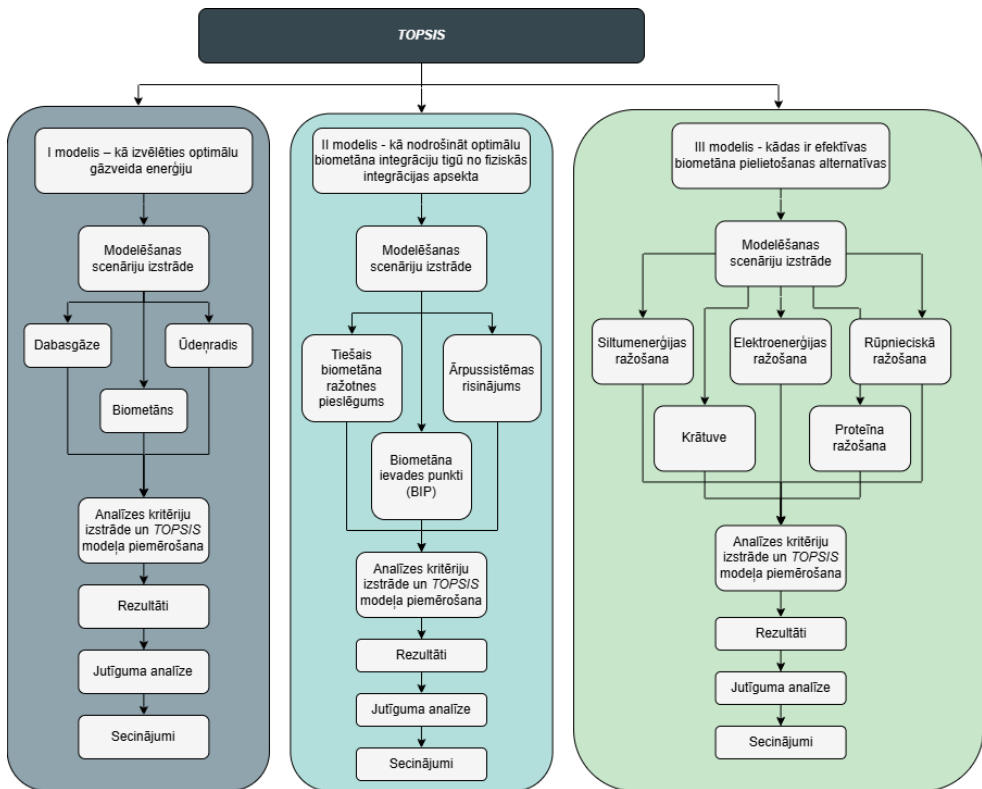
kur $p_k = [p_{1,k}, p_{2,k}, \dots, p_{M,k}]$.

Piektais solis ir tuvuma mēra – koeficienta (r_k) aprēķināšana katrai alternatīvai A_k :

$$r_k = \frac{D_k^-}{D_k^+ + D_k^-}, k = 1, \dots, K. \quad (2.6)$$

Pēc tam tiek noteikts skaidrs rangs, pamatojoties uz relatīvo tuvumu ideālajam risinājumam. Ieguvums, izmantojot *TOPSIS*, ir tas, ka vērtības ar dažādām mērvienībām var salīdzināt. Labākos risinājumus var noteikt un analizēt neatkarīgi no izmantotajām mērvienībām [30]–[32].

Pētījuma mērķu sasniegšanai *TOPSIS* metode tika piemērota vairākkārt – kā trīs atsevišķi modeļi, lai atbildētu uz atsevišķiem pētījuma jautājumiem. Ar modeļu palīdzību novērtētas atbildes uz šādiem jautājumiem: I) kurš ir optimāls gāzveida kurināmais; II) kā nodrošināt optimālu biometāna integrāciju tirgū no fiziskās integrācijas viedokļa; III) kādas ir efektīvas biometāna lietošanas alternatīvas. Lai piemērotā metodika un modeļu lietojums būtu loģiski saprotami, šī metodika ir vizualizēta (2.1. att.).



2.1. att. *TOPSIS* piemērošanas metodika.

Katrā no *TOPSIS* piemērošanas veidiem tika ievēroti vienoti metodoloģiskie principi un procesu loģika. Atšķirīgais ir scenāriji, kas katrā no gadījumiem tika salīdzināti.

2.5. Regresijas analīze

Izmantojot pilna mēroga biometāna ražotnes faktiskos darbības datus septiņu mēnešu periodā, tika aptverta visa biometāna vērtības ķēde no izejvielu saņemšanas līdz biometāna ievadei savstarpēji savienotajā gāzes sistēmā. Korelācijas analīze tika izmantota, lai identificētu ietekmīgākos mainīgos, kas ietekmē biometāna kvalitāti un ražu, saskaņā ar pieejām, kas aprakstītas [33], [34]. Pēc tam tika izmantota regresijas analīze, lai iegūtu analītiskās attiecības starp izejvielu sastāvu un procesa parametriem, kā parādīts [35]–[37].

Izejvielas tika iedalītas četrās grupās: dzīvnieku atkritumi; lauksaimniecības atkritumi; pārtikas rūpniecības atkritumi; sadzīves vai rūpnieciskās dūņas. Regresijas analīzes matemātiskais apraksts un izmantotie vienādojumi apkopoti 2.7–2.13 vienādojumos. Izmantojot sākotnējos datus, regresijas vienādojumam ir šāda forma:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n, \quad (2.7)$$

kur y – atkarīgais mainīgais; b_0 – brīvais regresijas termins; $b_1 \dots b_n$ – regresijas koeficienti; $x_1 \dots x_n$ – neatkarīgi mainīgie. Jānovērtē koeficientu nozīmīgums. Tas ir vairākkārtējs regresijas modelis. Viena faktora regresijas modeli apraksta vienādojums:

$$y = b_0 + b_1x. \quad (2.8)$$

Lai novērtētu koeficientu $b_0 \dots b_n$ statistisko nozīmīgumu, 2.7 un 2.8 vienādojumā tiek izmantots t testa kritērijs. Testa statistika seko Stjūdenta t sadalījumam ar:

$$f = m - (n + 1), \quad (2.9)$$

kur m – izlases lielums; $n+1$ – aprēķināto parametru skaits, ieskaitot pārtveršanu.

Daudzums m raksturo statistiskajai analīzei pakļauto datu apjomu, n apzīmē neatkarīgo mainīgo lielumu skaitu regresijas vienādojumā. Lai novērtētu regresijas koeficientus, datora aprēķinātā t statistika katram koeficientam tiek salīdzināta ar kritisko vērtību $|t| > t_{\text{tab}}$, kas iegūta no Stjūdenta t sadalījuma tabulas atbilstoši izvēlētajam nozīmīguma līmenim P un brīvības pakāpēm f . Ar enerģiju saistītu datu apstrādē bieži tiek izmantots nozīmīguma līmenis $= 0,05$, kas atbilst ticamības varbūtībai $1-P = 0,95$.

Ja nosacījums $|t| > t_{\text{tab}}$ ir izpildīts noteiktam koeficientam, tad koeficients tiek uzskatīts par statistiski nozīmīgu un tam jāpaliek regresijas vienādojumā. Pretējā gadījumā atbilstošais termins ir jānoņem, analīzi atkārtojot, līdz visi atlikušie koeficienti ir statistiski nozīmīgi.

Iegūtais regresijas vienādojums atspoguļo analizējamās parādības matemātisko modeli, un tas ir jāizvērtē tālāk.

Novērtējums tiek veikts, izmantojot dispersijas analīzi, izmantojot Fišera F kritēriju. Šim nolūkam tiek ņemta vērā atkarīgā mainīgā dispersijas attiecība pret atlikumu dispersiju:

$$F(f_1, f_2) = \frac{S_{reg}^2(f_1)}{S_{atl}^2(f_2)}, \quad (2.10)$$

kur $S_{reg}^2(f_1)$ – dispersija, kas izskaidrojama ar regresiju; $S_{atl}^2 \times (f_2)$ – atlikuma vidējais rādītājs. Atlikums ir definēts kā starpība starp atkarīgā mainīgā novēroto vērtību un vērtību, kas aprēķināta no regresijas vienādojuma $y_i - y_i^{apr}$.

Brīvības pakāpes f_1 un f_2 , kas nepieciešamas Fišera F kritērija novērtēšanai, tiek aprēķinātas šādi:

$$f_1 = m - 1, \quad f_2 = m - n. \quad (2.11)$$

Ja F kritērija aprēķinātā vērtība pārsniedz kritisko vērtību, kas iegūta no F sadalījuma tabulām, ņemot vērā brīvības pakāpes f_1 un f_2 un izvēlēto nozīmīguma līmeni P , tad regresijas vienādojums tiek uzskatīts par statistiski nozīmīgu. Šajā gadījumā vienādojums adekvāti apraksta eksperimentālos datus un to var uzskatīt par īstenojamu.

Ja lineārie viena faktora vai daudzfaktoru regresijas modeļi apmierinoši neapraksta analizējamo parādību, ir jāapsver augstākas kārtas modeļi. Tas parasti ietver nelineāru terminu ieviešanu modelī. Ja iespējams, neatkarīgo mainīgo nelineārie termini tiek pārveidoti par jauniem mainīgajiem, ļaujot regresijas vienādojumam palikt lineāram attiecībā pret tā parametriem (t. i., tas kļūst par linearizējamu nelineāru modeli).

Piemēram, divu neatkarīgu mainīgo gadījumā nelineāru regresijas vienādojumu var uzrakstīt vispārējā formā:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1^2 + b_4x_2^2 + b_5x_1 \times x_2. \quad (2.12)$$

Šo vienādojumu var linearizēt, ieviešot jaunus mainīgos, kas atbilst nelineārajiem terminiem:

$$x_3 = x_1^2; \quad x_4 = x_2^2; \quad x_5 = x_1 \times x_2.$$

Izmantojot šīs aizstāšanas, linearizēto regresijas vienādojumu var izteikt kā:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5. \quad (2.13)$$

Koeficienti $b_0 \dots b_5$ 2.13. vienādojumā nosaka ar mazāko kvadrātu metodi (vai citu novērtēšanas metodi), un to statistisko nozīmīgumu novērtē, izmantojot t kritēriju. Regresijas vienādojuma vispārējo atbilstību novērtē, izmantojot Fišera F kritēriju, kā aprakstīts iepriekš. Viens no regresijas analīzes galvenajiem uzdevumiem ir vispiemērotākā modeļa izvēle.

2.6. Izmaksu un ieguvumu analīze (CBA)

Izmaksu un ieguvumu analīze (*Cost-Benefit Analysis* jeb *CBA*) tika izmantota, lai izvērtētu dažādu iespējamo risinājumu ekonomisko lietderību. Līdzīgi kā autores veiktajā

bibliometriskajā un daudzkritēriju analīzē, izmaksu efektivitātes analīzei tika izvēlēti trīs scenāriji: 1) biometāna ievade dabasgāzes sistēmā no ražotnes; 2) biometāna transportēšana ar autotransportu uz BIP; 3) biometāna tieša piegāde patērētājam, neizmantojot gāzes sistēmu.

Novērtējumā tika iekļautas sākotnējās investīcijas jeb kapitālieguldījumi (*CAPEX*), darbības izmaksas (*OPEX*), degvielas izmaksas (2. un 3. scenārijā), kā arī provizoriskie ienākumi un projekta atmaksāšanās laiks. Kapitālieguldījumu aprēķins ietver visas vienreizējās izmaksas, kas nepieciešamas projekta iesākšanai, savukārt *OPEX* ietver ar sistēmas darbību saistītās izmaksas, tostarp iekārtu ekspluatāciju, enerģijas patēriņu, darbaspēka resursus, uzturēšanu un remontdarbus. Lai pilnvērtīgi izvērtētu biogāzes integrācijas Latvijas dabasgāzes sistēmā ekonomisko lietderību, kapitālieguldījumi un ekspluatācijas izmaksas tika analizēti kopā ar potenciālajiem ieņēmumiem, aprēķinot projekta atmaksāšanās periodu. Papildus tiešajām darbības un kapitāla izmaksām analīzē tika ņemti vērā arī netiešie ekonomiskie ieguvumi un ārējie ieguvumi, tostarp iespēja izvairīties no oglekļa dioksīda emisiju kvotu izmaksām, samazināt nekontrolētās emisijas un veicināt pāreju uz aprites ekonomikas principiem.

2.7. Optimizācijas modelis

Optimizācijas modelis ir lēmuma problēmas matemātisks attēlojums, kurā viens vai vairāki darbības rādītāji (objektīvās funkcijas) tiek maksimāli palielināti vai samazināti, ievērojot tehnisku, ekonomisku vai vides ierobežojumu kopumu.

Optimizācijas modelis tika izveidots *Microsoft Excel* programmā, lai identificētu ekonomiski optimālo metāna (CH_4) koncentrācijas līmeni biometāna ražošanā līdzsvarotu ražošanas izmaksu un ieņēmumu gadījumā. Šajā pētījumā modelis tika balstīts pieņēmumā, ka ražošanas izmaksu līkne eksponenciāli palielinās ar augstāku CH_4 koncentrāciju dārgāku izejvielu, augstāka enerģijas patēriņa procesā un papildu attīrīšanas prasību dēļ. Savukārt potenciālo tirgus vērtību atspoguļo ienākumu līkne, kas pieaug līdz ar augstāku metāna saturu, pateicoties paaugstinātai siltumspējai un tirgus cenai par enerģijas vienību. Šo divu līkņu krustošanās punkts nosaka optimālo CH_4 koncentrāciju, kur peļņas norma ir maksimāli liela. Datu kopa ietver CH_4 koncentrāciju (%), izejvielu daudzumu (t) un ar biometāna pārdošanu saistītās ieņēmumu vērtības (EUR). Optimizācijas pieejā tika analizēta biogāzes CH_4 koncentrācijas mainīšanas ietekme uz izlīdzinātajām ražošanas izmaksām un peļņu, izvērtējot reprezentatīvus scenārijus ar 50 %, 55 % un 59 % CH_4 koncentrāciju. Papildus tika analizēta oglekļa cenas noteikšanas ietekme (*ETS 2*), novērtējot, kā izvairīšanās no CO_2 emisiju radīšanas vai emisijas kvotu tirdzniecība ietekmē biometāna ražošanas ekonomisko optimumu. Tādējādi tiek nodrošināta sistēma, kas novērtē, kā izejvielu sastāva, procesu efektivitātes un politikas instrumentu izmaiņas ietekmē biometāna ražošanas ekonomisko ilgtspēju.

3. REZULTĀTI

3.1. Kvantitatīvās kontentanalīzes rezultāti

Kvantitatīvās kontentanalīzes rezultātos ir definēti secinājumi par dažādu metožu teorētiskajiem ieguvumiem un vienlaikus arī pamatoti izvēlētas noteiktas metodes, lai atbildētu uz šī pētījuma jautājumiem. Izvēlētas metodes turpmākajās darba nodaļās tika lietotas attiecīgo pētījuma jautājumu padziļinātai analīzei. Sekojoši aplūkotas kvantitatīvās kontentanalīzes rezultātos secinātās atziņas jeb konceptuālie rezultāti, kas iegūti, neveicot faktiskas šo metožu piemērošanas, vienlaikus tās identificējot kā piemērotas citu pētījumu veikšanai atbilstoši to specifikai.

Kvantitatīvās kontentanalīzes rezultāti liecina, ka visaptverošam biometāna attīstības pētījumam būtiska nozīme ir datu bankas izstrādei, infrastruktūras kartēšanai, sistēmdinamikas modelēšanai, *LCA* un *MCDA*. Datu bankas un infrastruktūras kartēšana ļauj identificēt ražošanas tendences, novērtēt reģionālās jaudas, precīzāk plānot infrastruktūras attīstību un modelēt piegādes drošību. Sistēmdinamikas modelēšana ļauj analizēt biometāna ražošanas apjomus, infrastruktūras attīstību, politikas ietekmi, tirgus pieprasījumu un investīciju plūsmas, kā arī pārbaudīt dažādus attīstības scenārijus. *LCA* nodrošina visaptverošu biometāna ražošanas ietekmes uz vidi novērtējumu visā dzīves ciklā, savukārt *MCDA* ļauj vienlaikus vērtēt vides, ekonomiskos un tehniskos aspektus, atbalstot lēmumu pieņemšanu nenoteiktības apstākļos. Tika identificēti 12 ieguvumi, izmantojot datu banku un kartēšanu kā integrētas analīzes metodi, *MCDA* un/vai *LCA* var nodrošināt vismaz sešas priekšrocības dažādu scenāriju un sistēmu plānošanai, piemēram, ļauj novērtēt tehnoloģiskās un investīciju alternatīvas un atbalsta lēmumu pieņemšanu.

Rezultāti liecina, ka integrēta pētniecības pieeja var nodrošināt stabilu pamatu biometāna ražošanas palielināšanai vietējā, valsts un reģionālā mērogā, vienlaikus izstrādāto pieeju piemērojot arī citu enerģijas nesēju novērtēšanai.

3.2. Bibliometriskās analīzes rezultāti

Bibliometriskās analīzes rezultāti izteikti atšķirās atkarībā no publikāciju apkopošanā izmantoto atslēgvārdu kopām, neraugoties uz to, ka galvenokārt katrā no pieciem publikāciju meklējumiem tika izmantots kopīgs atslēgvārds – biometāns. *VOSviewer* bibliometriskās tīkla analīzes kartes atspoguļoja atslēgvārdu līdzās parādīšanos (*co-occurrence*).

Ar bibliometriskās analīzes palīdzību tika analizēti pieci galvenie attīstības pētniecības virzieni: biometāna ievadīšana gāzes sistēmā; biometāna ievades punkti; biometāna izmantošana transportā; biometāna tirdzniecība; skābekļa radītie riski gāzes infrastruktūrai.

Pirmā bibliometriskā analīze fokusējās uz biometāna ievadīšanu sistēmā, izmantojot gāzes cauruļvada pieslēgumu (biometāns + tīkls + infrastruktūra). Iegūtā karte veidoja vairākus tematiski nošķiramus klasterus – tehnoloģijas (metāns, dabasgāze, cauruļvadi), vides ietekmes (emisijas, CO₂, GHG), enerģijas pāreja (atjaunīgā enerģija, dekarbonizācija, ūdeņradis) un biogāzes ražošana / anaerobās fermentācijas procesi. Tas apstiprina pieņēmumu, ka biometāna integrēšana gāzes infrastruktūrā nav analizējama izolēti.

Otrā bibliometriskā analīze tika veidota ar nolūku izprast publikāciju izvirci jautājumos par biometānu, kas tiek ievadīts sistēmā biometāna ievades punktos. Tādi atslēgvārdi kā cauruļvadi, gāzes, saspīestā dabasgāzes ir izvietoti kartes malās ar mazāku savstarpējo sasaisti. Tas parāda, ka infrastruktūra ir pieminēta, bet netiek analizēta detalizēti, un publikāciju fokuss vairāk vērsts uz:

- biogāzes un biometāna ražošanas procesiem;
- siltumnīcefekta gāzu emisiju efektu;
- optimizāciju un enerģētikas sistēmas modelēšanu.

Tādējādi bibliometriskās analīzes otrais meklējums norāda, ka biometānu ievades punktu izbūve un to tehniski ekonomiskais pamatojums zinātniskajā literatūrā joprojām ir nepietiekami pētīti aspekti.

Trešās bibliometriskās analīzes fokuss bija biometāna izmantošana transportā, atklājot skaidri definētu un fokusētu publikāciju loku, kas pievēršas biometāna nozīmei transporta dekarbonizācijā. Atšķirībā no iepriekšējām divām kartēm šeit dominē divi izteikti klasteri – emisiju/vides klasteris un dabasgāzes/transporta tehnoloģiju klasteris. No rezultātiem secināms, ka transporta kontekstā biometāns tiek skatīts galvenokārt kā degviela, nevis kā biometāna integrācijas sistēmā problēmas risinājums.

Ceturtais bibliometriskās analīzes ietvaros tika vērtētas zinātniskās izpētes tendences attiecībā uz biometāna tirdzniecību un ar to saistīto blakusproduktu tirgus izveidi. Iegūtā karte bija būtiski blīvāka un daudzdimensionālāka, iezīmējot piecus lielus klasterus – ar blakusproduktiem, atkritumiem; tirgu un ekonomiku; dzīves cikla analīzi un ietekmi uz vidi; aprites ekonomiku; investīciju un izmaksu efektivitātes klasteris. Līdz ar to ceturtais bibliometriskā analīze parāda, ka biometāna tirdzniecības jautājumi ir visplašākais un visstarpdisciplinārākais, salīdzinot ar iepriekšējām kartēm

Piektā bibliometriskā analīze pievērsās zinātniskajā literatūrā konstatētajiem izaicinājumiem un riskiem dabasgāzes infrastruktūrai kontekstā ar pārlietu lielo skābekļa saturu biometānā. Skābekļa problēma zinātniskajā literatūrā lielākoties tiek raksturota atkritumu un notekūdeņu apsaimniekošanas kontekstā, un rezultāti liecināja, ka zinātniskajā literatūrā biežāk pētīts paaugstināts skābekļa saturs aerobās fermentācijas sistēmās.

Rezultāti parādīja, ka biometāna integrācija gāzes infrastruktūrā literatūrā tiek analizēta starpdisciplināri, vienlaikus aptverot tehnoloģiskos, ekonomiskos un vides aspektus. Būtiska uzmanība tiek pievērsta emisiju samazināšanai, ekonomiskajai lietderībai un enerģētikas sistēmu dekarbonizācijai. Vienlaikus secināts, ka biometāna infrastruktūras attīstība, biometāna ievades punktu izbūve un to tehniski ekonomiskais pamatojums zinātniskajā literatūrā ir salīdzinoši maz pētīti. Transporta sektorā biometāns galvenokārt tiek analizēts kā emisiju samazināšanas instruments, izmantojot esošo dabasgāzes infrastruktūru, savukārt biometāna tirgus attīstība tiek skatīta aprites ekonomikas, klimata politikas un dabasgāzes tirgus transformācijas kontekstā. Skābekļa satura pētījumi galvenokārt fokusējas uz ražošanas procesiem, bet infrastruktūras ietekme tiek analizēta ierobežoti.

3.3. Izpētošā gadījumu analīze

Izpētošās analīzes ietvaros tika pētīta citu valstu pieredze biogāzes un biometāna izmantošanai kā daļai no ilgtspējīgas energosistēmas, kur viens no lietojumiem ir tā izmantošana centralizētajās situācijās sistēmās. Piektās paaudzes centralizētās

siltumapgādes un aukstumapgādes (*5GDHC*) tīkli vēl ir agrīnā izstrādes stadijā, taču vairākas šādas sistēmas jau darbojas Eiropā, daudzas no tām sākotnēji bija izmēģinājuma projekti. Šīs sistēmas ievērojami atšķiras no tradicionālajām *DHC* tehnoloģijām. Piemēram, piegādā ūdeni decentralizētām ūdens siltumsūkņu stacijām temperatūrā no 0 °C līdz 30 °C, piedāvājot vairākas priekšrocības, salīdzinot ar parastajām centralizētās siltumapgādes sistēmām. *5GDHC* priekšrocības ietver augstāku avota temperatūru apkures režīmā un zemāku avota temperatūru dzesēšanas režīmā, salīdzinot ar apkārtējo gaisu, kas nodrošina augstāku sezonālo sistēmas veiktspēju. Vēl viena *5GDHC* sistēmu priekšrocība ir tā, ka centralizētie risinājumi var iekļaut sezonālo siltuma uzkrāšanu pilsētvidē, kur atsevišķu zemes siltumsūkņa uzstādīšana var būt ierobežota. Turklāt ēku slodžu daudzveidība un vienlaicīgums palielina iespēju atgūt lieko siltumu no dzesēšanas procesiem izmantošanai apkurē. Veiktā izpētošā gadījumu analīze apstiprināja, ka biogāzes pārveidošana par biometānu ļauj to izmantot ievadei gāzes sistēmā un transportēšanai, vienlaikus būtiski samazinot siltumnīcefekta gāzu emisijas. Dzīves cikla analīzes liecina, ka fosilās gāzes aizstāšana ar biogāzi koģenerācijas sistēmās var samazināt emisijas par 70–90 %, savukārt galveno emisiju samazinājuma ieguvumu rada metāna emisiju novēršana un fosilā kurināmā aizstāšana. Centralizētās energotīklu sistēmas un *5GDHC* piedāvā plašas iespējas atjaunīgo energoresursu integrācijai, siltuma uzkrāšanai un emisiju samazināšanai, tomēr to attīstību ierobežo augstas investīciju izmaksas, tehniskā sarežģītība un pieredzes trūkums. *Meppel* gadījuma analīze parādīja, ka visilgtspējīgākais risinājums ir biogāzes koģenerācijas sistēma ar dabasgāzes rezerves katliem, kas nodrošina vairāk nekā 80 % mazākas CO₂ emisijas nekā tradicionālās apkures sistēmas.

Somijas *Backbone* modelēšanas rezultāti apstiprināja, ka biomasas, biogāzes, siltumsūkņu un enerģijas uzkrāšanas tehnoloģiju integrācija ļauj būtiski samazināt emisijas, vienlaikus saglabājot energosistēmas drošību un elastību. Rezultāti kopumā apliecina, ka vietējo atjaunīgo energoresursu integrācija energosistēmā nodrošina būtiskus ilgtspējas ieguvumus un veicina enerģētikas sektora dekarbonizāciju. Strukturētais salīdzinājums ļauj gūt plašāku perspektīvu no pilsētas līmeņa mikrosistēmām (*Meppel*) līdz nacionālo un reģionālo sistēmu modelēšanai (*Backbone*).

3.4. Daudzkritēriju lēmumu analīzes rezultāti, izmantojot TOPSIS

TOPSIS metode tika izmantota, lai novērtētu: 1) optimālāko gāzveida enerģijas nesēju, salīdzinot dabasgāzi, biometānu un ūdeņradi; 2) optimālāko biometāna integrācijas veidu tirgū (tiešo pieslēgumu, BIP un ārpussistēmas biometāna transportu); 3) efektīvākās biometāna izmantošanas alternatīvas.

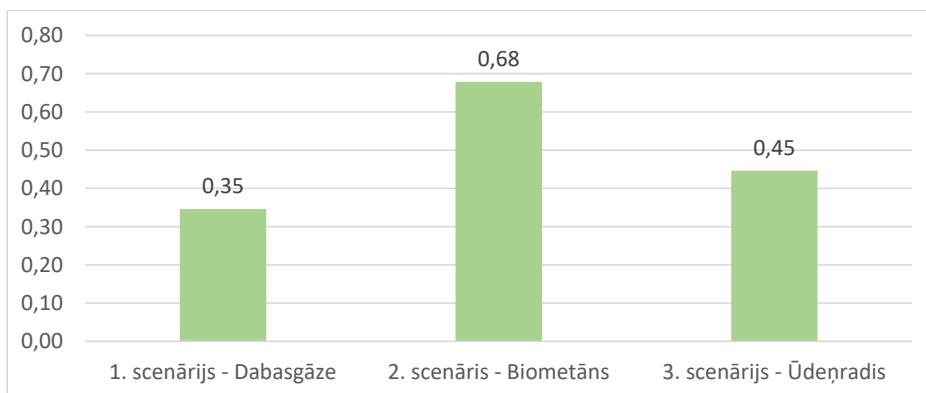
1. TOPSIS modelis – optimāla gāzveida enerģijas avota izvēle

Biometāna attīstības kontekstā tas ļauj ieinteresētajām personām identificēt risinājumus, kas ir pamatoti no vides un socioekonomiskā aspekta, tādējādi padarot *MCDA* par būtisku instrumentu ilgtspējīgu inovāciju un investīciju stratēģiju virzīšanai. Tāpēc salīdzināšanai tika izmantota *TOPSIS* metode, lai novērtētu biometānu kā vienu no gāzveida enerģijas avotiem, salīdzinot ar dabasgāzi un ūdeņradi (3.5. tab.).

Normalizēta lēmumu matrica gāzveida kurināmo novērtējumam

	1. scenārijs. Dabasgāze	2. scenārijs. Biometāns	3. scenārijs. Ūdeņradis	Kritēriju svāri
SEG emisiju samazinājums (t CO ₂ eq ietaupījums (nerādītas) gadā)	0,258	0,701	0,664	0,0833
Gaisa piesārņotāju samazinājums (piemēram, NO _x , SO _x , cietās daļiņas), % samazinājums	0,324	0,648	0,689	0,0833
Ietekme uz atkritumu pārvaldību, t atkritumu/gadā	0,095	0,953	0,286	0,0833
Peļņas potenciāls (tirgus, subsīdijas, oglekļa kredītu vērtība), EUR/MWh	0,543	0,699	0,466	0,0833
Tehnoloģiskais briedums, <i>technological rediness level</i> 1–10	0,703	0,597	0,387	0,0833
Izejvielu elastība (pārstrādājamās/izmantojamās biomasas klāsts), izejvielu veidu skaits (gab.)	0,103	0,879	0,465	0,0833
Saderība ar sistēmu/infrastruktūru (cik vienkārši integrējama gāze esošajā infrastruktūrā vai izmantojama transporta sektorā), <i>technical rediness level</i> 1–10	0,717	0,574	0,395	0,0833
Darbavietu radīšanas potenciāls (radīto darbavietu skaits uz investīciju vienību)	0,394	0,630	0,669	0,0833
Politikas un regulējuma salāgošana (atbilstība atjaunīgo energoresursu mērķiem, subsīdijām, noteiktajiem mērķiem), vērtējums 1–10	0,393	0,628	0,589	0,0833
Ieguldījums aprites ekonomikā (barības vielu pārstrāde, digestāta valorizācija), vērtējums 1–10	0,089	0,798	0,532	0,0833
Tehnoloģiskie riski (ekspluatācijas problēmu varbūtība vai nepietiekama snieguma risks), neveiksmes varbūtība %	0,352	0,956	0,755	0,0833
Tirgus riski (cenu jutīgums, politikas mainība), vērtējums 1–10	0,600	0,388	0,600	0,0833

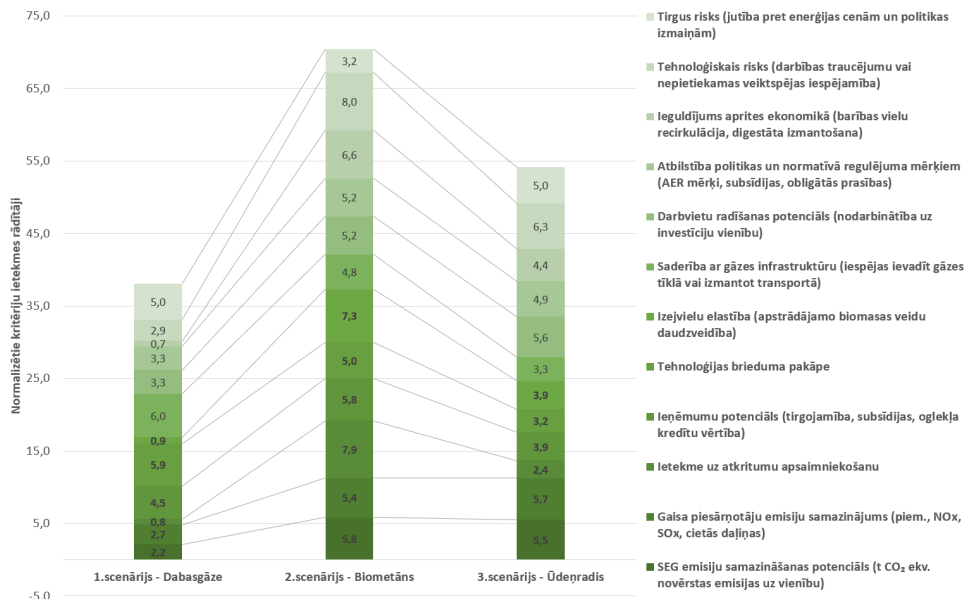
Salīdzinot scenārijus, visiem kritērijiem tika izmantots vienāds kritēriju svērums, lai nodrošinātu līdzvērtīgu novērtējumu un objektīvu salīdzinājumu. Tas nodrošina sabalansētu pieeju salīdzinājumam. Izaicinājums, izmantojot daudzkritēriju analīzi, ir tajā, ka samazinās katra kritērija ietekme, jo to svars šajā gadījumā salīdzinoši ir niecīgs, arī veicot testu un mainot kritēriju svarus noteiktās metodikas ietvaros, kur kritēriju svaru summai ir jāveido 1 jeb 100 %. Rezultāti tik un tā sanāk ļoti līdzīgi, un tik maziem svāriem uz lielu kritēriju kopumu nav nozīmīgas ietekmes. Pamatojoties uz ekspertu novērtējumu, tika iegūti šādi scenāriju novērtējumi par gāzveida kurināmo novērtējumu (3.1. att.).



3.1. att. Biometāna scenāriju klasifikācija, pamatojoties uz 12 dažādiem kritērijiem.

Saskaņā ar iepriekš minētajiem kritērijiem salīdzinājums liecina, ka visvairāk līdzsvarota gāzveida enerģijas nesēja forma no dažādu aspektu apsvērumiem un novērtējuma ir biometāns (rezultāts 0,68), otrajā vietā ir ūdeņradis (rezultāts 0,45), savukārt trešajā vietā ir fosilā dabāsgāze (rezultāts 0,35).

Turklāt, lai redzētu katra kritērija ietekmi, normalizētie kritēriju ietekmes rezultāti ir aprēķināti un apkopoti 3.10. attēlā.

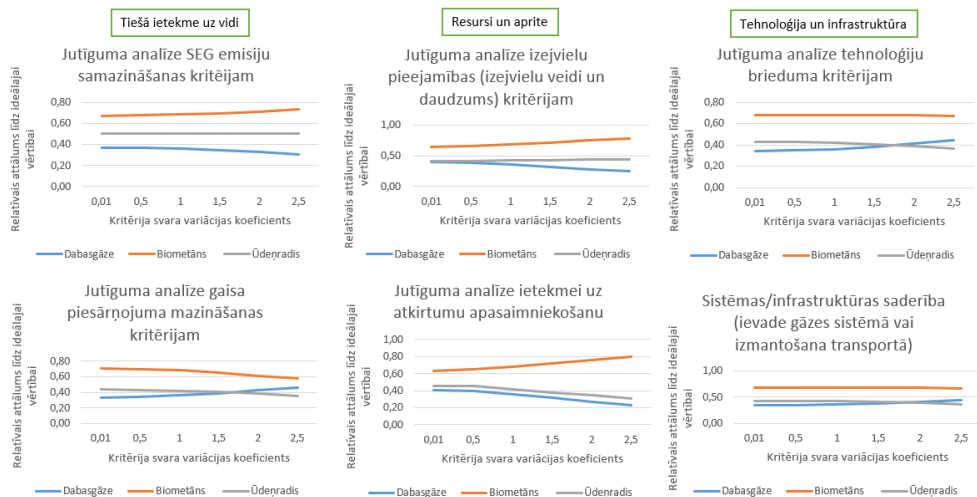


3.2. att. Normalizēto rādītāju kritēriju līmeņu salīdzinājums.

3.2. attēla rezultāti liecina, ka biometāns (2. scenārijs) uzrāda visaugstāko kumulatīvo punktu skaitu visos 12 kritērijos, kas liecina, ka tas ir vislabvēlīgākais risinājums daudzkritēriju novērtējumā. Otrā vietā ierindojas ūdeņradis (3. scenārijs), savukārt visvājākie kopējie rādītāji ir dabasgāzei (1. scenārijs), kuras kumulatīvais punktu skaits ir ievērojami zemāks gandrīz visos rādītājos. Tajā pašā laikā dabasgāze uzrāda relatīvu stiprumu politikas un regulējuma saskaņotībā (6,0) un tehnoloģijas attīstības pakāpē (5,9), bet ir vāja ieņēmumu potenciālā (0,7) un darbavietu radīšanas potenciālā (0,9). Biometāns uzrāda stabili augstus rezultātus atkritumu apsaimniekošanas ietekmē (8,0), izejvielu elastīgumā (7,9) un politikas un regulējuma saskaņotībā (7,3), kas liecina par plašu ilgtspējas priekšrocību. Ūdeņradis uzrāda labus rezultātus politikas un regulējuma saskaņotības (5,6) un siltumnīcefekta gāzu emisiju samazināšanas potenciāla (5,7) jomā, bet atpaliek tehnoloģiju riska (2,4) un darba vietu radīšanas potenciāla (3,2–3,9) jomā.

Papildus tika veikta jutīguma analīze (angļu val. – *sensitivity analysis*), un tā tiek veikta, lai izpētītu kritēriju svaru ietekmi uz alternatīvām. Lai novērtētu daudzkritēriju lēmumu analīzes rezultātu noturību, tika veikta jutīguma analīze, izmantojot *TOPSIS* metodi. Jutīguma analīze ļauj pārbaudīt, kā atsevišķu kritēriju svaru izmaiņas ietekmē analizēto alternatīvu relatīvo rangu.

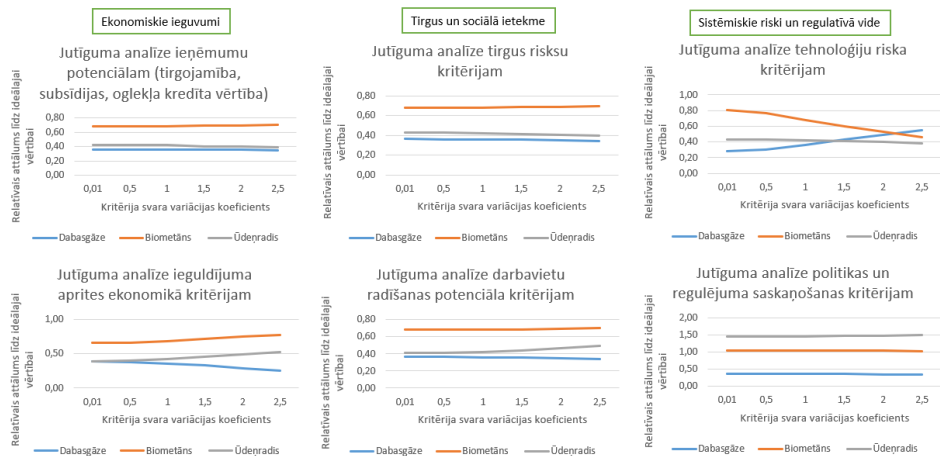
Jutīguma analīzes rezultāti ir strukturēti divās galvenajās grupās, apvienojot savstarpēji saistītus kritērijus loģiskam pārskatam. Pirmajā grupā (3.3. att.) analizēts rezultātu jutīgums vides un tehniskajiem kritērijiem, kas raksturo fizisko infrastruktūru, sistēmu un tās ietekmi uz vidi.



3.3. att. Jūtīguma analīze vides un tehniskajiem kritērijiem.

Jūtīguma analīze vides un tehnisko kritēriju grupā ir ar salīdzinoši augstu rezultātu stabilitāti. Vides un tehnisko kritēriju grupā biometāna scenārijs saglabā augstāko novērtējumu visā kritēriju svaru variācijas diapazonā, īpaši SEG emisiju samazināšanas, gaisa kvalitātes un aprītes ekonomikas kritērijos.

Otrajā grupā (3.4. att.) analizēts rezultātu jutīgums ekonomiskajiem, tirgus un regulatīvajiem aspektiem, kas kopumā nosaka risinājumu efektīvu izmantošanu.



3.4. att. Jūtīguma analīze ekonomiskajiem, tirgus un politikas kritērijiem.

Ekonomisko, tirgus un regulējuma kritēriju grupas kritēriji galvenokārt ir stabili, piemēram, ieņēmumu potenciāla, tirgus risku, darba vietu radīšanas un politikas saskaņošanas kritēriju jutīguma analīze apliecina, ka kritērijs nav rangu ietekmējošs. Biometāna scenārijs

saglabā dominējošu pozīciju ieņēmumu potenciāla un aprites ekonomikas kritērijos. Vislielākā jutība novērota tehnoloģisko risku kritērijā, kas atsevišķos gadījumos var ietekmēt alternatīvu savstarpējo novērtējumu. Kopumā rezultāti apliecina biometāna scenārija noturību dažādu kritēriju prioritāšu apstākļos.

2. TOPSIS modelis – kā nodrošināt optimālu biometāna integrāciju tirgū

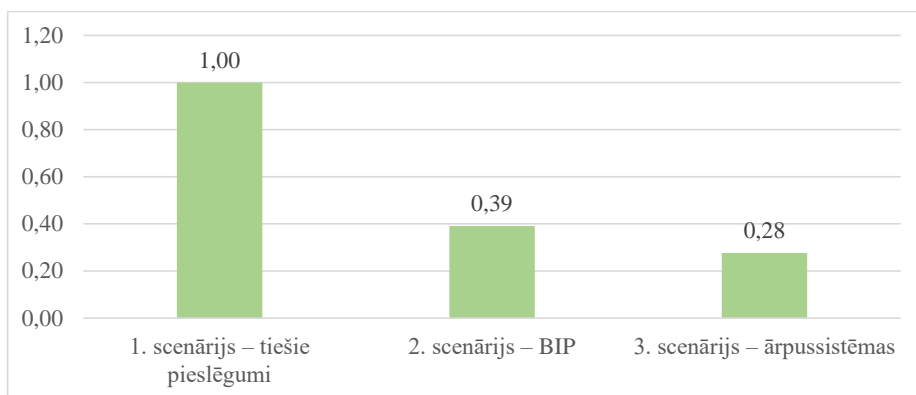
Sekojoši apkopota integrācijas scenāriju – tiešais pieslēgums, BIP, ārpus sistēmas novērtējums un novērtētie vides, ekonomiskie, tehniskie kritēriji.

3.2. tabula

Normalizēta lēmumu matrica vides kritēriju scenārijam

	1. scenārijs	2. scenārijs	3. scenārijs	Kritēriju sviri
CO ₂ emisijas, t	0,318	0,578	0,751	0,2
CO ₂ ekv./gadā				
Piegādes ķēdes ilgtspēja	0,664	0,576	0,476	0,2
Vides riski, riska indekss	0,452	0,579	0,678	0,2
Gaisa kvalitātes ieguvumi, kg NO _x , SO _x , PM samazinājums gadā	0,694	0,532	0,486	0,2
Resursu efektivitāte, %	0,684	0,527	0,505	0,2

Salīdzinot scenārijus, visiem vides, kā arī secīgi ekonomiskajiem un tehniskajiem kritērijiem tika izmantots vienāds kritēriju svērums, lai nodrošinātu vienādu novērtējumu un iespējamu objektīvu salīdzinājumu, un rezultāti atspoguļoti 3.5. attēlā.



3.5. att. Biometāna scenāriju klasifikācija, pamatojoties uz vides kritērijiem.

Vides novērtējuma rezultāti skaidri parāda, ka no vides viedokļa vislabākais pieslēguma veids biometāna stacijām ir tiešais savienojums.

Tiešajam savienojumam seko biometāna ievades punktu izmantošana ar rezultātu 0,39, un ārpus sistēmas biometāna izmantošana ar rezultātu 0,28 nedaudz atpaliek. Abas šīs alternatīvas

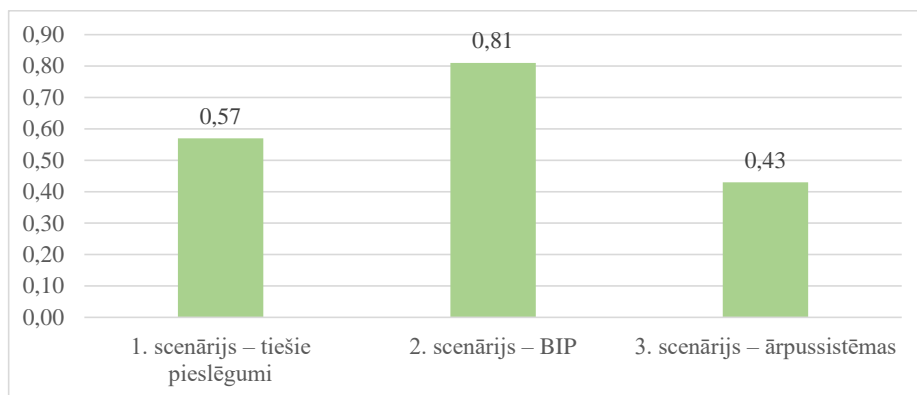
ievērojami atpaliek no ideālā rezultāta, attiecīgi no vides viedokļa, transportēšanas un noplūdes risku dēļ, veicot regulārus savienojumus ar sistēmu vai galalietotāju, biometāna stacijas tiešā pieslēguma izveidei pie gāzes sistēmas ir vismazākā negatīvā ietekme uz vidi.

3.7. tabulā sniegts normalizētās lēmumu matricas ekonomiskais novērtējums visiem trim scenārijiem, izmantojot ekspertu noteiktos rezultātus.

3.3. tabula

Normalizēta lēmumu matrica ekonomisko kritēriju scenārijam				
	1. scenārijs	2. scenārijs	3. scenārijs	Kritēriju sviri
Ietekme uz darbaspēku, darbvietas uz 1 milj. EUR investīciju	0,496	0,608	0,620	0,2
Izlidzinātas enerģijas izmaksas, EUR/MWh	0,546	0,559	0,624	0,2
Pozitīva ietekme uz gāzes tirgus elastību, gāzes pieejamību	0,631	0,599	0,492	0,2
Ekonomisko aspektu ietekme uz gāzes lietotājiem, EUR/MWh	0,553	0,567	0,611	0,2
Scenārija īstenošanas ekonomiskie riski	0,590	0,577	0,565	0,2

Tika novērtēti trīs biometāna integrācijas scenāriju ekonomiskie rādītāji (3.6. att.), lai pēc iespējas labāk apstrādātu ekspertu novērtējumus pēc pieciem galvenajiem ekonomiskajiem kritērijiem.



3.6. att. Biometāna scenāriju klasifikācija, pamatojoties uz ekonomiskiem kritērijiem.

Šie rezultāti liecina, ka 2. scenārijs, kas paredz biometāna ievades punkta izveidi, parāda vislabvēlīgāko ekonomisko profilu starp alternatīvām. Ar C_i vērtību 0,81 šis scenārijs tuvojās ideālam risinājumam, kas liecina par labāku līdzsvaru visos ekonomiskajos rādītājos, jo īpaši tirgus elastības un rentabilitātes ziņā.

1. scenārijs, kas piedāvā tiešus tīkla savienojumus, sasniedza mērenu veiktspējas rādītāju ($C_i = 0,57$). Tas atspoguļo līdzsvarotu, bet mazāk optimālu apmaiņu starp darbaspēka pabalstiem un ekonomiskajiem riskiem.

Savukārt 3. scenārijs, kas balstīts ārpus tīkla esošajos risinājumos, deva viszemāko ekonomisko piemēroftību ($C_i = 0,43$). Rezultāti liecina, ka, lai gan šādas sistēmas var piedāvāt zināmas vietējās priekšrocības, tās ir salīdzinoši mazāk labvēlīgas, ja ņem vērā plašākas ekonomiskās dimensijas, tostarp sistēmas mēroga izmaksu efektivitāti un tirgus integrāciju.

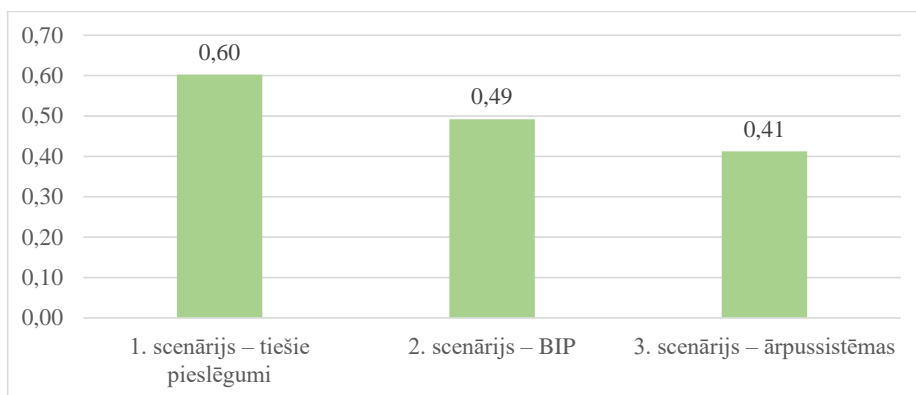
Kopumā *TOPSIS* novērtējumā ir uzsvērtā biometāna infrastruktūras ekonomiskā dzīvotspēja, salīdzinot ar centralizētām vai tiešām alternatīvām, nodrošinot kvantitatīvu pamatu politikas un investīciju lēmumu prioritāšu noteikšanai energosistēmas dekarbonizācijas atbalstam, ja runa ir tikai par ekonomikas prioritātēm.

3.8. tabulā sniegts normalizētās lēmumu matricas tehniskais novērtējums visiem trim scenārijiem, izmantojot ekspertu noteiktos rezultātus.

3.4. tabula

Normalizēta lēmumu matrica tehnisko kritēriju scenārijiem				
	1. scenārijs	2. scenārijs	3. scenārijs	Kritēriju svāri
Īstenošanas sarežģītība	0,629	0,643	0,438	0,2
Tehniskie riski, darbības traucējumu varbūtība, %	0,423	0,634	0,647	0,2
Skābekļa satura ietekme, O_2 koncentrācija gāzē, %	0,553	0,623	0,553	0,2
Autotransporta blīvums, auto/dienā	0,435	0,585	0,684	0,2
Gāzes cauruļvadu izmantošana, % no jaudas	0,728	0,609	0,315	0,2

Tika novērtēta trīs biometāna integrācijas scenāriju tehniskā veiktspēja, lai pēc iespējas labāk apstrādātu ekspertu novērtējumus pēc pieciem galvenajiem tehniskajiem kritērijiem (3.7. att.).



3.7. att. Biometāna scenāriju sakārtošana, pamatojoties uz tehniskiem kritērijiem.

Šie rezultāti liecina, ka 1. scenārijs, kas paredz biometāna ražošanas iekārtu tiešu pieslēgšanu esošajam gāzes tīklam, uzrāda visspēcīgākos un vēlamākos tehniskos rādītājus. Ar C_i vērtību 0,60 šī konfigurācija piedāvā salīdzinoši augstu tehniskās piemērotības līmeni, kas, iespējams, ir saistīts ar tās savietojamību ar pašreizējo infrastruktūru, iedibināto darbības praksi un minimāliem tehnoloģiskiem traucējumiem.

2. scenārijs, kas centralizē gāzes ievadi noteiktā biometāna ievades punktā, sasniedza mērenu tehnisko rezultātu ($C_i = 0,49$). Lai gan šis scenārijs ir tehniski mazāk labvēlīgs nekā tiešie savienojumi, tas joprojām liecina par dzīvotspējīgu īstenošanas potenciālu.

3. scenārijs, kas pārstāv ārpuslīkļa sistēmas, ieguva viszemāko rezultātu tehnisku iemeslu dēļ ($C_i = 0,41$). Tas liecina par ievērojamiem izaicinājumiem tehnoloģiskā brieduma, sistēmas integrācijas un ilgtermiņa mērogojamības ziņā. Lai gan tas ir līdzīgs 2. scenārijam, pastāv lielāki riski un sarežģītība, kas saistīta ar to, ka savienojuma ievadīšana no *bioCNG* kravas automašīnas netiek veikta standartizētā, augsti drošā valsts gāzes infrastruktūrā, bet gan galalietotājiem, kas var atšķirties no tehniskā pieslēguma, spiediena, plūsmas utt. Lai gan šādas sistēmas var būt izdevīgas attālos vai izolētos apgabalos, to plašāka tehniskā ieviešana pašreizējā gāzes infrastruktūras sistēmā šķiet mazāk iespējama.

Kopumā *TOPSIS* tehnisko kritēriju novērtējums identificē tiešos pieslēgumus sistēmai (1. scenārijs) kā tehniski visspēcīgāko variantu.

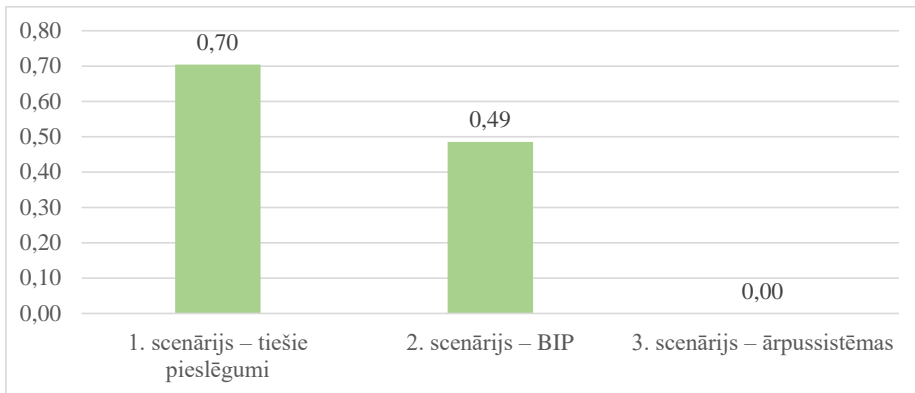
Lai padziļināti izvērtētu un salīdzinātu iegūtos rezultātus, pētījuma autore veica jaunu matricas novērtēšanas analīzi ar *TOPSIS*, integrējot un apkopojot iepriekš iegūtos rezultātus. Integrētajā matricā, apvienojot vides, ekonomisko un tehnisko kritēriju analīzes rezultātus, tie atkal tika novērtēti katrā no posmiem, iegūstot 3.9. tabulā redzamo normalizētu lēmumu matricu.

3.5. tabula

Normalizēta lēmumu matrica integrētai kritēriju analīzei

	1. scenārijs	2. scenārijs	3. scenārijs	Kritēriju svāri
Vides kritēriju matrica	0,902	0,353	0,249	0,333
Ekonomisko kritēriju matrica	0,531	0,749	0,395	0,333
Tehnisko kritēriju matrica	0,553	0,743	0,378	0,333

Tika novērtēti un salīdzināti trīs biometāna integrācijas scenāriju kopumā labākie rezultāti, izmantojot vides, tehnisko un ekonomisko kritēriju novērtējuma rezultātus.



3.8. att. Biometāna scenāriju klasifikācija, pamatojoties uz integrēto kritēriju matricu.

Analīze liecina, ka 1. scenārijs, kas paredz biometāna ražotāju tiešu integrāciju esošajā dabasgāzes sistēmā, ir vislīdzsvarotākais un labvēlīgākais risinājums visās izvērtētajās dimensijās. Relatīvais tuvuma rādītājs 0,70 liecina par spēcīgu sinerģiju starp vides ieguvumiem (piemēram, samazinātas emisijas), ekonomisko efektivitāti (piemēram, mērenas izmaksas un pārvaldāmi riski) un tehnisko savietojamību (piemēram, infrastruktūras gatavību un mērogojamību).

2. scenārijs, kas paredz biometāna ievades punktu, sasniedza vidēju integrēto rādītāju 0,49, atspoguļojot dažus kompromisus starp ekonomiskajām stiprajām pusēm un tehniskajiem ierobežojumiem. Lai gan šī konfigurācija piedāvā zināmu darbības efektivitāti, tās zemākā vides un tehniskā saskaņošana samazina tās vispārējo pievilcību, bet tā ir ļoti vēlama iespēja, ja ekonomiskā perspektīva ir vissvarīgākā.

Turpretī 3. scenārijs, kas attēlo ārpussistēmas risinājumus, ieguva 0,00, norādot pilnīgu attālināšanos no ideālā risinājuma, ja visas dimensijas tiek ņemtas vērā kopā. 3. scenārija rezultāts ir 0,00, jo tas atrodas tieši negatīvajā ideālajā punktā, sliktākajos rādītājos visos kritērijos.

Juīguma analīze apliecināja, ka vides kritēriju grupā tiešā pieslēguma scenārijs saglabā augstāko novērtējumu visā kritēriju svaru diapazonā, BIP scenārijā novērojamas nelielas svārstības, pieaugot atsevišķu vides kritēriju nozīmīgumam. Ārpussistēmas risinājums saglabā stabilu novērtējumu un vides kritēriju svaru izmaiņas to būtiski neietekmē.

Ekonomisko kritēriju grupā visstabilākais risinājums ir BIP, kura novērtējums saglabājas augsts neatkarīgi no kritēriju svaru izmaiņām. Tiešā pieslēguma scenārija novērtējums uzlabojas, pieaugot pozitīvās ietekmes uz gāzes tirgu, izlīdzināto enerģijas izmaksu un ietekmes uz gāzes lietotājiem kritēriju svaram, bet samazinās, pieaugot darbaspēka ietekmes kritērija nozīmīgumam. Ārpussistēmas risinājums uzrāda pretēju tendenci, kļūstot konkurētspējīgāks tad, ja ir augstāks darbaspēka ietekmes kritērija svars.

Tehnisko un infrastruktūras kritēriju grupā BIP saglabā salīdzinoši augstu stabilitāti. Tiešā pieslēguma novērtējums uzlabojas, pieaugot tehnisko risku un infrastruktūras izmantošanas kritēriju nozīmīgumam, ārpussistēmas risinājums uzrāda labākus rezultātus tad, ja ir augstāks autotransporta intensitātes un ieviešanas sarežģītības kritēriju svars. Skābekļa saturs ietekmes kritērijs demonstrē zemu jutību un būtiski neietekmē alternatīvu savstarpējo novērtējumu.

Integrētā novērtējuma jutīguma analīze parādīja pretēju tendenci starp tiešo pieslēgumu un BIP, savukārt ārpussistēmas risinājums visos gadījumos saglabāja zemāko novērtējumu. Palielinoties vides kritēriju nozīmīgumam, pieauga tiešā pieslēguma piemērotība, savukārt ekonomisko un tehnisko kritēriju prioritātes gadījumā uzlabojās BIP novērtējums.

Secināms, ka optimālā risinājuma izvēle ir atkarīga no izvirzītajām prioritātēm – vides aspektu gadījumā priekšroka dodama tiešajam pieslēgumam, savukārt ekonomisko un tehnisko aspektu gadījumā pamatotāka var būt biometāna ievades punkta izmantošana. Vienlaikus meklējot sabalansētāko risinājumu, par tādu ir uzskatāms tiešais pieslēgums.

3. TOPSIS modelis – kādas ir efektīvas biometāna izmantošanas alternatīvas

Novērtētie biometāna izmantošanas veidi (3.4. tab.) ietvēra šādus komponentus.

- Uzglabāšana/ievadīšana gāzes sistēmā – ietver visu veidu biometāna ievadīšanu dabasgāzes sistēmā, ieskaitot piegādi pazemes gāzes krātuvēm (pieņemot, ka gāze atbilst atbilstošām gāzes kvalitātes prasībām), piegādi galalietotājiem pa cauruļvadiem vai eksportu uz citiem tirgiem.
- Siltumenerģijas ražošana – biometāna tieša izmantošana siltuma ražošanai, piemēram, centralizētajā siltumapgādē vai rūpnieciskajos apkures katlos, kas nozīmē tā pārvēršanu citā energonesējā.
- Elektroenerģijas ražošana – biometāna sadedzināšana uz vietas elektroenerģijas ražošanai, bieži izmantojot koģenerācijas stacijas vai gāzes dzinējus, kas arī ir enerģijas pārveidošanas nozare.
- Rūpnieciskā ražošana – biometāns kā izejviela vai procesa kurināmais liela mēroga rūpniecības objekts, tostarp ķīmijas, mēslojuma vai cementa rūpniecībā.
- Proteīna ražošana – inovatīvs biotehnoloģisks lietojums, kur biometāns kalpo kā substrāts vienšūnu proteīns vai citu augstvērtīgu bioproduktu ražošanai.

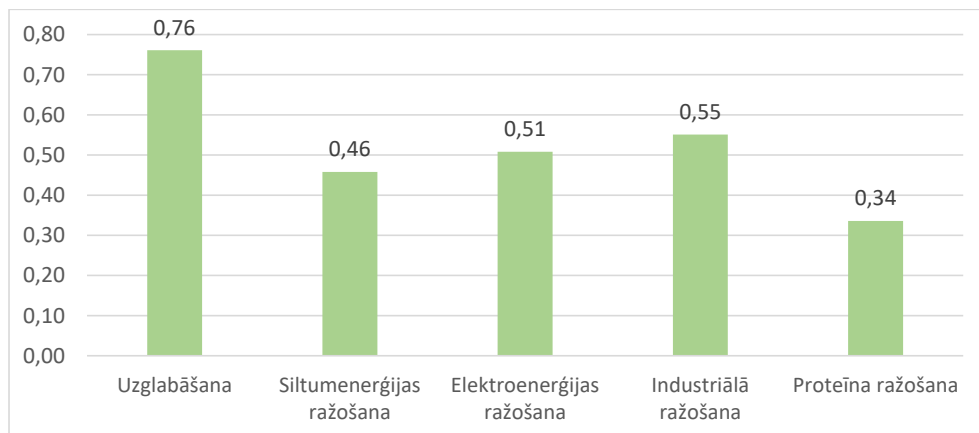
3.6. tabula

Normalizēta datu matrica daudzkritēriju analīzei

Kritēriji	Uzglabāšana	Siltumenerģijas ražošana	Elektroenerģijas ražošana	Rūpnieciskā ražošana	Proteīna ražošana
Tehnoloģiskie	0,466	0,487	0,436	0,508	0,313
Ekonomiskie	0,382	0,504	0,493	0,499	0,327
Klimata	0,624	0,306	0,368	0,381	0,487
Vides	0,515	0,411	0,463	0,428	0,411
Socioekonomiskie	0,484	0,452	0,484	0,479	0,314

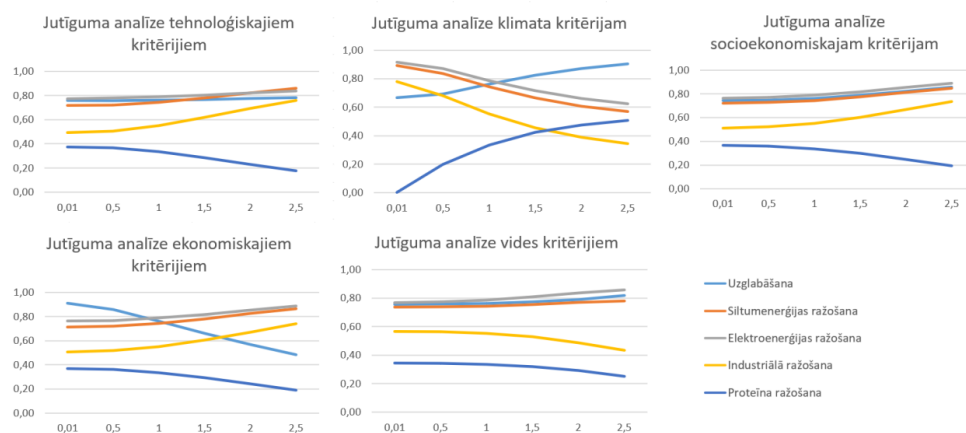
Normalizētā matrica, kas redzama 3.4. tabulā, atspoguļo apkopotos ekspertu novērtējumus, kur augstākas vērtības liecina par labvēlīgākiem rezultātiem attiecībā uz katru kritēriju. Visbeidzot tika aprēķināts vidējais normalizētais rezultāts katrai galapatēriņa kategorijai, ļaujot sakārtot alternatīvas atbilstoši to vispārējai piemērotībai biometāna izmantošanai.

MCDA rezultāti (3.9. att.) atklāj, ka uzglabāšana un ievadišana gāzes sistēmā sasniedza visaugstāko kopējo rezultātu, norādot, ka eksperti šo ceļu uztver kā vispraktiskāko un ietekmīgāko veidu, kā izmantot biometānu. Tās spēcīgie rezultāti visos piecos kritērijos atspoguļo šīs iespējas elastību un mērogojamību, kas ļauj biometānu uzglabāt pazemes gāzes iekārtās, transportēt, izmantojot esošo gāzes infrastruktūru, un izplatīt dažādām patērētāju kategorijām, tostarp kā potenciālo eksportu kaimiņu tirgos. Uzglabāšana un transportēšana ir iespējama tikai tādos apstākļos, kur biometāns un tajā esošo komponentu raksturlielumi atbilst stingrām pieļaujamās gāzes kvalitātes prasībām.



3.9. att. Optimālās biometāna izmantošanas metodes – salīdzinošie MCDA rezultāti, kas parāda dažādu biometāna galapatēriņa iespēju relatīvo piemērotību.

Kritēriju ietekmes novērtēšanai TOPSIS analizē rēķinātajiem scenārijiem papildus tika veikta jutīguma analīze (3.10. att).



3.10. att. TOPSIS modeļa jutīguma analīze pēc biometāna lietojuma veidiem.

Alternatīvu novērtējumu kopumā ietekmē kritēriju grupu svāri, tomēr atsevišķos gadījumos tendences ir stabilas, un jutīguma analīze parādīja, ka alternatīvu izvēle lielā mērā ir

atkarīga no vēlamajām prioritātēm, tomēr vairumā gadījumu elektroenerģijas un siltumenerģijas ražošana apvieno augstu relatīvo tuvumu ideālajai vērtībai ar salīdzinoši stabiliu trajektoriju, tādēļ kopumā uzskatāma par viskonkurētspējīgāko alternatīvu. Uzglabāšana kļūst dominējoša galvenokārt klimata kritēriju grupā, industriālā ražošana saglabā viduvēju konkurētspēju, savukārt proteīna ražošana kopumā demonstrē zemāku relatīvo tuvumu ideālajai vērtībai un ir mazāk vēlama alternatīva dažādās kategorijās.

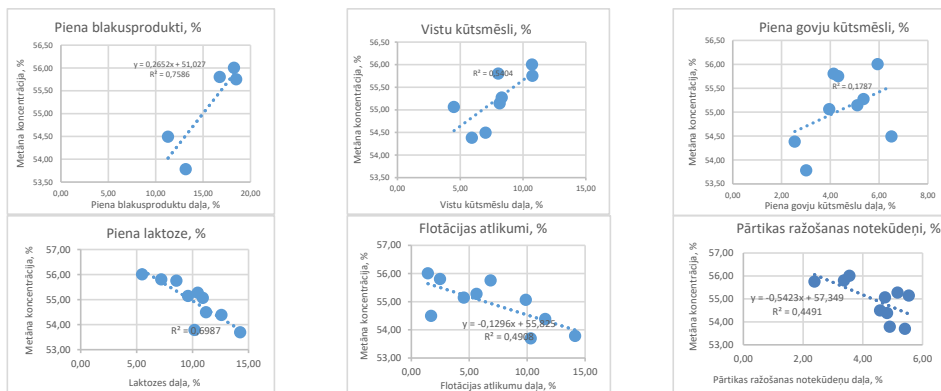
3.5. Regresijas analīzes rezultāti - biometāna ražošanas apjoma (ražīguma) efektivitātes analīze

Pētījuma rezultāti parāda Latvijas biometāna ražotnes gadījuma izpēti, izmantojot tās ikmēneša ievades datus par izejvielām, kas tika izmantotas biometāna ražošanai no 2024. gada septembra līdz 2025. gada jūnijam. Šie rezultāti tika izmantoti, lai analizētu konkrētu izejvielu elementu efektivitāti – ietekmi uz metāna ražīgumu.

Regresijas analīze tika veikta, lai novērtētu saistību starp atsevišķu izejvielu sastāvdaļu īpatsvaru un metāna (CH₄) koncentrāciju saražotajā neapstrādātajā biogāzē. No 18 analizētajiem substrātiem interpretācijai tika saglabāti tikai tie, kuru noteikšanas koeficients (R²) bija lielāks par 0,4, nodrošinot, ka tika ņemtas vērā tikai statistiski nozīmīgas vai vismaz vidēji spēcīgas korelācijas.

Kopumā šim kritērijam atbilda sešas izejvielu sastāvdaļas, kā redzams 3.11. attēlā. Starp tiem piena ražošanas blakusproduktiem, vistas kūtsmēsliem un piena govju kūtsmēsliem bija pozitīva korelācija ar metāna koncentrāciju, kas liecina, ka lielāks šo substrātu īpatsvars palielina izejvielu maisījuma metanogēno potenciālu. Un otrādi, piena laktoze, flotācijas atlikumi un notekūdeņi no pārtikas rūpniecības uzrādīja negatīvu korelāciju, norādot, ka to īpatsvara palielināšanās saistīta ar zemāku CH₄ koncentrāciju. Kopumā dzīvnieku izcelsmes substrātiem bija tendence pozitīvi ietekmēt metāna ražu un kvalitāti, savukārt šķīdriem vai procesa rezultātā iegūtiem atlikumiem bija inhibējoša vai atšķaidoša iedarbība.

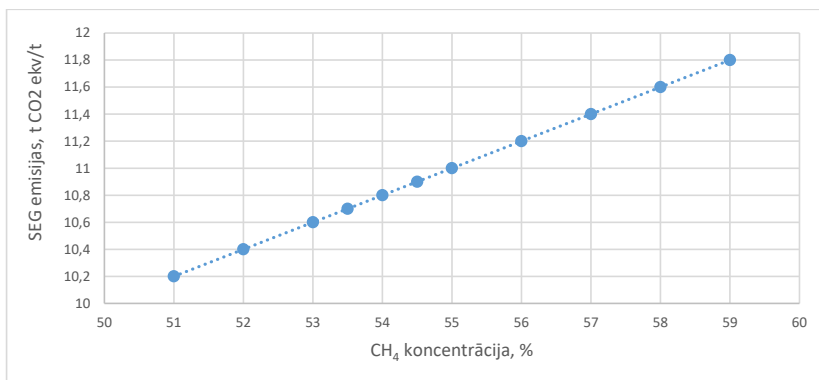
Jāuzsver, ka spēcīgākās prognozējošās attiecības ir tās, kur R² vērtības tuvojas 1, piemēram, piena ražošanas blakusproduktu gadījumā (R² = 0,786), kas visspēcīgāk veicināja metāna koncentrāciju, un piena laktozi (R² = 0,687), kas uzrādīja visizteiktāko negatīvo korelāciju. Turklāt mijiedarbība starp substrātiem var ietekmēt vispārējo gremošanas veiktspēju, jo daži komponenti var uzlabot vai kavēt citu noārdīšanās efektivitāti. Tādēļ šie konstatējumi nav jāinterpretē kā vispārināmi, bet drīzāk kā norāde uz konkrētiem modeļiem, kas novēroti šajā konkrētajā biogāzes ražošanas iekārtā. Tomēr rezultāti atklāj konsekventas tendences, kas var atspoguļot plašākas cēloņsakarības starp substrāta sastāvu un biogāzes kvalitāti.



3.11. att. Metāna koncentrācija biogāzē, pamatojoties uz dažādām izejvielām.

Rezultāti atklāja arī skaidru pozitīvu lineāru korelāciju starp metāna koncentrāciju saražotajā biogāzē un atbilstošajām siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisijām, kas izteiktas kā CO₂ ekvivalenta tonna uz tonnu izejvielu. Kā redzams 3.11. attēlā, augstāka CH₄ koncentrācija konsekventi bija saistīta ar paaugstinātām SEG emisiju vērtībām. Konkrēti, kad metāna koncentrācija palielinājās no 51 % līdz 59 %, aprēķinātās SEG emisijas palielinājās no aptuveni 10,2 t CO₂ eq/t līdz 11,8 t CO₂ eq/t.

Šo tendenci var izskaidrot ar augstāku enerģijas saturu un sadegšanas potenciālu biometānā ar lielāku CH₄ tīrību, kas proporcionāli palielina CO₂ emisijas, normalizējot uz tonnu saražoto enerģiju. Citiem vārdiem sakot, lai gan augstāka metāna koncentrācija liecina par labāku gāzes kvalitāti un siltumspēju, tā rada arī augstāku oglekļa dioksīda ekvivalentu, ja to izsaka kā kopējo enerģijas patēriņu. Ir svarīgi uzsvērt, ka šis oglekļa dioksīda ekvivalenta palielinājums neliecina par lielāku ietekmi uz klimatu uz lietderīgās enerģijas vienību; tas ir emisiju normalizēšanas efekts uz tonnu izejvielu, nevis uz saražotā biometāna MWh.



3.12. att. SEG samazināšanas analīze.

Interpretējot šos rezultātus kopā ar izejvielu sastāva analīzi, var secināt, ka daži substrāti, kas palielina CH₄ koncentrāciju (piemēram, piena ražošanas blakusprodukti un kūtsmēsli), netieši veicina augstākas aprēķinātās SEG emisijas uz tonnu izejvielu. Turpretī izejvielu komponenti, kas samazina metāna koncentrāciju (piemēram, flotācijas atlikumi un notekūdeņi), rada zemākus emisijas faktorus. Tas norāda, ka izejvielu veidu izvēle un īpatsvars ietekmē gan biometāna kvalitāti, gan arī veido izmērāmu ietekmi uz ražošanas procesa kopējo oglekļa pēdu. Tāpēc, lai gan CH₄ koncentrācijas palielināšana uzlabo biogāzes efektivitāti un saražotās enerģijas daudzumu, tā vienlaikus palielina oglekļa intensitāti uz enerģijas vienību, uzsverot nepieciešamību līdzsvaroti optimizēt gāzes kvalitāti ar ekoloģiskajiem siltumnīcefekta gāzu raksturlielumiem.

3.6. Biometāna izmaksu un ieguvumu analīzes rezultāti

Ņemot vērā metodikas daļā raksturotos izmaksu parametru rādītājus un tajos izmantotos datus, tika aprēķinātas kopējās visu trīs scenāriju kapitālizmaksas un ekspluatācijas izmaksas.

3.7. tabula

Visu scenāriju kopējās CAPEX un OPEX izmaksas		
	CAPEX (EUR)	OPEX (EUR/gadā)
1. scenārijs (tiešais pieslēgums)	17 050 000	1 112 275
2. scenārijs (BIP)	6 400 000	808 400
3. scenārijs (ārpussistēmas risinājums)	5 200 000	757 847

Izmaksu un ieguvumu analīze parādīja, ka lielākie kapitālieguldījumi nepieciešami tiešam biometāna ražotnes pieslēgumam dabasgāzes sistēmai (aptuveni 17 milj. EUR), savukārt biometāna ievades punkta risinājumam kapitālieguldījumi ir aptuveni 6,4 milj. EUR, bet ārpussistēmas risinājumam – aptuveni 5,2 milj. EUR. Rezultāti liecina, ka tiešais pieslēgums ir piemērotāks teritorijās ar attīstītu dabasgāzes infrastruktūru, BIP risinājums – reģionos, kur cauruļvadu izbūve nav ekonomiski pamatota, bet ārpussistēmas risinājums vislabāk atbilst specifiskiem tirgus segmentiem, piemēram, transporta nozarei.

Pēc kapitālieguldījumu un ekspluatācijas izmaksu novērtēšanas nākamajā posmā tika analizēta ieņēmumu gūšana un aprēķināti atmaksāšanās periodi, lai turpmāk novērtētu katra scenārija ekonomisko dzīvotspēju.

$$\text{IEŅĒMUMI} = 20\,000 \times 70 = 1\,400\,000 \frac{\text{EUR}}{\text{gadā}} \quad (3.1)$$

Salīdzinot visu trīs scenāriju atmaksāšanās laiku (3.11. tab.), kļūst skaidrs, ka 3. scenārijs ir visrentablākais, jo tam ir visīsākais atmaksāšanās periods.

Scenāriju salīdzinājums				
	CAPEX (EUR)	OPEX (EUR/gadā)	Gūto ieņēmumu prognoze (EUR)	Atmaksāšanās periods (gadi)
1. scenārijs	17 050 000	1 112 275	1 400 000	59,2
2. scenārijs	6 400 000	808 400	1 400 000	10,8
3. scenārijs	5 200 000	757 847	1 400 000	8,1

Lai gan 3. scenārijs (ārpussistēmas piegāde) nodrošina īsāko atmaksāšanās periodu (aptuveni 8,1 gads), otrais scenārijs (biometāna transportēšana uz centralizētu biometāna ievades punktu dabasgāzes sistēmā) var kļūt par ilgtspējīgāku un sistēmisku risinājumu ilgtermiņā, neraugoties uz relatīvi garāku atmaksāšanās laiku (aptuveni 10,8 gadi). Viens no būtiskākajiem iemesliem ir šā modeļa stabilitāte un iespējas palielināt piegādes apjomus, jo piekļuve dabasgāzes sistēmai nodrošina pieeju daudz plašākam patērētāju lokam – mājsaimniecībām, rūpniecības sektoram un centralizētās siltumapgādes sistēmām.

Lai novērtētu dažādu faktoru ietekmi uz biometāna integrācijas ekonomisko dzīvotspēju, tika veikta jutīguma analīze, kas ļauj noteikt, kā ekonomisko, tehnoloģisko un politisko mainīgo izmaiņas ietekmē atmaksāšanās periodu katrā scenārijā.

Biometāns funkcionē kā alternatīva dabasgāzei, tāpēc tā cena lielā mērā ir atkarīga no fosilo kurināmo cenu dinamikas, atjaunīgās enerģijas pieprasījuma un nacionālā regulējuma. Ja biometāna tirgus cena palielinās par 10 % (no 70 EUR/MWh līdz 77 EUR/MWh), gada ieņēmumi visos scenārijos pieaug no 1 400 000 EUR līdz 1 540 000 EUR. Ņemot vērā to, ka ekspluatācijas izmaksas nemainās, atmaksāšanās periods samazinās:

- 1. scenārijā no 59,2 gadiem līdz 50,6 gadiem;
- 2. scenārijā no 10,8 gadiem līdz 9,3 gadiem;
- 3. scenārijā no 8,1 gada līdz 6,6 gadiem.

Šie rezultāti apliecina, ka biometāna cenas kāpums būtiski uzlabo investīciju atdevi visos scenārijos. Vienlaikus valsts atbalsta mehānismi, piemēram, subsīdijas, nodokļu atlaides un emisiju kvotu tirdzniecības sistēmas izmaiņas, var ievērojami uzlabot atjaunīgās enerģijas projektu finansiālo pievilcību. Ja valsts nodrošinātu 20 % kapitālieguldījumu atlaidi, sākotnējās investīcijas samazinātos:

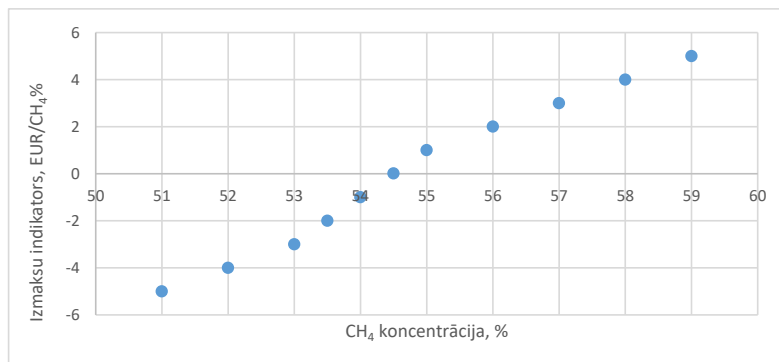
- 1. scenārijā no 17 050 000 EUR līdz 13 640 000 EUR;
- 2. scenārijā no 6 400 000 EUR līdz 5 120 000 EUR;
- 3. scenārijā no 5 200 000 EUR līdz 4 160 000 EUR.

Ņemot vērā kapitālieguldījumu samazināšanos, šādā gadījumā atmaksāšanās laiks arī attiecīgi samazinātos:

- 1. scenārijā no 59,2 gadiem līdz 47,4 gadiem;
- 2. scenārijā no 10,8 gadiem līdz 8,9 gadiem;
- 3. scenārijā no 8,1 gada līdz 6,5 gadiem.

Rezultāti parāda, ka atbilstoši valsts atbalsta instrumenti var padarīt ekonomiski dzīvotspējīgus pat tos projektus, kas sākotnēji šķiet pārāk kapitālietīpīgi, piemēram, pirmā scenārija risinājums, tomēr aprēķini rāda, ka pat ar pietiekami apjomīgu valsts atbalstu investīcijas pieslēgumu izbūvē ir ļoti sarežģīti atgūt saprātīgā termiņā.

Tika novērtēta arī saistība starp metāna koncentrāciju un ar izejvielām saistītām ražošanas izmaksām, un rezultāti parādīti 3.13. attēlā.



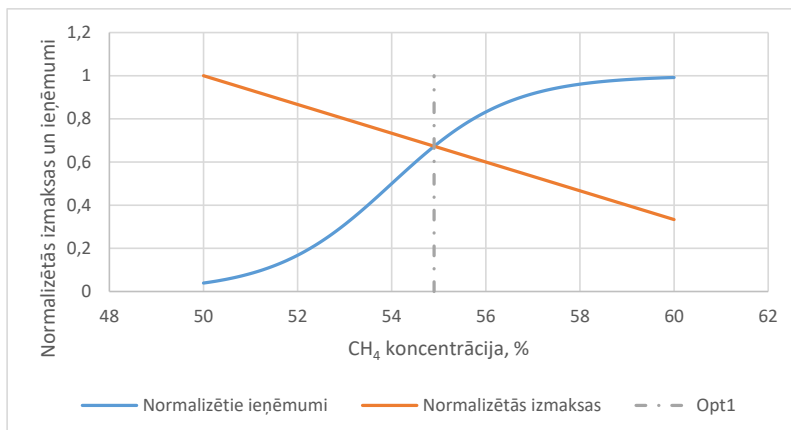
3.13. att. Izejvielu izmaksas, pamatojoties uz metāna koncentrāciju.

Apvienojumā ar iepriekšējiem atklājumiem, rezultāts redzams kā kompromiss starp gāzes kvalitāti, siltumnīcefekta gāzu veiktspēju un ražošanas izmaksām. Augstākas CH₄ koncentrācijas sasniegšana uzlabo biogāzes siltumspēju un enerģijas izlaidi, kā arī palielina oglekļa intensitāti un palielina izmaksas par enerģijas vienību. Līdz ar to optimālai biogāzes ražošanas stratēģijai vajadzētu būt vērstai uz izejvielu sastāva līdzsvarošānu tā, lai maksimāli palielinātu gan ekonomisko efektivitāti, gan vides ilgtspēju.

3.7. Optimizācijas modeļa rezultāti

Regresijas analīze (3.5. nodaļa) parādīja, kuras izejvielu kategorijas ir saistītas ar metāna satura svārstībām. Regresijas analīze nodrošināja empīrisku pamatu optimizācijas modelim, kurā metāna saturs biogāzē tiek izmantots kā rezultatīvais rādītājs.

Lai vizualizētu un novērtētu biogāzes ražošanas ekonomisko efektivitāti attiecībā pret metāna koncentrāciju, tika izstrādāts divu līkņu optimizācijas modelis. Šis modelis pārklāj normalizētas ikmēneša biometāna (kā galaprodukta) ieņēmumu un biogāzes ražošanas izmaksu līknes kā CH₄ koncentrācijas funkciju. Optimizācijas modelis neietver attīrīšanas procesa analīzi, jo tiek pieņemts, ka izmaksas ir salīdzināmas jebkurā scenārijā. Līknes ir iegūtas no empīriskiem datiem un attēlotas visā novērotajā CH₄ procentu diapazonā. Šī pieeja ļauj noteikt metāna koncentrācijas līmeni, kurā attiecība starp ražošanas izmaksām un ieņēmumiem sasniedz teorētisku līdzsvara punktu.



3.14. att. Teorētiskais optimizācijas modelis. Ieņēmumi un izmaksas pret CH₄ koncentrāciju.

Šī vizualizācija (3.14. att.) atklāj galveno ekonomisko dinamiku.

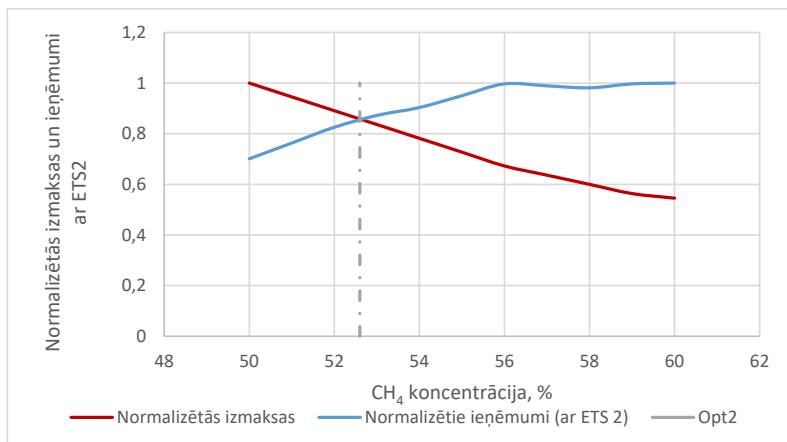
- Normalizētā ražošanas izmaksu līkne parasti samazinās, palielinoties CH₄ koncentrācijai, jo augstāks metāna saturs uzlabo gāzes kvalitāti un ļauj iegūt lielāku enerģijas izlaidi uz vienu apstrādātās izejvielas vienību.
- Un otrādi, normalizētie ieņēmumu līkne sākotnēji palielinās līdz ar CH₄ koncentrāciju, atspoguļojot augstāku enerģijas pārdošanas apjomu. Tomēr augstākā koncentrācijā tas var samazināties vai nedaudz samazināties, iespējams, sakarā ar nelielu ieguvumu samazināšanos vai kopējo pārstrādāto izejvielu svārstībām.

Šo divu līkņu krustojums iezīmē kritisko sliekšni, kurā normalizētie ieņēmumi ir vienādi ar normalizētajām izmaksām. Šis krustojums, kas apzīmēts ar Opt1, attēlo CH₄ koncentrāciju, kurā darbības rentabilitāte sasniedz līdzsvaru.

Pamatojoties uz analizētajiem datiem, optimālā CH₄ koncentrācija biogāzē ir aptuveni 54,9 %, kur normalizētās izmaksu un ieņēmumu līknes krustojas. Zem šī punkta ražošanas izmaksas pārsniedz ieņēmumus, kas liecina par neefektīvu darbību. Virs tā, lai gan ieņēmumi var turpināt pieaugt, marginālie ieguvumi samazinās, salīdzinot ar izmaksu līknes samazināšanos.

Tādējādi krustojuma punkts Opt1 nosaka ekonomiski optimālo metāna koncentrāciju iekārtas darbībai. Darbība šīs koncentrācijas tuvumā var dot vislīdzsvarotāko peļņu no ekspluatācijas ieguldījuma.

3.15. attēls ilustrē ES 2. emisijas kvotu tirdzniecības sistēmas (ETS 2) ietekmi uz biogāzes ražošanas ekonomiskajiem rādītājiem dažādās metāna (CH₄) koncentrācijās. Tajā salīdzinātas normalizētās biogāzes ražošanas izmaksas un normalizētie kopējie ienākumi no biometāna, tostarp piemaksa par oglekļa ienākumiem no ETS 2 kā CH₄ satura funkcija biogāzē.



3.15. att. Teorētiskais optimizācijas modelis. Ieņēmumi ar *ETS 2* un izmaksas pret CH₄ koncentrāciju.

Otrajā modelī *ETS 2* ienākumi tiek pievienoti kā fiksēta piemaksa (5 EUR/MWh) biometāna ieņēmumiem. Tas atspoguļo finansiālo ieguvumu no izvairīšanās no CO₂ emisijām vai emisijas kvotu pārdošanas saskaņā ar ES emisijas kvotu tirdzniecības sistēmu (*ETS 2*). Tā rezultātā normalizētā ieņēmumu līkne pārvietojas uz augšu īpaši zemākos CH₄ līmeņos, kur bāzes ieņēmumi ir vājāki. Jaunais optimālais punkts Opt2 tagad ir aptuveni 52,6 % CH₄. Tas nozīmē, ka pat biogāze ar zemāku metāna saturu kļūst ekonomiski dzīvotspējīga, pateicoties oglekļa kredīta ienākumiem.

Abu biogāzes ražošanas modeļu kontekstā – ar un bez *ETS 2* politikas atbalsta – optimizācijas līkne atspoguļo kopējo ekonomisko attālumu starp ražošanas izmaksām un maksimālajiem sasniedzamajiem ieņēmumiem par biometānu atkarībā no CH₄ koncentrācijas. Tā ir iztēles līkne, kas atspoguļo, cik tuvu vai tālu sistēma ir no tās maksimālās veikspējas katrā metāna līmenī. 3.14. un 3.15. attēlā optimizācijas līkne ir grafiska līkne virs Opt1 un Opt2 punktiem, kas apvieno faktiskās izmaksas un plaisu starp pašreizējiem ienākumiem un augstāko ienākumu līmeni. To var interpretēt kā soda līkni – jo augstāka tā vērtība pie noteiktā CH₄%, jo tālāk šis punkts ir no ekonomiskā optimāla.

ETS 2 stimuls samazina plaisu starp izmaksām un ieņēmumiem, jo īpaši 50–54 % CH₄ diapazonā, efektīvi samazinot peļņas sliekšni.

4. SECINĀJUMI

1. Regresijas analīzes rezultāti apstiprina, ka izejvielu sastāvs ir statistiski nozīmīgs faktors biometāna ražošanas apjoma un efektivitātes noteikšanā. Izmantotās izejvielas ietekmē saražotā metāna koncentrāciju, tādējādi parādot nepieciešamību ražotājiem optimizēt izejvielu plūsmas un to maisījumus biometāna ražotnēs. Konkrētā gadījuma izpētē spēcīgākā pozitīvā saistība ar metāna koncentrāciju tika konstatēta piena ražošanas blakusproduktiem ($R^2 = 0,786$), kas liecināja, ka šo substrātu īpatsvars palielināja potenciālu augstākai metāna koncentrācijai. Negatīva korelācija ($R^2 = 0,687$) izpētē bija piena laktozei, kur pie augstākas piena laktozes daļas maisījumā metāna koncentrācija saražotajā gāzē samazinājās. Ražošanā izmantoto izejvielu struktūra var tieši ietekmēt metāna koncentrāciju un līdz ar to arī biometāna ražošanas efektivitāti.
2. Izmaksu un ieguvumu analīze parāda, ka biometāna ekonomiskā dzīvotspēja ir nosacīti atkarīga no ārējiem tirgus un politikas faktoriem, īpaši enerģijas cenu un emisiju kvotu dinamikas.
3. Daudzkritēriju analīzes rezultāti parāda, ka biometāna integrācijas risinājumu efektivitāte ir relatīva un optimālā izvēle būtiski mainās atkarībā no izvēlēto kritēriju svara un sistēmas prioritātēm. Biometāns kā gāzveida energoresurss sasniedza augstāko vērtējumu ($C_i = 0,68$), salīdzinot ar ūdeņradi ($C_i = 0,45$) un dabasgāzi ($C_i = 0,35$). Konkrētās izpētes rezultāti norādīja, ka biometāna ražotnes tiešais pieslēgums ir visoptimālākais no vides ($C_i = 1,00$) un tehniskā viedokļa ($C_i = 0,60$), taču no ekonomiskā aspekta vēlāmākas var būt alternatīvas piegādes metodes, piemēram, biometāna ievades punkta izmantošana ($C_i = 0,81$) vai tiešā piegāde lietotājam ($C_i = 0,43$). Integrējot iegūtos rezultātus vienotā matricā, kopumā par optimālāko ir uzskatāms tiešais biometāna ražotnes pieslēgums ($C_i = 0,70$), tam seko biometāna ievades punkts ($C_i = 0,49$), savukārt integrētās matricas rezultātā zemākais sniegums ir biometāna piegādei ārpus gāzes sistēmas ($C_i = 0,00$).
4. Optimizācijas modelis apliecina, ka biometāna attīstība jāvērtē kā energosistēmas elements, nevis izolēts risinājums, ņemot vērā mijiedarbību ar citiem enerģijas avotiem un patēriņa sektoriem. Optimizācijas modelī teorētiskais līdzsvara punkts tika noteikts 54,9 % metāna koncentrācijā, kur krustojas normalizētās izmaksu un ieņēmumu līknes. Iekļaujot *ETS 2* stimulu 5 EUR/MWh, ekonomiski pamatota kļūst arī zemāka metāna koncentrācija, kur optimālais punkts metāna koncentrācijai pārvietojas uz 52,6 %, liecinot par uz to, ka politikas stimuli var paplašināt ekonomiski pamatotu biometāna ražošanu.
5. Multimetodiskais ietvars (*TOPSIS*, regresijas analīze, *CBA* un optimizācijas modelis), kas tika izmantoti darbā, parāda, ka atsevišķu metožu lietošana palīdz novērtēt konkrētu risinājumu, taču vairāku metožu lietošana palīdz veidot pārskatāmu un daudzpusīgu novērtējumu dažādos aspektos.
6. Biometāna attīstību Latvijā ierobežo gan tehniskie, gan tirgus, gan arī stabilas regulatīvās vides faktori, kas ietekmē tā ieviešanas apjomu un attīstības tempu.
7. Agrīnā tirgus attīstības stadijā īpaši nozīmīgi ir elastīgi risinājumi (piemēram, biometāna ievades punkti), kas ļauj pārvarēt infrastruktūras ierobežojumus un paātrināt biometāna nonākšanu tirgū.

8. No izpētes rezultātiem izriet, ka biometāna attīstībai ir nepieciešams īstenot daudzpusīgu integrācijas pieeju, kur viena atsevišķa metode vai uzlabojums nesniegs gaidīto ieguvumu tik kompleksi ietekmētas sistēmas attīstībā. Vienlaikus Latvijā ir nepieciešams turpināt attīstīt tiešos pieslēgumus, biometāna ievades punktus, kā arī apsvērt lietderību atsevišķos gadījumos piemērot biometāna piegādes ārpus sistēmas.
9. Biometāns ir piemērots integrācijai energosistēmā kā stabils un elastīgs energoresurss, kuru neietekmē saules vai vēja enerģijas pieejamība. Īpaši tas ir piemērots sektoros, kur elektrifikācija ir ierobežota, vienlaikus veicinot vietējo resursu izmantošanu un samazinot importa atkarību.
10. Biometāna attīstībai nepieciešama prognozējama un stabila politikas vide, kas samazina investīciju riskus un nodrošina ilgtermiņa skaidrību tirgus dalībniekiem, un Rietumeiropas valstu atbalsta pieredze liecina, ka stabiliem nosacījumiem seko stabila nozares izaugsme.
11. Izstrādāto analītisko ietvaru var izmantot nozarē un politikas veidotāju vajadzībām, lai izvērtētu atbalsta mehānismus, noteiktu infrastruktūras attīstības prioritātes un analizētu dažādu scenāriju ietekmi.
12. Pētījuma ierobežojumi saistīti ar datu pieejamību un analīzes apjomu, jo, piemēram, regresijas analīze balstīta vienas Latvijas biometāna ražotnes datos, kas iegūti par noteiktu laika periodu. Tādējādi šie rezultāti nevar pilnībā attiecināt uz visām biometāna ražotnēm, un tas liecina par turpmāku pētījumu nepieciešamību.
13. Promocijas darba rezultāti apstiprina izvirzīto hipotēzi, vienlaikus biometāna integrācijas scenāriju optimālais risinājums nav universāls, tas ir atkarīgs no vērtēšanas kritēriju svara, infrastruktūras pieejamības, tirgus brieduma un arī valsts politikas atbalsta mehānismiem. Ņemot vērā promocijas darbā secināto, hipotēze neapstiprinās kā viens pārāks risinājums pār citu, tā ir apstiprināta kā metodoloģiski pamatota iespēja identificēt salīdzinoši optimālākos biometāna integrācijas scenārijus atkarībā no noteiktajām prioritātēm.
14. Pētījuma rezultāti pierāda, ka biometāna integrācija Latvijas energosistēmā ir tehniski iespējama, ekonomiski pamatota un sistēmiski nozīmīga, taču tās sekmīgai attīstībai nepieciešama koordinēta, datos balstīta pieeja starp infrastruktūru, tirgu un politiku.

5. LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] R. El-Araby, “Biofuel production: exploring renewable energy solutions for a greener future,” Dec. 01, 2024, *BioMed Central Ltd.* doi: 10.1186/s13068-024-02571-9.
- [2] D. Mignogna, P. Ceci, C. Cafaro, G. Corazzi, and P. Avino, “Production of Biogas and Biomethane as Renewable Energy Sources: A Review,” Sep. 01, 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/app131810219.
- [3] A. Alengebawy, Y. Ran, A. I. Osman, K. Jin, M. Samer, and P. Ai, “Anaerobic digestion of agricultural waste for biogas production and sustainable bioenergy recovery: a review,” Dec. 01, 2024, *Springer Nature*. doi: 10.1007/s10311-024-01789-1.
- [4] S. Bakkaloglu and A. Hawkes, “A comparative study of biogas and biomethane with natural gas and hydrogen alternatives,” *Energy Environ. Sci.*, vol. 17, no. 4, pp. 1482–1496, Jan. 2024, doi: 10.1039/d3ee02516k.
- [5] G. Catalano, I. D’Adamo, M. Gastaldi, A. S. Nizami, and M. Ribichini, “Incentive policies in biomethane production toward circular economy,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 202, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.rser.2024.114710.
- [6] European Commission, “REPowerEU at a glance,” https://commission.europa.eu/topics/energy/repowereu_en#documents.
- [7] European Commission, “Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – REPowerEU plan,” <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52022DC0230>.
- [8] P. Sulewski, W. Ignaciuk, M. Szymańska, and A. Wąs, “Development of the Biomethane Market in Europe,” Feb. 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/en16042001.
- [9] Biomethane Industrial Partnership, “Insights into the Current Cost of Biomethane Production from Real Industry Data,” Oct. 2023. Accessed: Aug. 23, 2024. [Online]. Available: https://bip-europe.eu/wp-content/uploads/2024/08/BIP_TF4.2_study.pdf.
- [10] European Commission, “BIOMETHANE FICHE-Latvia (2021),” Brussels, Sep. 2023. Accessed: Dec. 03, 2025. [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/publications/2023-biomethane-country-fiches_en.
- [11] Centrālā Statistika Pārvalde, “Imports and consumption of natural gas, million m³.” Accessed: Jul. 03, 2024. [Online]. Available: https://data.stat.gov.lv/pxweb/en/OSP_PUB/START_NOZ_EN_ENB/ENB020m.
- [12] Klimata un Enerģētikas ministija, “Ministru kabineta rīkojums Nr. 326 “Enerģētikas stratēģija 2050. gadam” (“Pielikums”).” Accessed: Nov. 17, 2025. [Online]. Available: https://www.likumi.lv/wwwraksti/2025/113/BILDES/MK_RIK_326/R_326_PIEL.PDF.
- [13] “Ministru kabineta 2024. gada 12. jūlija rīkojums Nr. 573 ‘Aktualizētais Nacionālais enerģētikas un klimata plāns 2021.–2030. gadam’”. Accessed: Dec. 03, 2025. [Online]. Available: <https://likumi.lv/ta/id/353615>.
- [14] EBA (European Biogas Association), “Statistical report 2023 Tracking biogas and biomethane deployment across Europe,” Brussels, Dec. 2023.
- [15] ENTSO G (The European Network of Transmission System Operators for Gas), “ENTSO G – Report on Annual Renewable Gas Injections into Gas Networks,” Brussels, 2026. Accessed: Apr. 11, 2026. [Online]. Available:

- <https://www.entsog.eu/sites/default/files/2026-02/ENTSOG%20Report%20on%20Annual%20Renewable%20Gas%20Injections%20into%20Gas%20Networks%202026.pdf>.
- [16] J. W. A. Langeveld and E. C. Peterson, “Feedstocks for Biogas Production: Biogas and Electricity Generation Potentials,” 2018, pp. 35–49. doi: 10.1007/978-3-319-77335-3_2.
- [17] M. Tabatabaei and H. Ghanavati, Eds., *Biogas - Fundamentals, Process, and Operation*, vol. 6. Cham: Springer International Publishing, Springer Cham, 2018. doi: 10.1007/978-3-319-77335-3.
- [18] S. Bauer *et al.*, “Impacts of the use of the geological subsurface for energy storage: an investigation concept,” *Environ. Earth Sci.*, vol. 70, no. 8, pp. 3935–3943, Dec. 2013, doi: 10.1007/s12665-013-2883-0.
- [19] Latvijas Republikas Ekonomikas ministrija, “Informatīvais ziņojums ‘Kompleksa atbalsta sistēma biometāna ražošanai un izmantošanai.’” Accessed: Dec. 07, 2025. [Online]. Available: https://tapportals.mk.gov.lv/legal_acts/96f14727-3223-46b1-8934-5f71821aa466#.
- [20] G. Ferrari, Z. Shi, F. Marinello, and A. Pezzuolo, “From biogas to biomethane: Comparison of sustainable scenarios for upgrading plant location based on greenhouse gas emissions and cost assessments,” *J. Clean. Prod.*, vol. 478, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.143936.
- [21] A. Francisco López, T. Lago Rodríguez, S. Faraji Abdolmaleki, M. Galera Martínez, and P. M. Bello Bugallo, “From Biogas to Biomethane: An In-Depth Review of Upgrading Technologies That Enhance Sustainability and Reduce Greenhouse Gas Emissions,” *Applied Sciences*, vol. 14, no. 6, p. 2342, Mar. 2024, doi: 10.3390/app14062342.
- [22] G. Catalano, I. D’Adamo, M. Gastaldi, A.-S. Nizami, and M. Ribichini, “Incentive policies in biomethane production toward circular economy,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 202, p. 114710, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.rser.2024.114710.
- [23] Rīgas Stradiņa Universitāte, “Kvalitatīvā kontentanalīze.” Accessed: Mar. 15, 2026. [Online]. Available: <https://www.rsu.lv/petniecibas-terminu-vardnica/kvalitativa-kontentanalize>.
- [24] N. Donthu, S. Kumar, D. Mukherjee, N. Pandey, and W. M. Lim, “How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines,” *J. Bus. Res.*, vol. 133, pp. 285–296, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.jbusres.2021.04.070.
- [25] S. Tiwari, A. Chakrabarty, C. Schelly, M. Sahraei-Ardakani, J. Chen, and G. Ou, “Does energy policy scholarship consider energy resilience? A bibliometric analysis and agenda for reform,” *The Electricity Journal*, vol. 38, no. 3, p. 107496, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.tej.2025.107496.
- [26] U. A. Bukar, M. S. Sayeed, S. F. A. Razak, S. Yogarayan, O. A. Amodu, and R. A. R. Mahmood, “A method for analyzing text using VOSviewer,” *MethodsX*, vol. 11, p. 102339, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.mex.2023.102339.
- [27] T. W. Edgar and D. O. Manz, “Exploratory Study,” *Research Methods for Cyber Security*, pp. 95–130, 2017, doi: 10.1016/B978-0-12-805349-2.00004-2.
- [28] G. D. Pelegrina, L. T. Duarte, and J. M. T. Romano, “Application of independent component analysis and TOPSIS to deal with dependent criteria in multicriteria decision

- problems,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 122, pp. 262–280, May 2019, doi: 10.1016/j.eswa.2019.01.008.
- [29] B. Cayir Ervural, S. Zaim, O. F. Demirel, Z. Aydin, and D. Delen, “An ANP and fuzzy TOPSIS-based SWOT analysis for Turkey’s energy planning,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 1538–1550, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.06.095.
- [30] J. Su and Y. Sun, “An Improved TOPSIS Model Based on Cumulative Prospect Theory: Application to ESG Performance Evaluation of State-Owned Mining Enterprises,” *Sustainability*, vol. 15, no. 13, p. 10046, Jun. 2023, doi: 10.3390/su151310046.
- [31] L. Rozentale and D. Blumberga, “Methods to Evaluate Electricity Policy from Climate Perspective,” *Environmental and Climate Technologies*, vol. 23, no. 2, pp. 131–147, Nov. 2019, doi: 10.2478/rtuct-2019-0060.
- [32] E. Teirumnieka, N. Patel, K. Laktuka, K. Dolge, I. Veidenbergs, and D. Blumberga, “Sustainability dilemma of hemp utilization for energy production,” *Energy Nexus*, vol. 11, p. 100213, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.nexus.2023.100213.
- [33] V. Dandikas, H. Heuwinkel, F. Lichti, J. E. Drewes, and K. Koch, “Correlation between biogas yield and chemical composition of energy crops,” *Bioresour. Technol.*, vol. 174, pp. 316–320, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.biortech.2014.10.019.
- [34] N. A. Perendeci *et al.*, “Correlations between biochemical composition and biogas production during anaerobic digestion of microalgae and cyanobacteria isolated from different sources of Turkey,” *Bioresour. Technol.*, vol. 281, pp. 209–216, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.biortech.2019.02.086.
- [35] N. Ketsub *et al.*, “A systematic evaluation of biomethane production from sugarcane trash pretreated by different methods,” *Bioresour. Technol.*, vol. 319, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.biortech.2020.124137.
- [36] U. O. Aigbe, K. E. Ukhurebor, A. O. Osibote, M. A. Hassaan, and A. El Nemr, “Optimization and prediction of biogas yield from pretreated *Ulva Intestinalis* Linnaeus applying statistical-based regression approach and machine learning algorithms,” *Renew. Energy*, vol. 235, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.renene.2024.121347.
- [37] P. Ganeshan, A. Bose, J. Lee, S. Barathi, and K. Rajendran, “Machine learning for high solid anaerobic digestion: Performance prediction and optimization,” *Bioresour. Technol.*, vol. 400, May 2024, doi: 10.1016/j.biortech.2024.130665.



Ance Ansone dzimusi 1993. gadā Rīgā. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvusi bakalaura grādu vides zinātnē (2015), kā arī dubulto maģistra grādu vides zinātnē RTU un vides inženierzinātnēs Viļņas Ģedimina tehniskajā universitātē (2017).

Kopš 2014. gada profesionālā pieredze veidojusies enerģētikas, ilgtspējīgas attīstības un pārejas uz atjaunīgajiem energoresursiem jomās. Profesionālo pieredzi guvusi RTU Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūtā, kā arī Ekonomikas ministrijas Enerģijas tirgus un infrastruktūras departamentā, specializējoties gāzes tirgus, infrastruktūras un enerģētikas politikas jautājumos. Kopš 2020. gada strādā AS "Conexus Baltic Grid" Biznesa attīstības daļā. Profesionālā darbība saistīta ar starptautisko sadarbību, gāzes tirgus attīstību un atjaunīgo gāzu integrācijas veicināšanu.

Zinātniskās intereses saistītas ar biometāna ilgtspēju, tā integrāciju esošajā energosistēmā un atjaunīgo gāzu lomu pieejamas un ilgtspējīgas energoinfrastruktūras attīstībā.